

## Sub-base antártica chilena Yelcho. Sitio de referencia para aerosoles troposféricos de Chile continental

MARGARITA PRÉNDEZ<sup>1</sup>, RENÉ VERA<sup>1</sup> y JORGE ORTÍZ<sup>1</sup>

### RESUMEN

*La determinación de los niveles de contaminación atmosférica de un lugar, exige el conocimiento de las concentraciones naturales de especies en el aire. En la época actual es muy difícil encontrar áreas con atmósfera limpia, por lo que algunos lugares de la Antártica resultan muy adecuados para estos fines.*

*Se analizaron la forma, tamaño y composición elemental del material particulado total y fraccionado, suspendido en el aire, en el área de la sub-base chilena Yelcho, en la península Antártica, recolectado durante los veranos de 1988 y 1989. Se utilizaron sistemas de filtración y de impacción para la colección de las muestras y la separación por tamaño. Para los análisis de forma y composición química se usaron la microscopía electrónica, la microsonda electrónica y la espectrofotometría de absorción atómica. Se calcularon los factores de enriquecimiento, las correlaciones por pares y el análisis por componentes principales para determinar el origen y las fuentes de los elementos. Se comparó con otros sitios de baja contaminación y se concluyó que la sub-base Yelcho puede ser considerada como un buen sitio de referencia para los estudios de aerosoles atmosféricos en Chile continental.*

Palabras claves: Aerosoles troposféricos sub-antárticos, distribución por tamaño, composición química elemental, estudio de formas, determinación de orígenes.

## Chilean Antarctic sub-base Yelcho. Site of reference for tropospheric aerosols of continental Chile

MARGARITA PRÉNDEZ<sup>1</sup>, RENÉ VERA<sup>1</sup> and JORGE ORTÍZ<sup>1</sup>

### ABSTRACT

*Background determination of pollution level requires knowledge of the natural concentrations of the chemicals involved. As clean air places are difficult to find, Antarctica constitutes an excellent option, especially for Chile considering its geographical position.*

*The mass-size distribution, shape and elemental chemical composition of tropospheric aerosols of the Chilean sub-base Yelcho were studied during the summer seasons of 1988 and 1989 at two different altitudes. Filtration and impaction were used to collect the samples. Atomic absorption spectrophotometry, electron microscope and*

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile, Casilla 233, Santiago 1, Chile.

*electronic microsonde were used for the chemical and shape analysis. Statistical methods oriented to the receptor were used to determine origin and sources of the elements. Comparing this site with other of reduced pollution it was concluded that the sub-base Yelcho can be used as a very good site to measure the background level aerosols to be used for studies in continental Chile.*

Key words: sub-antarctic tropospheric aerosols, mass-size distribution, elemental chemical composition, shape studies origin assignments.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad no resulta sencillo encontrar lugares con aire puro, a excepción de aquellos cuya inaccesibilidad al hombre los hace obvios. En esta forma, es frecuente tomar como lugares de aire no contaminado, algunos sitios muy alejados de áreas urbanas: sitios suburbanos de difícil acceso o sitios francamente remotos.

La península Antártica es un lugar remoto, en el cual el hombre ha entrado con criterio científico y de desarrollo y por ende, de cuidado y protección hacia su entorno natural; por lo tanto, constituye un lugar ideal como sitio de referencia y con ventajas comparativas de acceso para Chile.

Hace algunos años, Brouton *et al.* (1984), comprobaron que las regiones polares del hemisferio sur estaban poco afectadas por la contaminación global para algunos elementos traza y compuestos de azufre. Algo similar indicaban las cuantificaciones de elementos traza en nieve, hielo, y agua (Brocas *et al.*, 1967; Murozumi *et al.*, 1969; Kaneshima y Yonohara, 1970).

Estudios efectuados por Shaw (1988) indican que los aerosoles troposféricos con un diámetro del orden de  $0,5 \mu\text{m}$  permanecen en el aire por decenas de días e interconectan la Antártica con otras regiones mediante un transporte a distancias de escala global. Dichos aerosoles provienen de eventos que han ocurrido en regiones distantes a muchos miles de kilómetros de la Antártica. Muchos otros autores adhieren a esta hipótesis (Tuncel, 1985; Préndez *et al.*, 1989; Lambert *et al.*, 1989; Guanghua *et al.*, 1990; Zhao, 1990).

Rojas *et al.*, (1992), recolectando una fracción fina y una gruesa han cuantificado elementos traza en aerosoles troposféricos de la base chilena Bernardo O'Higgins y les han asignado origen marino y antropogénico. Por su parte, Boutron y Wolf (1989), han cuantificado algunos metales pesados y azufre en la nieve y han encontrado que en general la contaminación atmosférica está restringida a los lugares próximos a las bases, excepto en el caso del Pb en que dicha contaminación está más generalizada.

Otros autores han informado además, la presencia de aerosoles provenientes de la corteza terrestre, de erupciones volcánicas y, en muy pequeña proporción, de origen extraterrestre (Zoller y Cunningham, 1980; Rodke, 1982; Préndez y Zolezzi, 1982; Shaw, 1983; Witkowski *et al.*, 1988; Witkowski, 1988; Préndez *et al.*, 1989; Tuncel *et al.*, 1989; Palais y Mosher, 1989; Higashi *et al.*, 1990).

Estudios preliminares efectuados en la sub-base Yelcho han mostrado que las concentraciones de polvo total y las de elementos traza son muy bajas y claramente inferiores a las encontradas en la isla Rey Jorge en Base Marsh<sup>2</sup> (Préndez *et al.*, 1989).

El presente trabajo tiene por objetivo determinar si Yelcho puede establecerse como sitio de referencia para material particulado total y/o fraccionado en los estudios sobre los aerosoles atmosféricos a lo largo de Chile continental.

<sup>2</sup> Actualmente, base Presidente Eduardo Frei Montalva.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La sub-base chilena Yelcho está ubicada en bahía South, isla Doumer (64°52'S., 63°36'W.). Se trata de una instalación usada y habitada sólo en los meses de verano con fines científicos, efectuándose distintos proyectos de investigación. Las dotaciones no superan los ocho investigadores por temporada.

Aproximadamente el 85% de la isla permanece cubierta por hielo y nieve durante el verano. En ella nidifican varias colonias de pingüinos Adelia, *Pygoscelis adeliae*, y la bahía es visitada esporádicamente por ballenas.

El lugar más próximo habitado es la base norteamericana Palmer, ubicada a unos 50 km al este, en la isla Anvers, con una dotación aproximada de 30 personas, entre científicos y personal de manutención.

Las muestras de aerosoles atmosféricos tomadas durante el mes de enero de 1988 a nivel del mar (Préndez *et al.*, 1989) fueron reestudiadas ampliando a más del doble el número de partículas analizadas mediante microscopía y microsonda electrónicas. En el verano de 1989 las muestras se tomaron a unos 50 m sobre el nivel del mar, en una plataforma especialmente diseñada para estos efectos, ubicada alrededor de 400 m al suroeste de la sub-base.

Para polvo total menor de 45  $\mu\text{m}$  se utilizaron dos sistemas de filtración de aire: el sistema de alto volumen (Hi-vol) que usó volúmenes del orden de 98  $\text{m}^3/\text{h}$  y el de bajo volumen (Low-vol) que empleó entre 2,5 y 3,5  $\text{m}^3/\text{h}$ . Se utilizó celulosa Whatman 41 (W-41) de 4,5 cm de diámetro y fibra de vidrio EPM-2000 de 4,5 cm de diámetro para el Low-vol y de 20 x 25  $\text{cm}^2$  para el Hi-vol.

Para polvo fraccionado se usó un impactador de cascada del tipo Andersen de cinco etapas y filtro final igual al descrito por Lee y Goranson (1972), Lee *et al.* (1972) y Préndez y Zolezzi (1982) con un flujo de 7,3  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ . Los diámetros de corte aerodinámico calculados desde los diámetros de corte efectivo (DCE) multiplicados por el factor de Cunningham son de: 2,84; 2,04; 1,40; 0,8 y 0,41  $\mu\text{m}$ . Se emplearon filtros de acetato de celulosa Millipore y discos de aluminio.

A fin de obtener suficiente cantidad de aerosol, los tiempos de recolección fueron variables según el tipo de muestreador empleado, con valores máximos del orden de 5 días para el caso del impactador y de 72 h para los sistemas con filtro (Cuadro 1), de acuerdo con Michetti *et al.*, quienes han establecido 5 días para la estación italiana de bahía Terra Nova.

Cuadro 1  
TIPO DE MUESTREADOR Y VOLÚMENES DE AIRE ASPIRADO

Muestra	Impactador	Volúmenes de aire aspirado ( $\text{m}^3$ )		
		Hi-vol	Celulosa	Low-vol F. vidrio
Y1	1050	-----	-----	-----
Y2	791,7	-----	-----	-----
Y2A	-----	4956,5	141,3	193,5
Y2B	-----	6957,1	190,7	261,1
Y3	843,6	-----	-----	-----
Y3A	-----	4643,5	117,9	161,4
Y3B	-----	7017,9	190,6	260,9
Y4	863,1	-----	-----	-----
Y4A	-----	4620,8	117,9	139,9
Y4B	-----	6838,6	160,8	222,0
Y5	838,3	-----	-----	-----
Y5A	-----	4529,9	109,0	148,1
Y5B	-----	6671,2	181,2	257,8
Y6	538,5	-----	-----	-----
Y6A	-----	7099,6	195,5	256,6

Los muestreos para sitios remotos están influidos por dificultades logísticas para trabajar por períodos más largos obteniéndose relativamente pocas muestras cada vez y debiéndose integrar información obtenida en más de un verano. Este procedimiento está apoyado por las investigaciones de Maenhaut *et al.* (1979), Tuncel (1985) y Tuncel *et al.* (1989), quienes han demostrado que, en sitios de la Antártica poco o no intervenidos por el hombre, las concentraciones elementales se mantienen prácticamente constantes de un año para otro, aun cuando existen ciclos de variaciones estacionales para invierno y verano (Wagenbach *et al.*, 1988; Shaw 1986; Tuncel *et al.*, 1989; Zoller y Cunningham, 1980). No obstante, a nivel del plateau polar, se ha planteado una disminución entre los años 1977 y 1985 (Samson 1990) y una variación de las concentraciones con el mes del año (Nakaya *et al.*, 1989).

Durante el período de muestreo (enero, 1988 y enero, 1989) la humedad relativa fluctuó entre 80% y 100%; la temperatura promedio fue de -4°C en 1988 y -1,0°C en 1989.

### Procesamiento de los filtros

Los filtros y los discos de aluminio se estabilizaron a peso constante en una cámara con temperatura y humedad relativa controladas ( $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y  $35\% \pm 1\%$ , respectivamente) provista de una balanza analítica de alta precisión (0,01 mg). El tiempo necesario para la estabilización a peso constante fue para filtros de fibra de vidrio y discos de aluminio: 24 h (tara) y 48 h (con muestra) y para filtros Millipore y Celulosa: 48 h (tara) y 72 h (con muestra).

La estática producida al interior de la cámara por la baja humedad relativa se solucionó colocando una fuente radiactiva de 241-Am y conectando a tierra un alambre de Cu situado en el piso de la cámara.

La manipulación de los filtros y los discos se efectuó con pinzas especiales de acero inoxidable. El transporte se realizó en cápsulas tipo Petri esterilizadas y selladas por el operador en el mismo sitio de muestreo. Dichas cápsulas se almacenaron en una cámara fría de  $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  hasta el instante del tratamiento.

Los filtros de celulosa y Millipore fueron tratados con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$  para su disolución de acuerdo a la técnica descrita por Préndez *et al.* (1983). Los elementos Al, Mg, Ca, Mn, Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, Cd y Pb se cuantificaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) y Na mediante fotometría de llama. Los valores obtenidos se corrigieron por eficiencia (Préndez *et al.*, 1983).

El análisis microscópico de la forma se efectuó en el Centro de la NASA en Moffett Field, California y la composición química elemental de las partículas recolectadas en las diferentes etapas del impactador se realizó mediante un microscopio electrónico de harrido, unido a una microsonda electrónica. Se efectuó el montaje directo de los discos de Al sobre discos de grafito unidos mediante una goma conductora especial, eliminándose así una manipulación tediosa y contaminante de las muestras, tal como sucede con las recolectadas con el colector ESP por Witkowski *et al.*, (1988) y con la ventaja adicional de trabajar con varios rangos de tamaños de partículas. Se tomaron entre 20 y 25 fotos para cada etapa del impactador. Posteriormente, en las fotos se midieron y clasificaron por forma 9984 partículas distribuidas de la siguiente forma: 894 en la primera etapa, 2480 en la segunda, 3626 en la tercera, 1358 en la cuarta y 1626 en la quinta etapa. Para más de la mitad del total de las partículas medidas se efectuó la determinación elemental cualitativa mediante la microsonda electrónica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se construyeron las curvas de concentración versus diámetro de partícula ( $D_p$ ), suponiendo un diámetro de corte inferior de  $0,001 \mu\text{m}$ , como se muestra en la Fig. 1, las cuales son a su vez 20 y 100 veces inferiores a las cuantificadas en Santiago (Préndez *et al.*, 1991), donde las mayores diferencias se

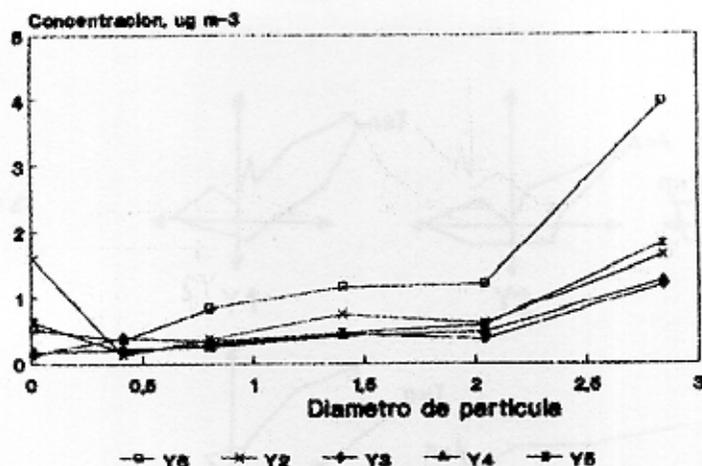


Fig. 1. Curvas de concentración versus diámetro de partículas.

encuentran para las partículas más finas recolectadas con el mismo impactador. Según Bodhuine (1989) las concentraciones en número para los núcleos de condensación en la Antártica son inferiores en un factor de 3 ó 4 a los que se encuentran en sitios urbanos.

La muestra Y2 indica que el material se encuentra más abundantemente en las etapas primera y última, lo que podría señalar una mayor abundancia de aerosol local y aerosol de origen remoto, respectivamente. Los muestreos Y3 a Y6 evidencian un aumento sostenido de la concentración en la primera etapa ( $2.84 \mu\text{m}$ ), lo cual se podría deber al número de aerosol local, originado por el deshielo paulatino al avanzar el verano. Este aerosol local incluye el aerosol marino, por tratarse de una isla y por la existencia de vientos provenientes del océano.

#### Influencia de factores meteorológicos

Las influencias marina y terrestre se analizan más adelante con mayor detalle, en función de algunos parámetros meteorológicos medidos en el lugar mediante el sistema DCP (González, A., Centro de Estudios Espaciales, Universidad de Chile, com. pers., 1989) los que se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2

VALORES PROMEDIO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS OBTENIDOS PARA CADA MUESTREO

Muestra	Temp. Media	Velocidad de viento (km h <sup>-1</sup> )		
		Norte	Nordeste	Oeste
Y2	1,4	----	12,3	2,8
Y3*	-7,2	----	5,1	4,7
Y4	-2,6	3,5	3,4	8,6
Y5	2,2	----	11,1	---
Y6	1,3	----	4,7	5,9

\* Se promedian sólo 50 de las 117 mediciones posibles.

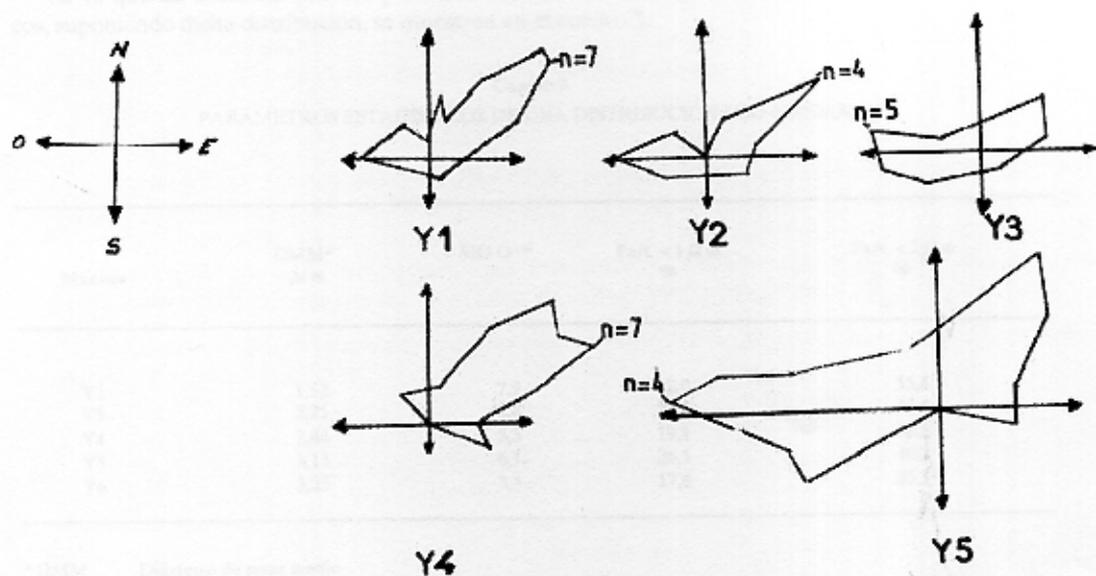


Fig. 2. Dirección de los vientos durante los muestreos.

En el muestreo Y2 predominan los vientos del Nordeste, los cuales podrían transportar el aerosol fino proveniente de lugares más lejanos. Esto sería válido para el muestreo Y5 en el que abundan las partículas finas. Los vientos del O y NE provienen del océano abierto.

Durante el muestreo Y6, con vientos dominantes del O y del NE se registran las mayores concentraciones.

En la Fig. 3 se muestran las curvas diferenciales de concentración versus diámetro de partícula ( $D_p$ ).

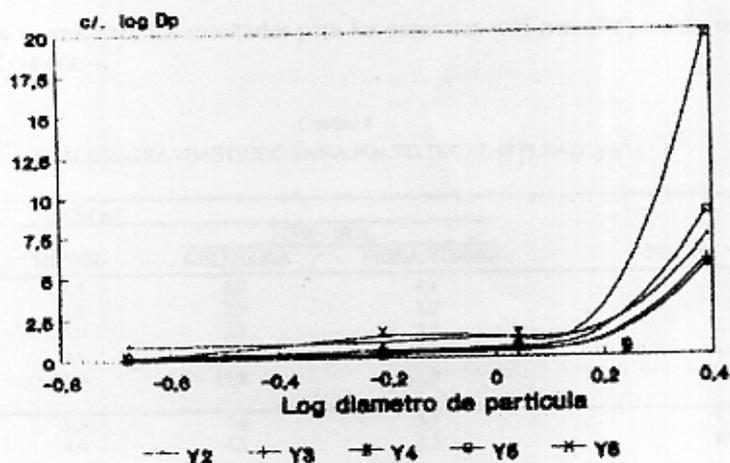


Fig. 3. Curva de distribución diferencial de masa versus tamaño de partícula.

## Aerosoles troposféricos de Yelcho

Se ve que las muestras podrían presentar una distribución log-normal. Los parámetros estadísticos, suponiendo dicha distribución, se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3  
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE UNA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL.

Muestra	DMM* $\mu\text{m}$	SIG G**	Part. $<1\ \mu\text{m}$ %	Part. $<2\ \mu\text{m}$ %
Y2	1,52	7,9	42,0	55,4
Y3	2,25	2,8	21,7	45,4
Y4	2,84	3,3	19,1	38,5
Y5	3,13	6,1	26,5	40,3
Y6	3,25	3,5	17,6	35,1

\* DMM : Diámetro de masa medio

\*\* SIG G : Desviación estándar geométrica

Los SIG G para las muestras Y2 e Y5 son muy altos y descartan una distribución log-normal. En estos muestreos, sin embargo, resulta muy importante el aerosol fino, posiblemente con contribución de aerosoles provenientes de lugares remotos.

Los vientos NE predominantes en este período serían responsables del transporte de las partículas finas. Si lo anterior fuera correcto, deberíamos esperar que los parámetros estadísticos del muestreo Y5 fueran similares, como efectivamente lo confirmó el resultado experimental.

En los otros muestreos hay mayor influencia de los vientos del oeste, o sea del mar, y se aprecia una disminución paulatina en el porcentaje de partículas  $<1\ \mu\text{m}$  y  $<2\ \mu\text{m}$  y un aumento sistemático de los DMM.

En el cuadro 4 se muestran los resultados para los aerosoles  $<45\ \mu\text{m}$  (PT) recolectados con los sistemas Hi-vol y Low-vol.

Cuadro 4  
ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO PARA POLVO TOTAL (PT) EN  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

P	T	$<45\ \mu\text{m}^*$			POLVO $<3\ \mu\text{m}^{**}$
		HI-VOL	LOW-VOL		
			CELULOSA	FIBRA VIDRIO	
Y2		8,3	5,7	4,4	5,05
Y3		5,9	2,9	2,0	2,88
Y4		5,9	3,7	3,7	2,79
Y5		8,4	8,3	3,7	3,95
Y6		17,8	14,3	11,9	8,01
X		9,3	7,0	5,1	4,54
C.V.		4,4	4,1	3,5	1,92

\* Valores promedio de 2 muestras consecutivas cubriendo el mismo periodo de 5 días.

\*\* Valores para muestras de 5 días cada una.

Se observa que para el Low-vol, el filtro de celulosa tiene una mayor eficiencia de recolección que el de fibra de vidrio. El análisis de correlación por pares para el conjunto de los cuatro sistemas de muestreo tiene una correlación positiva al 99% de significancia. Por tanto, la utilización de cualquiera de los sistemas empleados cuantifica adecuadamente el contenido de polvo total.

La comparación de los valores de Hi-vol con los de polvo  $<3 \mu\text{m}$  (Cuadro 4) muestra que, aproximadamente el 49% del material particulado corresponde a la fracción de alta respirabilidad ( $<3 \mu\text{m}$ ) y es posible que parte importante de él provenga de fuentes localizadas a grandes distancias, de acuerdo a lo sostenido anteriormente por Préndez *et al.* (1989) y aceptado también por otros autores (Tuncel, 1985; Lambert *et al.*, 1989; Guanghua *et al.*, 1990 y Zhan, 1990).

El Cuadro 5 muestra las concentraciones de los elementos cuantificados en el PT  $< 45 \mu\text{m}$  colectados sobre filtro de celulosa.

Cuadro 5  
CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS TRAZA EN AEROSOL  
ATMOSFÉRICOS MENORES DE  $45 \mu\text{m}$

Elementos, ng/m <sup>3</sup>							
	Fe	Mg	Zn	Cu	Pb	Mn	Cd
Y2A	70,8	205	355	37,7	<23,6	<2,6	0,0
Y2B	69,9	304	12,2	59,4	<17,5	<1,9	<0,9
Y3A	56,5	99	8,5	107	<28,3	0,0	0,0
Y3B	0,0	189	15,7	42,0	<17,5	0,0	0,0
Y4A	30,9	158	27,8	61,8	<30,9	<3,4	0,0
Y4B	0,0	168	16,6	70,7	<20,8	1,0	0,0
Y5A	0,0	141	9,2	30,6	30,6	<3,4	<1,5
Y5B	18,4	335	3,7	55,2	<18,4	0,0	0,0
Y6A	0,0	614	47,7	85,2	17,0	<1,9	0,0

Nota: Ni y Cr mostraron concentraciones que están bajo el límite de detección.

Los valores están dentro del rango de los determinados por Nakaya *et al.* (1989) en Dry Valleys Area, South Victoria Land, mediante análisis por activación neutrónica sobre muestras recolectadas con Hi-vol, excepto para Mg, elemento para el cual los valores del presente trabajo son mayores, los que a su vez son menores que los obtenidos en Marsh en 1980 (Préndez y Zolezzi, 1982), siendo estos últimos varias veces menores a los cuantificados en sitios suburbanos de Chile continental (Préndez *et al.*, 1984). Los resultados obtenidos entonces, apoyan las afirmaciones de Ma Ciguang *et al.* (1990) y de Lu *et al.* (1989) con respecto a la limpieza del aire de la Antártica.

El elemento de mayor abundancia es el Mg lo cual concordaría con la situación geográfica de la base (una isla) si su origen fuera marino.

Los elementos Zn y Cu muestran gran importancia relativa. Ambos son bastante abundantes en los suelos del lugar, en comparación con sus valores en la corteza terrestre (Carrasco y Préndez, 1991). Catell y Scott (1978) asignan al Cu un origen oceánico biogénico.

El Pb que en la mayoría de los muestreos está bajo el límite de detección, muestra algunos valores de concentración elevados. Este elemento también tiene una abundancia en el suelo local mayor al valor dado para la corteza terrestre (Carrasco y Préndez, 1991).

El Mn presenta valores bajos de concentración y en ambos casos es cero. Su valor en el suelo es bastante inferior al de la corteza terrestre (Carrasco y Préndez, 1991).

#### Análisis microscópico

Las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran ejemplos de las fotos de microscopía electrónica tomadas a las partículas recolectadas en las etapas 1, 2, 3, 4 y 5 del impactador, respectivamente.

En la primera etapa el 44,3% de las partículas analizadas tienen forma más bien esféricas, siendo frecuentes los aglomerados del tipo mostrado en la figura 4. El 43,3% son cristales con hábitos cuadrados y rectangulares, esencialmente compuestos de cloruros y sulfatos de Na y de Mg. Además, hay un 7,7% de hexágonos de NaCl y un 4,5% sin una forma definida.



Fig. 4. Fotografía de microscopía electrónica para aglomerados de partículas de la etapa 1 del impactador Andersen. Escala 1 mm = 1  $\mu$ m.

En la segunda etapa, el 71,3% de las partículas son cristales de hábitos hexagonal, rectangular y cuadrado, siendo el hábito hexagonal el más importante. El 26,3% son esferas. El CaCl<sub>2</sub> y el KCl son más frecuentes que el NaCl. Las partículas amorfas representan el 0,7%.

En la tercera etapa, los hábitos rectangulares y hexagonales son predominantes para los compuestos MgBr<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O.

Las tres etapas anteriores parecerían entonces estar mucho más vinculadas a un origen marino, en acuerdo con Fitzgerald (1991) para partículas mayores de 0,5  $\mu$ m.

En la cuarta etapa, los hábitos cuadrados de los cristales de KCl, CaCl<sub>2</sub> y NaCl son los predominantes, observándose menos NaCl, proporcionalmente. Además, se ve un cierto número de agrupaciones de partículas muy finas en forma de rectángulos delgados y transparentes muy similares a los cristales como filamentos (probablemente goethita, u óxido hidratado de Fe) descritos por Witkowski *et al.* (1988), así como también algunas partículas muy grandes para la etapa (figura 7) conteniendo

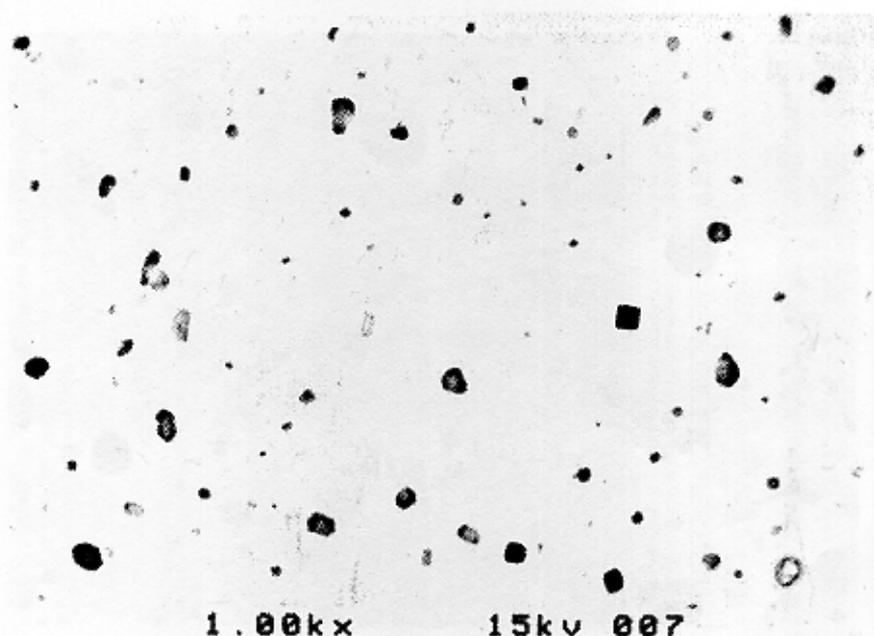


Fig. 5. Fotografía de microscopía electrónica para partículas de la etapa 2 del impactador Andersen. Escala 1 mm = 1  $\mu$  m.

Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Co y Ni, lo cual podría relacionarse a aerosoles generados desde el reciclamiento de suelo contaminado desde el aire, mediante el arrastre de aerosoles por las precipitaciones. También podrían vincularse a aerosoles de origen volcánico.

En la quinta etapa, se observan muchos aglomerados formados por partículas de diferentes formas y tamaños, conteniendo S, Fe, Si, Al y Cu además de Na, Cl, Mg y Ca (figura 8), lo cual podría confirmar el origen no marino de dichos aerosoles de diámetro en torno a 0,4  $\mu$  m, en acuerdo con Fitzgerald (1991) quien asocia las partículas de diámetro menor a 0,3  $\mu$  m a sulfatos de origen no marino.

En el filtro Millipore se encontraron unas raras esférulas silíceas de origen volcánico desconocido anteriormente descritas por Préndez *et al.* (1989). La evidencia experimental encontrada por Shaw (1983) hace pensar en que podría tratarse de partículas provenientes del Monte Erebus, a no ser que correspondan a aerosoles provenientes de las erupciones en la isla Decepción o incluso a aerosoles volcánicos provenientes de las frecuentes erupciones que ocurren en el Continente Sudamericano.

Pszenny *et al.* (1989) han encontrado que el aerosol mineral y las concentraciones de Rn-222 determinadas en el mar de Drake y en la costa oeste de la península Antártica, aunque bajas, son ligeramente elevadas respecto de niveles marinos background de sitios remotos, sugiriendo un débil, pero discernible carácter continental para el aire muestreado.

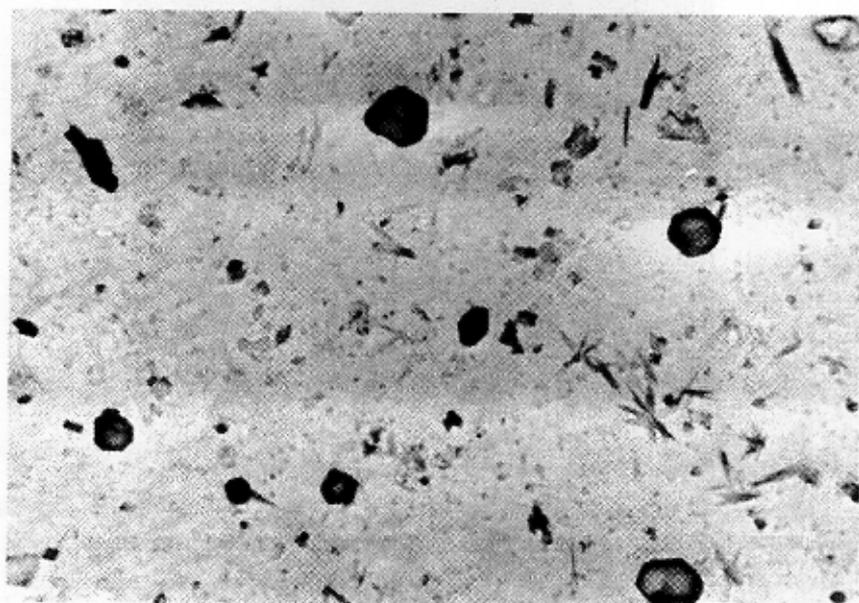


Fig. 6. Fotografía de microscopía electrónica para partículas de la etapa 3 del impactador Andersen. Escala 1 mm = 1  $\mu$ m.

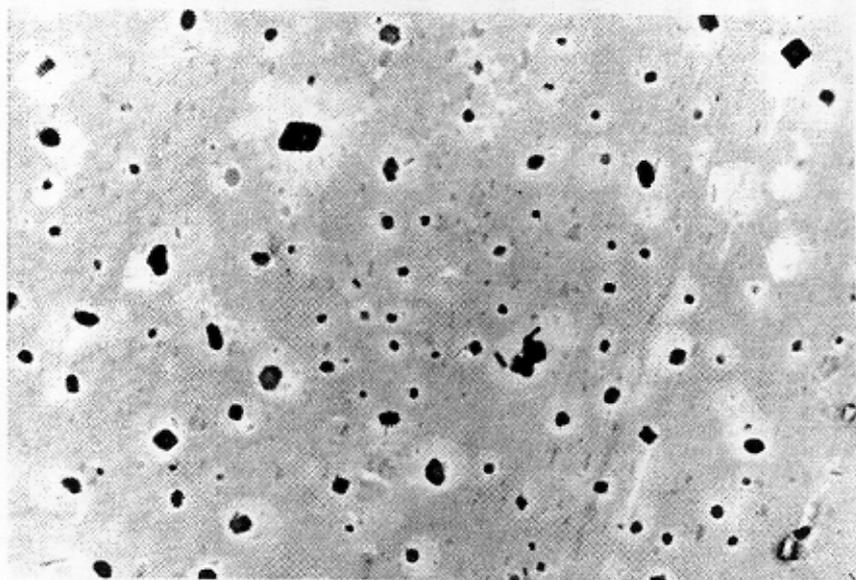
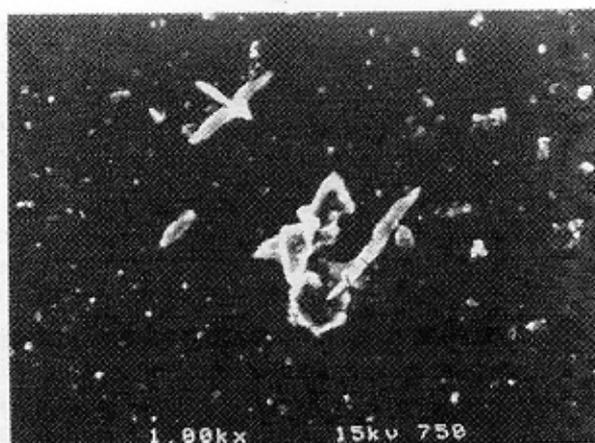


Fig. 7. Fotografía de microscopía electrónica para partículas de la etapa 4 del impactador Andersen. Escala 1 mm = 1  $\mu$ m.

Fig. 8. Fotografía de microscopía electrónica para partículas de la etapa 5 del impactador Andersen. Escala 1 mm = 1  $\mu$ m.

### Análisis químico

En el cuadro 6 se entregan las concentraciones de los elementos traza para el polvo fraccionado <3  $\mu$ m.

Cuadro 6

#### CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS TRAZA EN AEROSOLES ATMOSFÉRICOS MENORES DE 3 $\mu$ m

Muestras	Etapas	Elementos, ng/m <sup>3</sup>									
		Na	Mg	Al	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
Y1	E1	ND*	8,0	ND	ND	0,0	25,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	E2	ND	0,0	ND	ND	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	57,5
	E3	ND	0,0	ND	ND	0,0	52,6	0,0	5,7	0,0	78,4
	E4	ND	0,0	ND	ND	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	E5	ND	0,0	ND	ND	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0
	EM**	ND	10,6	ND	ND	0,0	14,5	0,0	4,0	18,3	0,0
Y2	E1	ND	57,0	36	60,9	0,0	1,8	1,3	7,2	0,0	<3,6
	E2	ND	26,0	33	ND	0,0	0,0	<0,6	4,2	4,4	<3,6
	E3	ND	28,9	11	21,6	0,0	5,4	1,9	5,1	0,0	<3,6
	E4	130	14,4	15	ND	0,0	0,0	<0,6	0,7	0,8	<3,6
	E5	83	4,0	ND	96,7	0,0	28,9	<0,6	0,0	1,5	<3,6
	EM	101	40,1	11	8,4	0,6	46,9	<0,6	8,7	11,2	4,3
Y3	E1	ND	38,6	17	ND	0,1	5,1	<0,6	12,9	1,8	<3,4
	E2	130	6,8	21	42,7	0,0	5,1	<0,6	10,8	5,2	4,7
	E3	108	12,9	7	28,4	0,0	5,1	<0,6	2,7	3,5	<3,4
	E4	51	5,1	9	24,7	0,0	0,0	<0,6	8,1	6,5	<3,4
	E5	25	1,0	12	15,8	0,0	0,0	1,2	0,7	0,0	<3,4
	EM	41	6,1	24	36,8	0,6	0,0	<0,6	10,2	21,7	<3,4
Y4	E1	ND	39,7	12	28,2	0,0	5,0	1,2	11,9	1,1	<3,3
	E2	109	15,6	9	5,4	0,0	0,0	1,2	9,3	5,4	<3,3
	E3	100	14,2	31	29,0	0,2	0,0	1,2	7,9	6,0	<3,4
	E4	39	6,3	8	0,0	0,2	0,0	<0,6	8,6	3,7	<3,3
	E5	24	3,0	10	7,5	0,0	19,9	<0,6	2,6	2,7	<3,3
	EM	15	2,6	31	6,4	0,0	0,0	<0,6	9,3	1,3	<3,3
Y5	E1	ND	57,6	27	ND	0,2	11,9	1,2	11,6	7,2	4,1
	E2	140	23,2	11	115,0	0,0	0,0	<0,6	7,5	8,6	<3,4
	E3	107	17,4	14	ND	0,0	5,1	<0,6	6,8	0,0	<3,4
	E4	64	9,9	15	7,0	0,4	0,0	<0,6	9,5	4,9	4,1
	E5	7	0,7	13	0,0	0,0	1,7	<0,6	1,4	5,9	<3,4
	EM	15	2,7	9	0,0	0,0	8,5	1,8	10,2	4,4	<3,4
Y6	E1	ND	125,0	22	155,0	0,7	8,0	1,9	9,1	13,7	6,4
	E2	ND	33,2	19	26,2	0,0	0,0	<0,9	8,6	1,2	<5,4
	E3	ND	37,5	17	14,2	0,0	2,7	<0,9	3,2	0,0	5,4
	E4	106	13,0	20	0,0	0,0	0,0	<0,9	11,8	0,0	<5,4
	E5	67	6,4	13	35,5	0,7	18,7	<0,9	5,4	13,0	8,6
	EM	54	8,0	11	0,0	0,0	0,0	<0,9	9,6	4,3	7,5

\* ND Elemento no determinado

\*\* EM Etapa del filtro Millipore

Nota: Cd mostró concentraciones iguales a cero, excepto para los filtros Millipore de los muestreos Y2 e Y5 en que su concentración fue <0,2 ng/m<sup>3</sup>.

Se observa que el Mg es uno de los elementos más abundantes en toda las muestras, al igual que para PT <45  $\mu$ m.

El Ca también se presenta como un elemento de gran abundancia y su comportamiento es muy similar al de Mg. Por otra parte, Na en las etapas cuantificadas es lejos el elemento más abundante y con una distribución similar a las de Mg y Ca.

El Al también está dentro de los elementos abundantes y presenta un comportamiento poco definido en las muestras Y3 e Y4, mientras que en las muestras Y2, Y5 e Y6 la distribución de concentraciones es más regular, teniendo el comportamiento típico de un elemento de origen natural, esto es, más abundante en las partículas más grandes.

El Fe se presenta en concentraciones relativamente bajas, incluso cero, en varias etapas de las diferentes muestras. Tiene un comportamiento irregular sin una distribución definida y esto podría quizás ser indicador de su diferente origen según sea el tamaño de partícula analizada. Así, para el muestreo de Y2 con vientos predominantes del NE, su mayor abundancia en partículas más finas podría significar tal vez, un mayor aporte de aerosoles de origen remoto.

El Mn aparece sólo en algunas etapas de los diferentes muestreos con concentraciones muy bajas, sin existir ninguna relación entre las etapas de las muestras en que fue detectado.

Ni y Pb presentan bajas concentraciones, incluso llegando a valores que están bajo el límite de detección de la técnica empleada; sin embargo, están presentes en todas las etapas de los diferentes muestreos.

El Cu se presenta como un elemento interesante, pues no muestra concentraciones con tendencias claramente definidas. Los valores llegan a ser mayores que los de Fe. Además, las etapas E1, E4 y el filtro Millipore registran las mayores concentraciones, con excepción del Y1. Tal vez aquí se observe la influencia del aerosol oceánico de Cu biogénico que argumenta Cattell y Scott (1978).

Las concentraciones de Zn aumentan en el tiempo, lo cual podría asociarse a la quema de combustible fósil en la base. La distribución de sus concentraciones en las diferentes etapas no es regular.

El valor de las concentraciones absolutas de los elementos no es sin embargo, un parámetro suficiente para considerarlos como un contaminante. Primero se debe determinar su origen.

#### Factores de enriquecimiento

Para la asignación del origen de los elementos en el aire se utilizan varios criterios. En este trabajo se emplearon: los factores de enriquecimiento, las correlaciones por pares y en forma preliminar, debido al bajo número de muestras, el análisis por componentes principales.

Los factores de enriquecimiento (FE): Se calculan según la fórmula:

$$FE = \frac{C_i \text{ aerosol} / C \text{ estándar aerosol}}{C_i \text{ corteza} / C \text{ estándar corteza}}$$

en que:

- $C_i$  : Concentración de elemento  $i$  en el aerosol
- $C$  estándar aerosol : Concentración de un elemento estandarizador en el aerosol
- $C_i$  corteza (o suelo) : Concentración del mismo elemento  $i$  en la corteza terrestre (o suelo)
- $C$  estándar corteza (o suelo) : Concentración del elemento estandarizador en la corteza terrestre (o suelo)

donde los elementos de origen natural tienen FE próximos a uno; si los FE son mayores o muchos mayores que uno los elementos son de origen antrópico. No obstante, no existe un valor internacionalmente aceptado, mayor que uno que resulte admisible para asignar a los elementos un origen natural; por ende, dicho valor depende del criterio del investigador.

En este trabajo se utilizó como elemento normalizador, básicamente Fe dada su facilidad de análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica. También se empleó Al y al tratar de determinar un origen marino para los elementos, Mg.

Normalmente el FE se calcula en función de las concentraciones del elemento en la corteza terrestre de acuerdo a la fórmula indicada. Sin embargo, dichos valores son promedios internacionales de suelos hasta 30 km de profundidad y por lo tanto, no necesariamente corresponden al contenido de Fe del suelo que puede ser suspendido en el aire en forma local (Carrasco y Préndez, 1984).

De acuerdo con los resultados de Carrasco y Préndez (1984) y las de otros autores, el Fe en la Antártica tiene un origen natural, derivado de rocas de la corteza (Préndez y Solezzi, 1980; Nakaya, 1982; Guanhua *et al.*, 1990). En este trabajo se usó como referencia la corteza (Mason, 1966), con fines de comparación a nivel internacional y el suelo local, para determinar el origen del elemento proveniente del lugar mismo (Carrasco y Préndez, 1991).

En los cuadros 7 y 8 se dan los FE respecto de Fe en la corteza y en el suelo local, respectivamente para polvo menor de 45  $\mu$ m.

Cuadro 7  
FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO PARA POLVO FRACCIONADO MENOR  
DE 45  $\mu$ m ELEMENTO NORMALIZADOR: Fe DE CORTEZA

Muestra	Factor de enriquecimiento				
	Mg	Mn	Cu	Zn	Pb
Y2A	7	2	484	3380	1333
Y2B	10	1	773	127	1001
Y3A	7	**	1722	107	2003
Y3B	*	*	*	*	*
Y4A	12	6	1818	642	4000
Y4B	*	*	*	*	*
Y5A	*	*	*	*	*
Y5B	44	**	2727	144	4000
Y6A	*	*	*	*	*

\* Concentración del elemento de referencia en la muestra, es cero.

\*\* Concentración del elemento indicado, es cero.

Cuadro 8  
FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO PARA POLVO FRACCIONADO MENOR  
DE 45  $\mu$ m. ELEMENTO NORMALIZADOR: Fe DE SUELO

Muestra	Factor de enriquecimiento				
	Mg	Mn	Cu	Zn	Pb
Y2A	4	1	48	237	303
Y2B	6	1	77	9	227
Y3A	3	**	172	8	455
Y3B	*	*	*	*	*
Y4A	7	4	182	45	909
Y4B	*	*	*	*	*
Y5A	*	*	*	*	*
Y5B	26	**	273	10	909
Y6A	*	*	*	*	*

\* Concentración del elemento de referencia en la muestra, es cero.

\*\* Concentración del elemento indicado, es cero.

Se observa que los valores de los FE disminuyen cuando se usa suelo de referencia en lugar de corteza definiéndose más claramente los orígenes de los diferentes elementos: Mn: natural, con fuente en el suelo; Mg: natural, con una fuente mixta suelo y posiblemente mar (dada la geografía del lugar de muestreo) y Cu, Zn y Pb: con orígenes claramente antrópicos.

En los cuadros 9, 10 y 11 se dan los FE respecto de Fe en la corteza, Fe en el suelo local y Al en la corteza respectivamente para polvo menor de  $3 \mu\text{m}$ .

Cuadro 9  
FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO PARA POLVO FRACCIONADO MENOR  
DE  $3 \mu\text{m}$ . ELEMENTO NORMALIZADOR: Fe DE CORTEZA

Muestra	Etapa	Factor de enriquecimiento									
		Na	Mg	Al	Ca	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Y2	E1	ND#	91	14	45	**	523	4073	**	**	8960
	E2	ND	*	*	ND	**	*	*	*	**	*
	E3	ND	15	1	5	**	263	962	**	**	2987
	E4	ND	*	*	ND	**	*	*	*	**	*
	E5	7	0,4	ND	5	**	16	**	42	**	558
	EM	5	3	0,2	0,2	1	189	189	191	1176	411
Y3	E1	ND	217	2	ND	1	88	2575	282	**	2987
	E2	59	38	3	11	**	88	2156	816	**	4129
	E3	49	73	1	7	**	88	539	549	**	2987
	E4	*	*	*	*	**	*	*	*	**	*
	E5	*	*	*	*	**	*	**	**	**	*
	EM	*	*	*	*	**	*	*	*	*	*
Y4	E1	ND	23	2	8	**	179	2423	176	**	2957
	E2	*	*	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*
	E4	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*
	E5	3	0,5	0,3	0,5	**	23	133	109	**	743
	EM	*	*	*	*	**	*	*	*	*	*
Y5	E1	ND	14	2	ND	1	75	993	484	**	1544
	E2	*	*	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	49	10	2	ND	**	88	1358	**	**	2987
	E4	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*
	E5	9	1	5	**	**	264	839	2776	**	8960
	EM	4	1	2	**	**	158	1222	414	6588	1792
Y6	E1	ND	45	2	26	5	177	1158	1370	**	3584
	E2	ND	*	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	ND	40	4	7	**	249	1207	**	**	8960
	E4	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*
	E5	8	1	1	6	2	36	294	556	**	2060
	EM	*	*	*	**	**	*	*	*	**	*

# Elemento no determinado

\* Concentración del elemento de referencia, es cero

\*\* Concentración del elemento es igual a cero

Cuadro 10

FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO PARA POLVO FRACCIONADO MENOR DE  $3 \mu\text{m}$ . ELEMENTO NORMALIZADOR: Fe DEL SUELO DE LA BASE

Muestra	Etapa	Factor de enriquecimiento							
		Mg	Al	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Y2	E1	46	11	**	1510	364	**	**	1800
	E2	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	8	1	**	760	86	**	**	600
	E4	*	*	**	*	*	*	**	*
	E5	0,2	**	**	47	**	3	**	112
	EM	1	0,1	0,5	29	17	12	25	83
Y3	E1	11	2	0,8	254	230	17	**	600
	E2	2	2	**	254	193	50	**	829
	E3	4	1	**	254	48	34	**	600
	E4	*	*	**	*	*	*	**	*
	E5	*	*	**	*	*	**	**	*
	EM	*	*	**	*	*	*	*	*
Y4	E1	12	1	**	518	216	11	**	594
	E2	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	*	*	*	*	*	*	**	*
	E4	*	*	*	*	*	*	**	*
	E5	0,2	0,3	**	65	12	7	**	149
	EM	*	*	**	*	*	*	*	*
Y5	E1	7	1	1	218	89	30	**	310
	E2	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	5	2	**	254	121	**	**	600
	E4	*	*	*	*	*	*	**	*
	E5	1	4	**	761	75	170	**	1800
	EM	0,5	1	**	457	109	25	140	360
Y6	E1	23	2	3	512	103	84	**	720
	E2	*	*	**	*	*	*	**	*
	E3	20	3	**	719	108	**	**	1800
	E4	*	*	**	*	*	**	**	*
	E5	0,5	0,4	2	104	26	34	**	414
	EM	*	*	**	*	*	*	**	*

\* Concentración del elemento de referencia, es cero

\*\* Concentración del elemento es igual a cero

Nota: Para Mg se tomó la concentración del suelo de Marsh

Al igual que en el polvo menor de  $45 \mu\text{m}$ , en este caso y para la normalización respecto de la corteza, Mg parece mostrar un origen mixto: natural (fuente: corteza) en los aerosoles  $< 1,4 \mu\text{m}$  y algún otro para partículas mayores de  $1,40 \mu\text{m}$  (Etapa 3). En la normalización respecto de suelo la diferencia aparece para partículas un poco más grandes (mayores o iguales a  $2 \mu\text{m}$ ).

El Mn, en las pocas etapas en que es detectado y el Al, muestran un origen natural (fuente: suelo) cualquiera sea el sistema de normalización utilizado.

El Ni, pese a sus bajas concentraciones en el aire evidencia siempre un origen antrópico.

El Cu y el Zn muestran un origen antrópico con FE que disminuyen al calcularse respecto de suelo local. No se debe perder de vista sin embargo, que el mayor contenido de Cu y Zn en el suelo local puede ser natural o derivado de una contaminación de él. Si se acepta que una erupción volcánica genera una contaminación natural, el origen volcánico para estos elementos planteado por Nakaya

(1982), podría explicar la contaminación por reciclado al aire de material de origen volcánico depositado sobre el suelo. La alternativa es que provenga de la quema de combustibles fósiles.

Los valores obtenidos para Cd y Pb no dejan ninguna duda sobre sus orígenes antrópicos. Bourtou y Wolf (1989) sostienen que la contaminación por Pb en la Antártica si bien baja, es general, a diferencia de lo que ocurre con otros metales pesados para los cuales existen contaminaciones locales. En el caso del Cd la fuente podría ser la quema de envases de conserva.

Cuadro 11  
FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO PARA POLVO FRACCIONADO MENOR  
DE 3  $\mu$ m. ELEMENTO NORMALIZADOR: Al DE CORTEZA

Muestra	Etapa	Factor de enriquecimiento								
		Na	Mg	Ca	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Y2	E1	ND#	7	3	**	39	300	**	**	660
	E2	ND	3	ND	**	18	165	133	**	607
	E3	ND	11	4	**	189	691	**	**	2147
	E4	31	4	ND	**	47	71	64	**	1618
	E5	*	*	*	**	*	*	*	**	*
	EM	32	15	2	5	63	95	1193	**	2564
Y3	E1	ND	9	ND	0,5	38	1105	121	**	1282
	E2	21	1	4	**	31	770	291	**	1475
	E3	53	8	8	**	94	575	586	**	3186
	E4	19	2	5	**	73	1342	846	**	2478
	E5	7	0,4	3	**	113	88	**	**	1890
	EM	6	1	3	0,04	27	623	1042	3361	914
Y4	E1	ND	15	5	**	114	1543	112	**	1882
	E2	42	7	1	**	149	1576	719	**	2460
	E3	11	2	2	0,6	43	386	230	**	710
	E4	16	3	**	2	81	1582	535	**	2673
	E5	8	1	1	**	64	380	310	**	2122
	EM	2	0,4	0,4	**	22	455	50	2689	710
Y5	E1	ND	9	ND	0,6	49	641	312	**	996
	E2	44	9	21	**	61	1035	932	**	2065
	E3	26	5	ND	**	46	714	**	**	1571
	E4	15	3	1	2	44	957	388	**	1817
	E5	2	0,2	**	**	51	163	540	**	1743
	EM	6	1	**	**	223	1728	586	9318	2535
Y6	E1	ND	24	14	3	96	625	740	**	1935
	E2	ND	7	3	**	52	675	74	**	1864
	E3	ND	9	2	**	58	282	**	**	2096
	E4	18	24	**	**	48	866	**	**	1745
	E5	15	2	7	4	66	540	1022	**	3786
	EM	17	3	**	**	91	1325	466	**	4556

\* Concentración del elemento de referencia en la muestra es cero

\*\* Concentración del elemento indicado es cero

# Elemento no determinado

La normalización respecto de Al confirma las asignaciones ya dadas. Además, resulta claro que Na no tiene su origen en la corteza terrestre, no pudiendo afirmarse lo mismo para Mg y Ca. Para Mn se reafirma su origen en la corteza. Los restantes elementos tienen orígenes antrópicos.

Si consideramos la posible contribución del aerosol marino a nuestros aerosoles, se hace necesario el cálculo de los FE versus Mg del agua de mar, como elemento de referencia (Mason, 1966), como se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12

FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO PARA POLVO FRACCIONADO MENOR DE 3  $\mu$  m. ELEMENTO NORMALIZADOR: Mg DEL AGUA DEL MAR

		Factores de enriquecimiento							
		Na	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
					$\times 10^{-3}$				$(\times 10^{-6})$
Y2	E1	ND #	3	**	12	4,0	182	**	2,7
	E2	ND	ND	**	**	4,4	238	44	6,0
	E3	ND	2	**	71	12,1	254	**	5,4
	E4	1	ND	**	**	8,0	70	14	10,9
	E5	3	76	**	2749	29,1	**	97	38,8
	EM	0,3	1	48	0,4	2,9	312	72	4,6
Y3	E1	ND	ND	8,4	50	2,9	481	12	3,8
	E2	2	20	**	285	16,3	2284	198	29,8
	E3	1	7	**	151	8,6	301	70	11,4
	E4	1	15	**	**	21,7	2284	330	28,8
	E5	3	50	**	**	221,8	1006	**	146
	EM	1	19	**	**	18,2	2404	921	24,0
Y4	E1	ND	2	**	48	5,5	431	7	3,6
	E2	1	1	**	**	14,2	857	89	9,1
	E3	1	6	46	**	15,6	800	109	10,0
	E4	1	**	103	**	17,6	1962	152	22,6
	E5	1	8	**	2524	36,9	1246	233	47,4
	EM	1	7	**	**	42,6	5142	120	54,7
Y5	E1	ND	ND	11	79	3,9	290	32	3,1
	E2	1	16	**	**	4,8	465	96	6,3
	E3	1	ND	**	112	6,4	562	**	8,4
	E4	1	2	131	**	11,2	1380	128	17,9
	E5	1	**	**	924	158	2876	2181	210
	EM	1	**	**	1198	123	5432	422	54,3
Y6	E1	ND	4	18	24	2,8	104	28	2,2
	E2	ND	3	**	**	5,0	372	9	7,0
	E3	ND	1	**	27	4,4	123	**	6,2
	E4	1	**	**	**	11,1	1131	**	15,5
	E5	1	27	354	1112	26,0	1213	526	58,0
	EM	1	**	**	**	20,8	1725	139	40,4

# Elemento no determinado

\* Concentración del elemento de referencia en la muestra, es cero

\*\* Concentración del elemento indicado, es cero

Resulta evidente el origen marino de Na. El Ca en general muestra también este origen aun cuando la situación no es clara en la muestra Y3 y en el caso de las partículas de 0,41  $\mu$  m (Etapa 5). En cambio Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb no tienen origen marino.

Intentando asignar mejor las fuentes de origen de los distintos elementos, se hizo el cálculo de las correlaciones por pares, tanto para el polvo total (PT - 45  $\mu$  m) como para el polvo fraccionado (menor de 3  $\mu$  m).

#### Análisis de correlación

Como se muestra en el cuadro 13, no hay ninguna correlación significativa entre pares de elementos en el PT <45  $\mu$  m.

Cuadro 13  
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE PARES DE ELEMENTOS  
EN POLVO TOTAL MENOR DE 45  $\mu$  m

	Coeficientes de correlación (#)					
	Mg	Zn	Cu	Pb	Mn	Cd
Fe	-0,211	0,491	0,125	0,117	0,095	-0,021
Mg		0,014	0,193	-0,627	-0,018	-0,152
Zn			-0,326	0,034	0,314	-0,218
Cu				-0,004	-0,406	-0,444
Pb					0,531	0,274
Mn						0,491

(#) Se consideran 9 pares de elementos cada vez.

El análisis de componentes principales para este conjunto de valores indica, en forma preliminar dado el reducido número de muestras, la existencia de tres componentes, según se muestra en el cuadro 14. Este método pretende resolver mejor los componentes para lo cual se utiliza un programa SAS en el que los factores iniciales se rotan con el método Varimax y se retienen sólo los componentes cuyos valores propios son mayores que uno.

Cuadro 14  
ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES PARA POLVO MENOR  
DE 45  $\mu$  m SÓLO PARA LAS VARIABLES QUÍMICAS

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Fe	0,19136	0,17188	0,90585*
Mg	-0,86344	0,00320	-0,07368
Zn	-0,11222	-0,43956	0,79546*
Cu	0,02315	0,84992*	0,03100
Pb	0,91810*	-0,20815	0,02360
Mn	0,28321	-0,77206	0,13539
con:	F1	F2	F3
	1,718395	1,584525	1,478582

La primera componente contiene sólo Pb, la segunda solamente Cu y la tercera Fe y Zn, confirmando la existencia de tres fuentes diferentes.

Se trata posiblemente de la contaminación general de la Antártica por Pb (Boutron y Wolf, 1989), de la presencia de aerosol de Cu de origen marino (Catell y Scott, 1978), explicable por tratarse de partículas grandes y de un origen de corteza y/o suelo reciclado para Fe y Zn, probablemente más fácil de detectar en verano por ser época de deshielo. Esta última hipótesis se reafirma al considerar la disminución de los factores de enriquecimiento al cambiar de corteza a suelo como referencia. La primera componente explica el 35,9% de la variabilidad, la segunda el 33,1% y la tercera el 20,9%, quedando aún un 20,30% sin explicar.

Cuando se introducen las variables meteorológicas disponibles se observa que, para el caso del viento NE, aparece una correlación, tal como se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15  
ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES PARA POLVO MENOR  
DE 45  $\mu\text{m}$  PARA LAS VARIABLES QUÍMICAS Y EL VIENTO NE

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Fe	0,91379 *	0,21152	0,21718
Mg	-0,09056	-0,81961	-0,00607
Zn	0,72355 *	0,00940	-0,32047
Cu	-0,10409	0,03527	0,90263 *
Pb	-0,03215	0,94198 *	-0,15283
Mn	0,08424 *	-0,38288	-0,69303
NE	0,66354 *	-0,20780	-0,49801
con:	F1	F2	F3
	1,825975	1,794944	1,716314

Al igual que antes, en este caso, una componente contiene sólo Pb, otra solamente Cu y una tercera Fe y Zn, confirmándose la existencia de tres fuentes diferentes, sólo que las prioridades han cambiado, variando el peso relativo de las componentes y correlacionándose directa, explícitamente y en primer lugar el viento con Fe y Zn, confirmando su fuente en el suelo de la base. La primera componente explica el 34,2% de la variabilidad, la segunda el 33,6% y la tercera el 32,2%, quedando aun un 23,8% sin explicar.

Estas consideraciones se apoyan en los resultados de Tuncel *et al.* (1989), quienes han encontrado que en el Polo las concentraciones de los elementos asociados al polvo de corteza y a las sales marinas muestran variaciones estacionales opuestas. Las concentraciones de los elementos provenientes de la corteza son bajas en invierno y se duplican en verano, en cambio las de los elementos de origen marino son bajas en verano y altas en invierno.

Para el mismo trabajo de asignación de fuentes, pero ahora para polvo respirable, en el cuadro 16 se muestran las correlaciones por pares para los elementos traza en polvo fraccionado  $<3 \mu\text{m}$ .

Para esta fracción de aerosol se observa el probable origen mixto, suelo y mar, anteriormente planteado para Mg. El Fe y el Mn parecen tener su fuente común en el suelo. La correlación al 95% entre Mn-Pb, elementos habitualmente de origen diferente, podría explicarse a través del reciclaje de suelo contaminado con Pb (recordemos la contaminación antes detectada con Zn en las partículas grandes), ya sea por la presencia de aerosoles finos provenientes de lugares continentales lejanos, apoyados en los resultados obtenidos por Pszeny *et al.* (1989).

Cuadro 16  
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE PARES DE ELEMENTOS  
EN POLVO FRACCIONADO MENOR  $3 \mu\text{m}$

	Coeficientes de correlación (#)								
	Mg	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Na	0,672*	0,368	0,054	0,067	-0,191	0,018	-0,048	-0,478	0,070
Mg		0,078	0,393	0,425**	-0,148	-0,103	0,175	-0,295	0,011
Ca			0,035	0,196	-0,201	-0,131	0,295	-0,110	0,053
Mn				0,533**	-0,039	-0,127	0,404	-0,198	0,502 **
Fe					-0,109	-0,525	0,175	-0,131	0,158
Ni						0,222	-0,101	0,275	0,069
Cu							0,165	0,370	0,164
Zn								0,315	0,202
Cd									-0,205

\* Coeficiente de correlación válido al 99% de significancia

\*\* Coeficiente de correlación válido al 95% de significancia

(#) Se consideran 30 pares de elementos cada vez

## CONCLUSIONES

El conjunto de la información presentada permite concluir que:

- en Yelcho, los distintos sistemas tradicionales de recolección de partículas cuantifican de forma adecuada el contenido de aerosoles en el aire.
- las concentraciones promedio de polvo total menor de  $45 \mu\text{m}$ , del orden  $4,5 \pm 1,9 \mu\text{g m}^{-3}$ , son inferiores a las de la base Marsh en 1980 y entre 28 y 44 veces menores que el valor de la norma oficial en Chile ( $75 \mu\text{g m}^{-3}$  promedio anual y  $260 \mu\text{g m}^{-3}$  una vez al año), que en Santiago se supera habitualmente.
- el polvo  $<3 \mu\text{m}$  constituye casi la mitad del total del material particulado en suspensión y muy probablemente una parte de él proviene de fuentes localizadas a grandes distancias.
- casi un quinto del material particulado menor de  $3 \mu\text{m}$ , está constituido por partículas menores de  $1 \mu\text{m}$ .
- el Na tiene un origen claramente marino.
- el Mg y el Ca forman un grupo de elementos naturales con una fuente mixta aunque básicamente marina.
- El Fe, el Mn y el Al tienen su origen en la corteza terrestre descubierta de hielo durante el período de verano.
- el Cu y el Zn parecen tener un origen mixto natural y antrópico, dependiente del tamaño de la partícula considerada.
- el Ni, el Cd y el Pb tienen un origen claramente antrópico.
- las bajas concentraciones de aerosoles atmosféricos encontradas en Yelcho, tanto para polvo menor de  $45 \mu\text{m}$ , como para polvo menor de  $3 \mu\text{m}$ , así como sus bajos contenidos en elementos traza indican que esta sub-base chilena podría constituir un excelente sitio de referencia o nivel cero para material particulado.

En consecuencia, sería altamente recomendable instalar en Yelcho un sistema de monitoreo permanente de aerosoles atmosféricos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Dres. Rudolf Pueschel y Kenneth Snetsinger de NASA Ames Research Center por las facilidades otorgadas para el uso del microscopio electrónico, así como los comentarios realizados sobre los resultados obtenidos. A la Sra. Sunita Verma de TMA/Norcal, Richmond por su valiosa colaboración en la obtención de la microfotografía. Al Sr. Víctor Villanueva del INACH por su valiosa cooperación en la toma de muestras. A la Sra. Adriana Carrasco por sus acertados comentarios. Al INACH por el financiamiento al Proyecto 039, que hizo posible esta investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BODHAINE, B. A., 1989. South Pole aerosol measurements. *Antarct. Jour. US* 24 (5): 233-235.
- BOUTRON, C., M. LEBLERC y N. RISLER, 1984. Atmospheric trace elements in Antarctic prehistoric ice collected at the coastal ablation area. *Atm. Environ.*, 18: 1947-1953.

- BOUFRON, C. F. y E. W. WOLF, 1989. Heavy metals and sulfur emissions to the atmosphere from human activities in Antarctica. *Atm. Environ.*, 23 (8): 1669-1675.
- BROGAS, J. y E. PICCIOTTO, 1967. Nickel content of antarctic snow: Implications on the influx rate of extraterrestrial dust. *Geophys. J. Res.* 72: 2229-2236.
- CARRASCO, M. y M. PRÉDEZ, 1984. A method for total analysis of minor and trace elements in the soil clay fraction to atmospheric aerosols. *Bol. Soc. Chil. Quím.*, 29 (3): 299-307.
- CARRASCO, M. y M. PRÉDEZ, 1991. Element distribution of some soils of continental Chile and the Antarctic Peninsula. Projection to atmospheric pollution. *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58: 713-722.
- CAITELL, F. C. R. y W. D. SCOTT, 1978. Copper in aerosol particles produced by the ocean. *Science* 202: 429-430.
- DUCE, R. A., W. H. ZOLLER y J. L. MOYERS, 1973. Particulate and gaseous halogens in the antarctic atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 78: 7802-7811.
- DUCE, R. A., D. J. W. HOFFMAN y W. H. ZOLLER, 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: Pollution or natural? *Science*, 187: 59-61.
- FITZGERALD, J. W., 1991. Marine Aerosols: A review. *Atmos. Environ.* 25A: 533-545.
- GUANGHUA, ZHU, X. WANG, X. SHAN, Y. WU, J. ZHAO, Y. REN, L. WANG, P. LIU y G. LI, 1990. Study of atmospheric aerosol over Great Wall Station during Austral summer, 1987 *Antarctic Research* 2 (2): 44-50.
- HIGASHI, A., Y. FUJII, S. TAKAMATSU, R. WATANABE, 1990. SEM observations of microparticles in antarctic ice cores. *Bull. Glac. Res.*, 8: 31-53.
- ITO, T., 1983. "Study on properties and origins of aerosols particles in the Antarctic atmosphere". *Papers in Meteorology and Geophysics. Res.*, 34 (3): 216-219.
- IWASHIMA, K., M. FUJITA y T. ABIKO, 1977. "Distribution of Trace Elements around Syowa Station (I) Particulate Arsenic Content". *Antarctic Record* 59: 2-9.
- KANESHIMA, K. y N. YONAHARA, 1970. "Iron and Manganese Contents in Particulate Matter in Surface Water collected in the 8th. Japanese Antarctic Research Expedition 1966 - 1967". *Antarctic Record* 38: 1 - 7.
- LAMBERT, G., B. ARDOUIN, G. POLIAN y J. SANAK, 1989. Le plomb 210 dans les régions antarctiques et subantarctiques. Colloque sur la recherche française dans les Terres Australes (Kerguelen, Crozet, Saint-Paul et Amsterdam) et a partir des navires qui les desservent. Strasbourg, 14-17 Septembre, 1987. Comité National Français des Recherches Antarctiques. Págs.: 429-437.
- LEE JR., R. F. y S. S. GORANSON, 1972. a "National Air Surveillance Cascade Impactor Network. I. Size Distribution Measurements of suspended Particulate Matter in Air". *Environ. Sci. & Technol.* 6: 1019-1024.
- LEE JR., R. E., S. S. GORANSON, R. E. ENRIONE y G. B. MORGAN, 1972 b "National Air Surveillance Cascade Impactor Network. II Size Distribution Measurements of Trace Metals Components". *Environ. Sci. & Technol.* 6: 1025-1030.
- LIU, W. X., D. Y. GAO, M. X. WANG y L. REN, 1989. Chemical component of background aerosol at the Syowa base, China People's Republic. *Collection of Antarctic scientific explorations (Papers)*. Beijing Oceanic Publications Society 4: 113-115.
- MASON, B., 1966. *Principles of Geochemistry*. 3rd. Ed. J. Wiley & Sons, New York. p. 67 - 72.
- MA CIGUANG, L. MIN, Z. YONPING, L. HONGZHEN, Z. PEIRAN y R. MENGMEI, 1990. A study on the composition of atmospheric aerosols over the Great Wall Station. *Antarctic Research* 2 (2): 42-49.
- MAENHAUT, W., W. H. ZOLLER, R. A. DUCE y G. L. HOFFMAN, 1979. "Concentration and Size Distribution of Particulate Trace Elements in the South Polar Atmosphere". *J. Geophys. Res.* 84: 2421-2431.
- MICHEITI, I., A. PERINI y L. TESTA, 1991. Environmental impact of the Italian Antarctic Station Terra Nova Bay. *Antarctica Project. Environmental Impact. Chemical methodologies*. Reprinted from *Annali de Chimica* 81 (7-8): 579-587.
- MUROZUMI, M. M. J. CROW y C. PATTERSON, 1969. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33: 1247-1294.
- NAKAYA, S. M. NORISAYA, T. NOBUYA y T. TATSUYA, 1989. Chemical element concentration of aerosol in Dry Valleys Area, South Victoria Land, Antarctica. *Antarctic Record* 33(1).
- PALAS, J. M. y B. W. MOSIER, 1989. Elemental tracers of volcanic emissions in antarctic aerosol and snow samples. *Antarct. Jour. US.* 24 (5): 217-218.

- PRÉNDEZ, M. y S. ZOLEZZI, 1982. Composición elemental de aerosoles subantárticos en función del tamaño de partícula. *Ser. Cient. INACH* 29: 17-30.
- PRÉNDEZ, M., J. ORTÍZ, J. I. GARRIDO, R. HUERTA, C. ALVAREZ y S. ZOLEZZI, 1983. Une méthode simple pour le traitement des filtres employés dans l'étude des aérosols atmosphériques. *Radiochem. Radioanal. Letters* 56 (5): 291303.
- PRÉNDEZ, M., C. ALVAREZ y J. ORTÍZ, 1984. "Análisis de aerosoles atmosféricos de sitios suburbanos". *Abs. of Comm. XV Jornadas Chilenas de Química*. Págs.: 64-66.
- PRÉNDEZ, M., J. ORTÍZ, E. CORTÉZ y V. CASSORLA, 1984. Elemental composition of airborne particulate matter from Santiago city, Chile, 1976, *JAPCA* 34: 54-56.
- PRÉNDEZ, M., R. F. PUESCHEL, J. L. ORTÍZ, K. G. SNEITSINGER y S. VERMA, 1989. Subantarctic tropospheric aerosols: Size distribution and chemical composition. *Man and his Ecosystem, Proceed. 8th. Woclean*, Eds. L. J. Brassier, and W. C. Mulder, Amsterdam, 3: 545-550.
- PRÉNDEZ, M., J. L. ORTÍZ, S. R. ZOLEZZI, C. CAMPOS y N. APABLAZA, 1991. Aerosoles atmosféricos de naturaleza inorgánica. Contaminación en Santiago de Chile. *Rev. Chilena Enferm. Respirat.* 7 (4): 224-237.
- PSZENNY, A. A. P., A. J. CASTELLE, J. N. GALLOWAY y R. A. DUCE, 1989. Study of the sulfur cycle in the Antarctic marine boundary layer. *Jour. Geophys. Res.* 94 (D7): 9818-9830.
- RHAN, R. A., 1 July 1976. The chemical composition of the atmospheric aerosol. Technical Report. University.
- RODKE, L. F., 1982. Contribution of Mount Erebus to the Antarctic sulfate budget. *Antarc. Jour. US* 17 (5): 111-112.
- ROJAS, C. M., R. E. VAN GRIEKEN y M. E. CANTILLANO, 1992. Study of Antarctic Aerosol using X-ray Fluorescence and Single Particle Analysis. *Ser. Cient. INACH* 42: 37-45.
- SAMSON, J. A., 1990. On the systematic variation in surface aerosol concentration at the South Pole. *Atmospher. Res.* 25: 385-396.
- SHAW, G. E., 1983. X-ray spectrometry of polar aerosols. *Atmosph. Environ.* 17 (2): 329-339.
- SHAW, G. E., 1986. Size distribution of atmospheric aerosols at Ross Island. *Antarc. Jour. US* 21 (5): 241-242.
- SHAW, G. E., 1988. Antarctic aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 26 (1): 89-112.
- TUNCCEL, G., 1985. College Park, University of Maryland, 1985. University Microfilms orden 86-04232, PhD. Thesis.
- TUNCCEL, G., N. K. ARAS y W. H. ZOLLER, 1989. Temporary variations and sources of elements in the South Pole atmosphere. 1. Nonenriched and moderately enriched elements. *Jour. Geophys. Res.* 94 (D10): 13025-13038.
- WAGENBACH, D., U. GORLACH, K. MOSER y K. O. MUNNICH, 1988. Coastal Antarctic aerosol: The seasonal pattern of its chemical composition and radionuclide contents. *Tellus*, 40B (5): 426-436.
- WITOWSKI, R. E. W. A. CASSIDY y G. W. PENNEY, 1988. Design and deployment of an ESP atmospheric particle collector at the South Pole Clean Air Facility. *JAPCA*, 38 (9): 1168-1171.
- ZHAO, J., 1990. Modern Environmental Geochemical Characteristic in the Great Wall Station. *Antarctic Research* 2 (2): 11-12.
- ZOLLER, W. H. y W. C. CUNNINGHAM, 1980. Trends in the composition of atmospheric aerosols from South Pole Station, Antarctica. WMO publication 549, WMO Special Environmental Report 14.
- ZOLLER, W. H., E. S. GLADNEY y R. A. DUCE, 1974. Atmospheric concentration and sources of trace metals at the South Pole. *Science*, 183: 198-200.

Recibido: 11.01.93. Aprobado: 11.08.93.