

Potencial impacto de las emisiones volcánicas del Llaima y Villarrica sobre Temuco

Rivas, H., Rojas, N., Starck, N.

Julio 2004

Resumen

En este estudio se estima de forma exploratoria la influencia de las emisiones fumarólicas de óxidos de azufre de los volcanes Llaima (38°42'S 71°44'W, 3125 m.s.n.m.) y Villarrica(39°25'S 71°57'W, 2850 m.s.n.m.) sobre las concentraciones de dichos compuestos en la ciudad de Temuco. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el modelo de dispersión MATCH y campos meteorológicos HIRLAM. El análisis se centró en el comportamiento de las concentraciones de los óxidos de azufre en escenarios de verano e invierno.

La dispersión de las emisiones fumarólicas de óxidos de azufre está determinada tanto por condiciones sinópticas como por fenómenos locales, así los efectos sobre la ciudad de Temuco son diferenciados estacionalmente, resaltándose dichos efectos en el invierno, en cambio en verano los vientos en dirección al norte producen dispersión en dicha dirección, además la dispersión está afectada a cambios locales notándose la dispersión hacia el valle a finales del día.

1. Introducción

Temuco es una ciudad afectada por problemas de contaminación, principalmente asociados a la quema de leña (CONAMA IX). En 1998 se estudió la composición elemental del material particulado parcial y completamente respirable (Kavouras et al, 2000). De acuerdo a este estudio, se identifica en el material particulado observado en Temuco la influencia de una fuente externa a la ciudad que podría asociarse a actividad volcánica.

En efecto, la actividad volcánica es una fuente de aerosoles, particularmente de aerosoles sulfato. Los volcanes son edificios procedentes de la acumulación de productos sólidos alrededor de una boca eruptiva. Son formas estructurales originales añadidas al relieve preexistente(<http://www.angelfire.com/nt/volcanesdeChile/>).

Las emisiones volcánicas afectan el clima aportando gases y partículas aerosoles en la tropósfera. Además los aerosoles volcánicos, normalmente ricos en compuestos azufrados oxidados sirven como superficie para reacciones químicas heterogéneas que destruyen el ozono estratosférico, causando así una menor absorción de los rayos ultravioletas y reduce el calor radioactivo en la baja estratosfera(Robock, 2003).

Por otro lado los óxidos de azufre producen efectos negativos en algunas especies de la agricultura y la salud(García Huidobro, 1999). Se estima que el SO₂ alcanzan los 30 µg/m³ puede causar efectos nocivos importantes en muchos cultivos (García Huidobro, 1999). En altas concentraciones también ocasiona efectos sobre la salud, cuestión que ha llevado a los países a establecer reglamentos ambientales. En Chile según Norma de Calidad Primaria de Aire para Dióxido de Azufre (SO₂) de la CONAMA, las concentraciones de SO₂ deben ser inferiores a 96 PPBv (promedio diario).

Visto los efectos mencionados antes y los antecedentes citados en el párrafo anterior, en este estudio quisimos cuantificar dicha potencial contribución volcánica.

En este trabajo se simulará la dispersión del azufre oxidado, tanto dióxido de azufre como sulfato, de las emisiones fumarólicas del Volcán Llaima y del Volcán Villarrica, y así estudiar la influencia de las emisiones fumarólicas de óxidos de azufre sobre las concentraciones de dichos compuestos en la ciudad de Temuco y otras localidades. En otras palabras, el principal objetivo de este estudio es, en forma exploratoria, cuantificar y caracterizar las emisiones volcánicas fumarólicas del Volcán Llaima y Villarrica, y así estudiar los efectos de las emisiones de óxidos de azufre sobre los núcleos poblados, en especial de la ciudad de Temuco.

El trabajo se ha organizado de la siguiente forma: En la próxima sección se describirá en términos generales la actividad volcánica de la Novena Región de la Araucanía caracterizándose los volcanes Llaima y Villarrica. Luego, en la Sección 3, se hace una descripción de la zona de estudio con énfasis en la climatología de la zona. La Sección 4 describe el modelo de dispersión utilizado y su configuración. Luego se presentan los resultados (Sección 5) y finalmente se presentan las conclusiones y algunas perspectivas sobre trabajo futuro.

2. *Actividad volcánica en la Región de la Araucanía*

a) Erupciones Volcánicas

Las erupciones volcánicas se producen cuando el magma alcanza la superficie, generándose así una ase explosiva que conlleva emisiones violentas de gases y otras sustancias a elevadas temperaturas y velocidades, además de lava a través de fisuras. Cuando cesa la fase efusiva del magma continúa la desgasificación residual interna hasta el total enfriamiento de la chimenea y conductos superficiales, lo cual se manifiesta en una etapa de actividad fumarólica que puede tener una vida variable en el tiempo entre unos pocos meses a varios años, dependiendo si se trata de erupciones monogenéticas o poligenéticas. La persistencia de una anomalía térmica y la presencia de acuíferos favorables permiten el desarrollo de fuentes termales y campos de géisers.

b) Productos de las emisiones

Una división de los productos volcánicos permite distinguir la fracción volátil o gases, segregado del magma, y la fracción lávica, que es un líquido con gases disueltos. El material lávico se desgasifica, enfría y consolida en contacto con la atmósfera, dando lugar a las rocas volcánicas, las que se dividen en fragmentarias o piroclásticas y masivas o coladas lávicas y domos. Los gases tienen un rol vital tanto en la generación y deformación del magma, como en la regulación de su ascenso y los mecanismos explosivos de las erupciones.

c) Composición química de los gases volcánicos

La composición de los gases volcánicos en el cráter es, en general, controlado por un equilibrio entre un fluido líquido arriba y el derretimiento del magma silicoso en la cámara inferior. Esta composición varía y depende del tipo de magma y de la actividad actual de cada volcán. A continuación se presenta una tabla con los valores típicos que tienen estas emisiones:

Species	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	H ₂ S	COS	CS ₂	HCl	HBr	HF
%/vol	50-90	1-40	1-25	1-10	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	1-10	?	< 10 ⁻³
Tg/year	?	75	1.5- 50	1-2.8	0.006- 0.1	0.007- 0.096	0.4- 11	0.0078- 0.1	0.06-6

Tabla: Composición característica de los gases volcánicos en el cráter. (e.g., Symonds et al. 1988, Cadle 1980, Symonds et al. 1994, and Chin and Davis 1993)

Como se puede apreciar, el mayor componente de los gases es el H₂O, el cual contribuye entre un 50 y un 90% de las emisiones, sin embargo su contribución al inventario de emisiones global de H₂O es prácticamente despreciable. El segundo gas en importancia es el CO₂, el cual varía entre 1-40% de las emisiones en volumen. Aunque este es un gas de efecto invernadero, las emisiones volcánicas contribuyen con menos del 1% anual de las emisiones totales de CO₂. Incluso las emisiones de este gas de carácter antropogénico son 100 veces superiores, que las emisiones naturales de la Tierra.

Los gases de sulfuro contribuyen típicamente entre un 2-35% del volumen de las emisiones totales y es de las especies más relevantes en lo concerniente a impactos climáticos producidos por los eventos volcánicos. El componente dominante de las especies sulfuradas es dióxido de sulfuro (SO₂), cuyas emisiones anuales oscilan entre las 1,5 a las 50 Tg de SO₂. La segunda S-especie importante es el Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), que es observado solamente por muestreo directo. A menudo es coemitido y convertido posteriormente en SO₂ en la atmósfera (e.g., Bluth et al. 1995). La fracción del H₂S aumenta con el aumento de la presión (es decir, profundidad del compartimiento del magma) y con la disminución de la temperatura y de la concentración de oxígeno del magma (Gerlach et al. 1986). Otras especies del sulfuro agregan porciones de menor importancia. Entre los más destacados se encuentran el Carbonyl Sulfuro (COS) y su precursor Carbón Disulfuro (CS₂). El COS es importante porque tiene un tiempo de residencia atmosférico de varios años y producto de su alta estabilidad es una importante fuente de la capa de aerosoles en la estratosfera. Sin embargo los volcanes contribuyen con menos del 1% de las emisiones totales de COS.

El principal componente halogenado de las emisiones volcánicas es cloruro de hidrógeno (HCl), con 1-10 %/vol (Symonds et al. 1988). La contribución volcánica a la cantidad total de emisiones es aproximadamente igual a las emisiones antropogénicas, pero las emisiones de los océanos son varias órdenes de magnitud superior. El HCl es altamente soluble y por lo tanto se lava rápidamente fuera de la atmósfera. Por lo tanto, las erupciones pequeñas y el degassing silencioso no serán de importancia para la composición atmosférica.

d) Emisiones volcánicas de azufre en la troposfera y su impacto

Los volcanes contribuyen con aproximadamente el 36% de la carga de azufre en la troposfera, la mayoría de este en la forma de SO₂ (El H₂S emitido es rápidamente oxidado en SO₂ en aproximadamente 2 días, por lo que puede descartarse un análisis de este gas). El SO₂ en la troposfera es transformado en sulfato por reacciones químicas (promovido por la presencia de lluvias) y removido en unos pocos días por deposiciones secas y húmedas. Sin embargo si el clima presenta condiciones de extrema sequedad puede permanecer mucho más tiempo, más aún si alcanza concentraciones troposféricas altas.

Los aerosoles de sulfato en la atmósfera tienen efectos radiativos que alteran el equilibrio de la radiación de la tierra (e.g., Franklin 1784; Charlson et al. 1991, 1992). Mientras que su profundidad óptica es más alta en longitudes de onda visibles y el efecto neto en general es de enfriamiento, los aerosoles del sulfato también absorben y emiten en la onda larga, calentando la capa donde están y aumentando el flujo hacia la superficie (para una revisión ver Robock 2000).

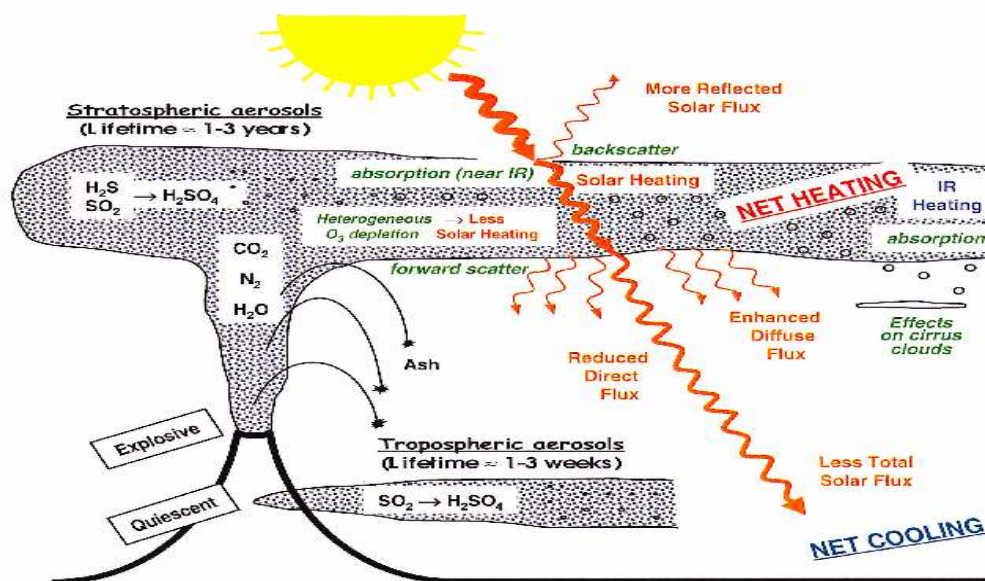
Los aerosoles del sulfato en la troposfera actúan como núcleos de la condensación de la nube y modifican las características radiativas y el curso de la vida de las nubes (indirectas, o efecto Twomey) (Twomey 1974). El aumento del número de las gotitas de la nube debido a un incremento de los núcleos de condensación aumenta el albedo de las nubes, realzando el enfriamiento superficial. Esto también puede conducir a cambios en las tasas de precipitación o a la supresión de la lluvia en nubes convectivas profundas, cambiando así la distribución espacial y temporal de la liberación del calor latente. Esto podría tener un efecto significativo en la circulación global, como fue demostrado para los aerosoles en general por Nöber et al. (2002).

Los volcanes activos alcanzan, en general, alturas considerables y la mayoría de sus emisiones, incluso en emisiones fumarólicas, se inyectan en la troposfera libre, por sobre la capa límite. A esta altura, los procesos de deposición son más lentos y el sulfuro volcánico tiene tiempos de residencia atmosféricos más largos que el sulfuro antropogénico emitido en elevaciones más bajas. En lo principal, el sulfuro volcánico domina la concentración del sulfato en la troposfera media y superior mientras que las emisiones antropogénicas controlan la capa límite (Graf et al. 1998).

La siguiente tabla muestra el presupuesto global del sulfuro y el efecto radiativo de diversas fuentes del sulfuro tomadas de Graf et al. (1997), que utilizaron un modelo particular del clima para sus cálculos. Los volcanes contribuyen cerca de 4.5 veces menos a las emisiones globales de sulfuro que las emisiones antropogénicas, pero la carga atmosférica de SO₂ es solamente 1,3 veces menos que las emisiones antropogénicas. Por lo tanto, debido al mayor tiempo de residencia de sus emisiones, los volcanes tienen un efecto radiativo relativo mucho más alto en el clima global.

Source	Sulfur emission [%]	SO ₂ burden [%]	SO ₄ ²⁻ burden [%]	Efficiency	Direct TOA forcing [%]
Anthropogenic	65.6	46.1	37.1	0.56	40
Biomass Burning	2.5	1.2	1.6	0.64	2
Dimethyl sulfide (DMS), mainly from oceans	18.2	17.8	25.3	1.39	26
Volcanoes	13.7	34.9	36.0	2.63	33

A continuación se presenta un esquema de comportamiento de los gases volcánicos.



e) Antecedentes del estudio

La Novena Región de la Araucanía cubre un área de 31.858,4 km², levemente superior a la de Bélgica, para albergar (según Censo 1992 y sus proyecciones) a 781.242 habitantes, equivalentes al 5,9% de la población total nacional. Su capital regional es Temuco y está conformada por las provincias de Malleco y de Cautín. Sus principales ciudades son Temuco, distante 673 kilómetros desde Santiago, y Angol, a una distancia de 581 kilómetros desde la capital del país.

Al igual que en el resto del país, la Región presenta La Cordillera de los Andes como su barrera oriental, la cual alcanza alturas promedio de unos 2500m. Al Oeste de esta se encuentra el Valle Transversal, el cual termina en la Cordillera de la Costa, o Cordillera de Nahuelbuta, que también actúa como biombo climático para la región.

En la región hay un franco predominio de los climas templado lluviosos (www.araucaniatemuco.cl). Una de sus características es que durante el año no presenta estación seca, aun cuando en época estival las precipitaciones son considerablemente menores. La amplitud térmica se acentúa hacia el interior de la región, y es frecuente que haya heladas durante el periodo de invierno. Precipitaciones anuales superiores a 1000mm.

Sobre las condiciones sinópticas operantes en la zona se puede decir que en Verano predominan, a nivel de superficie, los vientos Oeste y Sur, este último producto de la entrada de la vaguada costera en el interior del país, lo cual se produce por el desplazamiento hacia el Norte que sufre el anticiclón del Pacífico. A esto hay que sumar los efectos de Viento de Valles, los cuales ascienden en el día y descienden durante la noche.

Durante el Invierno predomina el efecto de los vientos Oeste, los cuales, tanto en el invierno como en el verano, están soplando constantemente desde la costa. Además, por la presencia de la Cordillera de Los Andes, estos vientos Oeste muchas veces tienden a

ser desviados hacia la dirección Norte, por lo que también se producirían vientos en esta dirección.

Por último vale mencionar que la entrada de cualquier frente provocará influencias en las condiciones de la zona desde la dirección Oeste.

El Puelche es el nombre que se da a un tipo de viento que sopla desde la Cordillera hacia el mar (Este a Oeste) en la zona comprendida desde la VIII Región al sur. En este sector y, en general, en la región más austral de Sudamérica el viento tiene casi siempre una componente hacia el Este, sin embargo, determinadas condiciones del campo de presión (por ejemplo un lento desplazamiento de un centro de alta presión en el extremo sur del continente) favorece el flujo en sentido inverso, desde Argentina hacia Chile, el cual se canaliza en los valles orientados con dirección E-W (este-oeste). Es un viento seco, que ocasionalmente alcanza una gran intensidad. Puede presentarse en cualquier época del año. En promedio la intensidad del viento Puelche es mayor durante la noche, cuando se suma a la brisa que normalmente sopla valle abajo a esas horas. Por el contrario, el viento pierde fuerza en horas de la tarde debido a que la cordillera favorece un flujo de aire valle arriba durante el día. Generalmente este viento se presenta con una frecuencia que varía entre los 7 y 10 días.

3) *Simulaciones de la dispersión del azufre oxidado emitido por los volcanes Llaima y Villarrica*

El modelo dispersión utilizado corresponde al modelo MATCH (Robertson *et al.*, 1999). Este es un modelo Euleriano, tridimensional “off-line” desarrollado por especialistas de SMHI (Robertson *et al.*, 1999). Es decir, es una implementación computacional que resuelve la ecuación de continuidad para cada grilla sobre todo el dominio de integración (Euleriano) y recibe los campos meteorológicos desde una fuente externa (off-line).

El diseño del modelo es flexible respecto a su resolución tanto vertical como horizontal, siendo definida esta resolución principalmente por la información meteorológica de entrada. El modelo está escrito en coordenadas horizontales que pueden ser geométricas (kilómetros respecto a algún punto) o geográficas (latitud – longitud). La coordenada vertical utilizada es descrita en términos de una variable η que es una combinación lineal de la presión en cada nivel ya la razón entre la presión de cada nivel y la superficie (coordenada σ).

Respecto a la integración en el tiempo se tiene que está basada en las siguientes ecuaciones:

$$q^* = q^n + A_Q$$

$$q^{n+1} = A_{CH} \cdot (A_u + A_v + A_w) \cdot A_D \cdot A_W \cdot A_T \cdot q^*$$

donde

q : Razón de mezcla del compuesto. Esta es la cantidad del compuesto en un instante determinado.

Y A denota los operadores para los procesos que modifican q :

A_Q : Operador de Emisiones. Corresponde a la suma de los flujos correspondientes a las diferentes fuentes emisoras tanto como antrópicas, dependiendo de la información disponible.

A_{CH} : Operador de transformaciones químicas. Aquí se agrupan todas las reacciones químicas que experimenta una traza particular.

$(A_u + A_v + A_w)$: Operador de Transporte debido a advección. Transporte debido al flujo promedio del fluido, de acuerdo al esquema de Reynolds para la descripción de la ecuación de3 continuidad (Bird *et al.*, 1960).

A_T : Operador de trasporte debido a flujos turbulentos. A partir de esquema de Reynolds para la descripción de la ecuación de continuidad, este término da cuenta de los trasportes que no son producto del movimiento promedio del flujo (Bird *et al.*, 1960). Se debe tomar en cuenta que estos fenómenos son relevante sólo en la dirección vertical y por lo tanto despreciados en la componente horizontal.

A_D : Flujo de deposición seca. Corresponde al flujo de sumidero hacia la superficie en ausencia de precipitación.

A_w : Flujo de deposición húmeda. Este flujo corresponde al transporte hacia la superficie en la cual la especie es incorporada primero a la lluvia o nieve y posteriormente llevada a la superficie.

$n, n+1$: Índice de tiempo. Corresponde al tiempo actual (n) y al intervalo siguiente ($n+1$) en el esquema de integración del modelo.

a) Modelación de las emisiones de los Volcanes Llaima y Villarrica

Para la modelación de las emisiones se utilizó el modelo MATCH, el cual se encarga de modelar la dispersión del contaminante elegido (en este caso azufre oxidado en forma de dióxido de azufre y sulfato).

MATCH fue alimentado con salidas de un modelo numérico del tiempo. Estos corresponden a interpolaciones dinámicas de campos de reanálisis del Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo de Mediano Alcance (European Center for Medium Range Weather Forecast, ECMWF), usando la metodología descrita por Räisänen et al (2001). Estos campos fueron calculados por especialistas del Instituto de Hidrología y Meteorología de Suecia (SMHI) con el fin de proveer campos meteorológicos para el estudio de la dispersión regional de azufre oxidado y arsénico en Chile norte y central, en el contexto de proyectos desarrollados entre SMHI y la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA entre los años 1998 y 2000 (e.g., Gallardo et al, 2000; Gidhagen et al, 2000; Gallardo et al, 2002; Gidhagen et al, 2002; Olivares et al, 2002). Estos proyectos entregaron una serie de conjuntos de datos meteorológicos validados que cubren varias condiciones meteorológicas típicas de Chile central y norte, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña, con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial en la horizontal de 11 km que puede ser usado en una variedad de aplicaciones.

Las emisiones volcánicas, por su parte, se estimaron de datos encontrados en Witter *et al.*(2001), en el que se dicta un valor de emisiones fumarólicas del Volcán Villarrica. Para estimar las emisiones del Volcán Llaima se consultó al Sr. Jorge Clavero (comunicación personal), quien entregó una razón entre las emisiones de ambos volcanes, la cual estima que las emisiones fumarólicas del Volcán Llaima corresponden a aproximadamente un 60% de las emisiones fumarólicas del Volcán Villarrica.

Otros datos relevantes de la modelación son los siguientes:

Características Modelación		
Periodo datos de salida	1	[hora]
Variables de salida	Presión Sup.	[hPa]
	Temperatura	[°K]
	Concentración	[ug/m3]
	Razón de mezcla	PPB
	Viento U	
	Viento V	
	Viento W	
	Deposición total	[ug/m2]
Nº niveles atmosféricos	31	
Diámetro chimeneas		
Volcán Llama	350	[m]
Volcán Villarrica	200	[m]
% emisiones de sulfuro como SO2	95	%
% emisiones de sulfuro como SO4	5	%
Emisiones de sulfuro volcán Llama	3362+/-1900	[gr/seg]
Emisiones de sulfuro volcán Villarrica	5604+/- 3167	[gr/seg]

Los parámetros elegidos para caracterizar de la deposición son:

Velocidad de deposición seca tierra(amplitud) [m/seg]	0.008
Velocidad de deposición seca tierra(minima) [m/seg]	0.003
Velocidad de deposición seca mar [m/seg]	0.0005

La resolución espacial utilizada es 0.1° x 0.1°, mientras la resolución temporal es 1hr.

Una vez que se conoce todo esto se corrió el modelo entre las siguientes fechas:

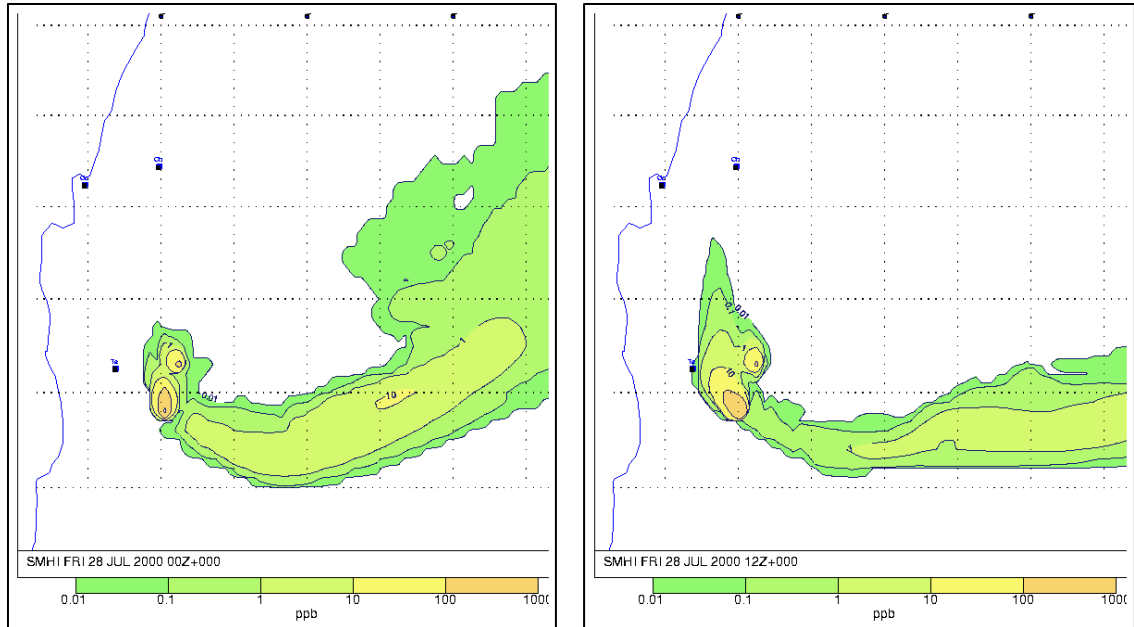
Enero 2000: Desde 20 Enero a las 00:00hrs UTM hasta 23 Enero a las 00:00hrs UTM.

Julio 2000: Desde 25 Julio a las 00:00hrs UTM hasta 31 Julio a las 00:00hrs UTM.

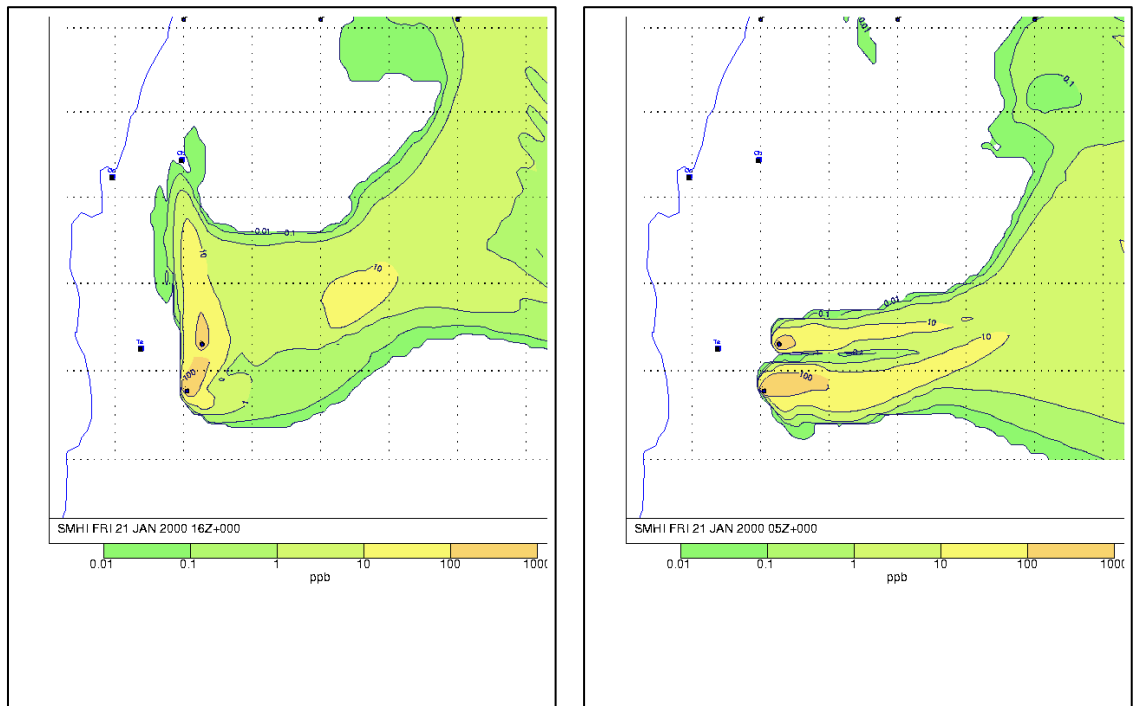
4. Resultados

a) Patrones de dispersión según distribución de la carga

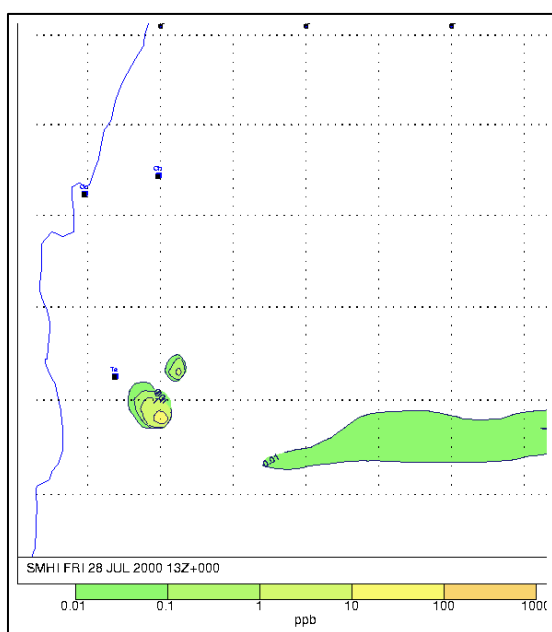
Para la obtención de estos resultados se sumó los valores de cada uno de los 31 niveles obtenidos del modelo de dispersión, para luego ser graficándose obteniéndose lo siguiente:



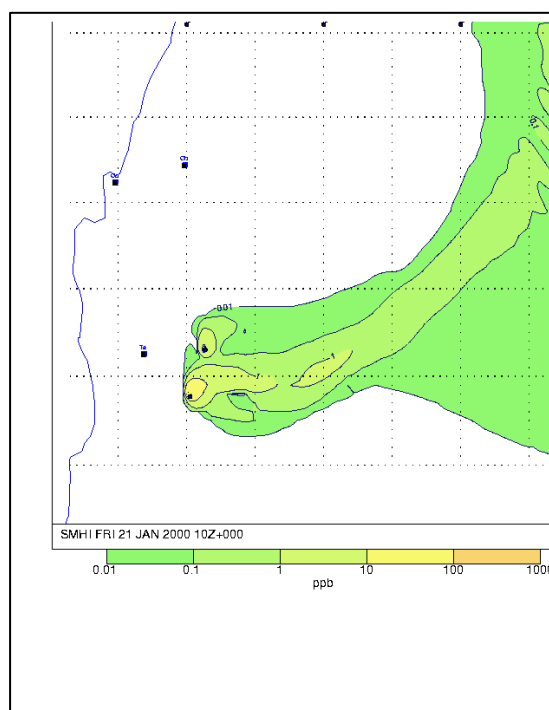
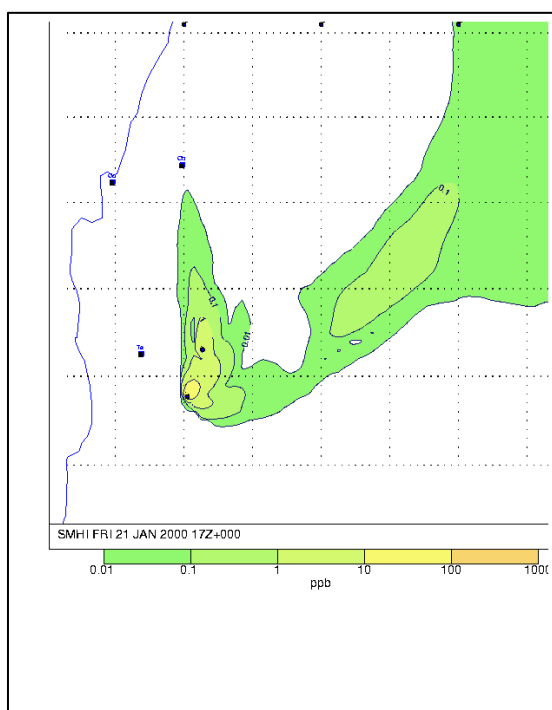
Patrones de dispersión SO₂, 28 julio 2000.



Patrones de dispersión SO₂, 21 Enero 2000.

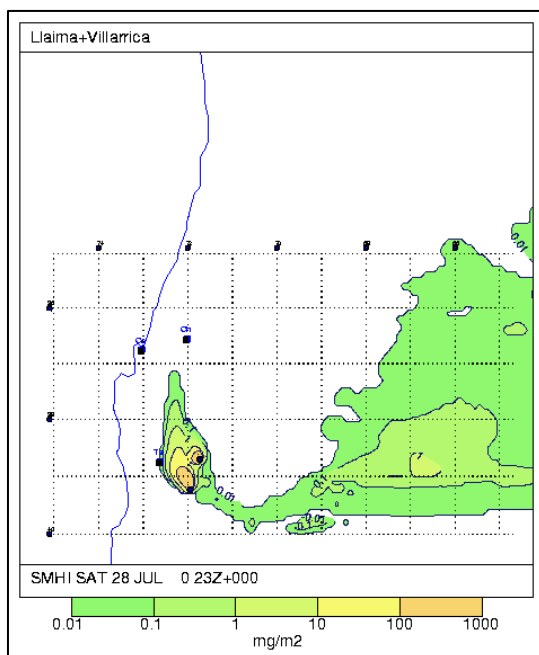


Patrones de dispersión SO_4 , 28 Julio 2000.

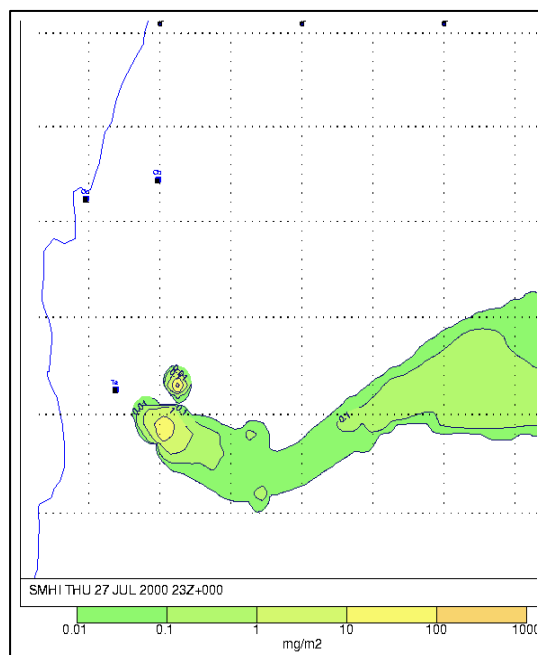


Patrones de dispersión SO_4 , 21 Enero 2000.

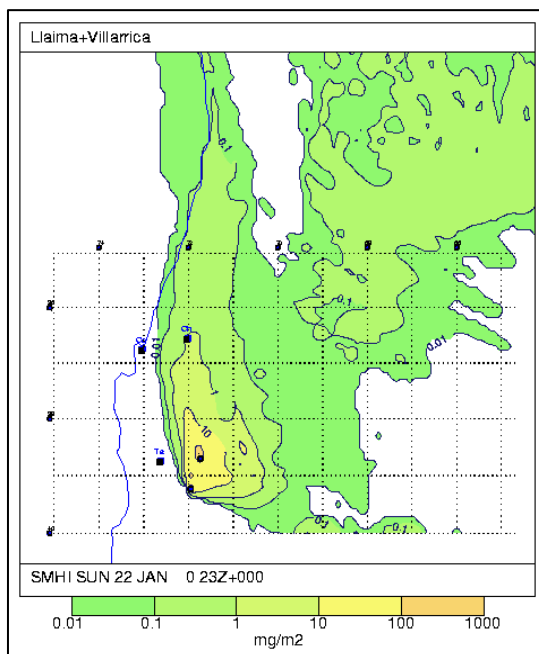
b) Deposición



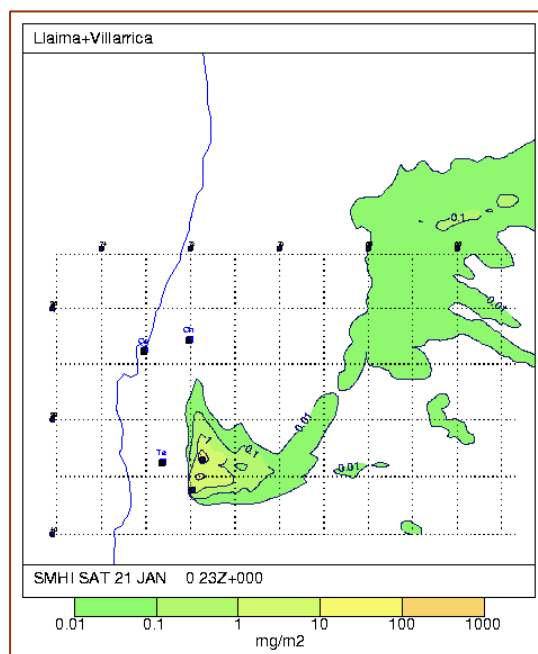
Deposición SO_2 (28 julio 23 hr UTC)



Deposición SO_4 (27 julio 23 hr UTC)



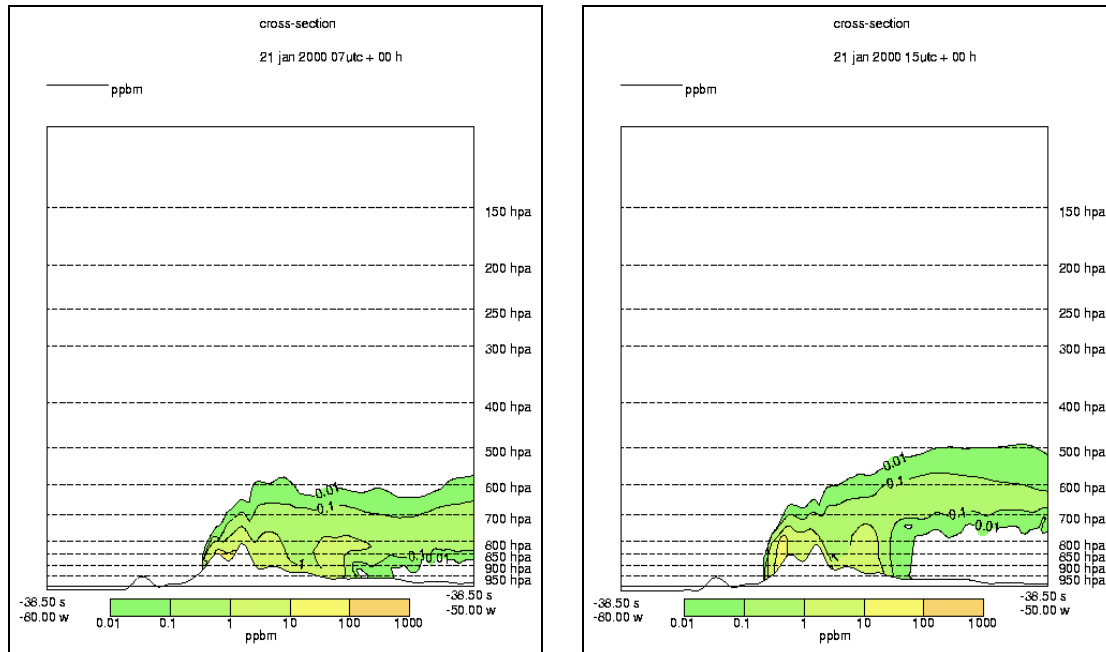
Deposición SO_2 (22 enero 23 hr UTC)



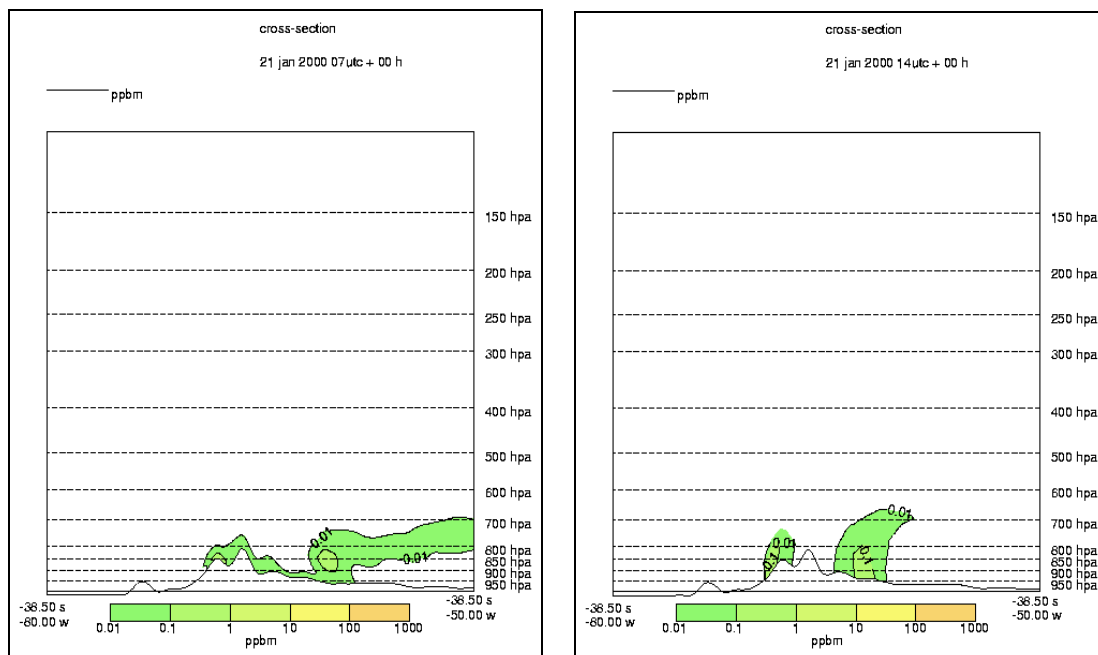
Deposición SO_4 (21 enero 23 hr UTC)

c) Perfiles Verticales

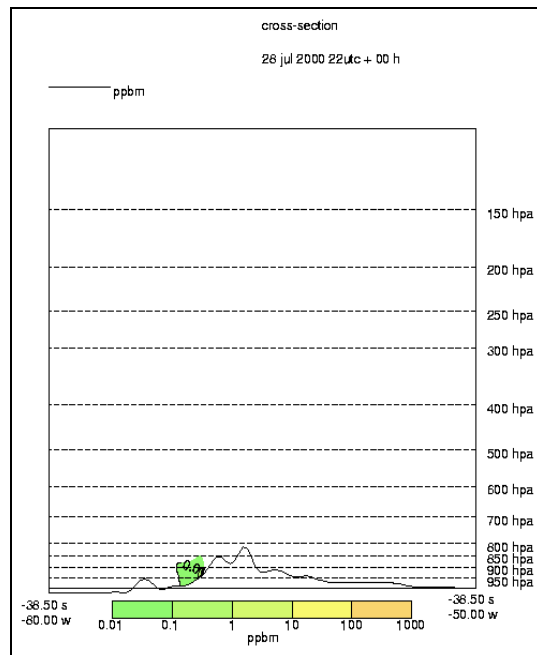
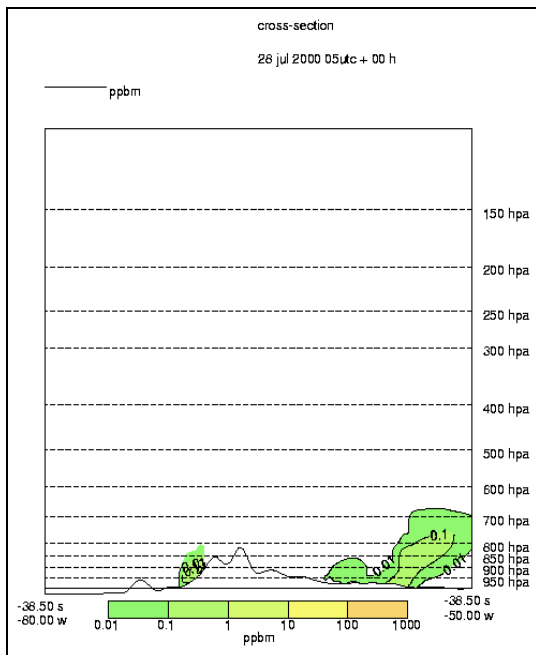
Para la obtención de estos resultados hizo un corte vertical a los 38.5° de Latitud sur, valor que se mantuvo constante y entre los -50° y -80° de Longitud, para luego ser graficados los resultados obtenidos en el modelo de dispersión, obteniéndose lo siguiente:



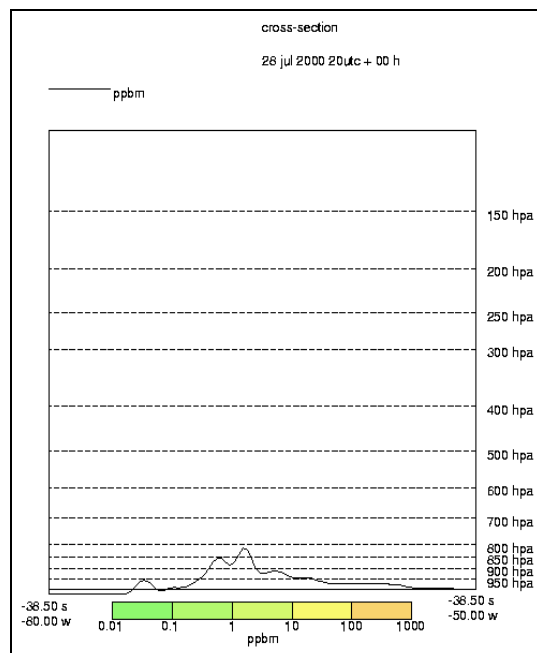
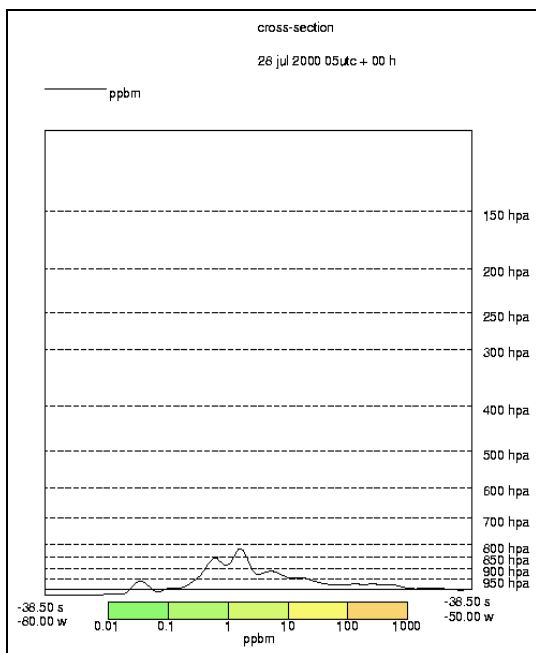
Patrones de dispersión SO₂, 21 Enero 2000.



Patrones de dispersión SO₄ 21 Enero 2000.



Patrones de dispersión SO_2 , 28 Julio 2000.



Patrones de dispersión SO_4 , 28 Julio 2000.

5. Conclusiones

Luego de revisar los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- El transporte del azufre oxidado está claramente influenciado por las condiciones de viento de la zona, los cuales hacen sentir su efecto, tanto en las concentraciones como en la deposición que experimenta este. De hecho, al revisar los resultados de concentraciones en la primera capa, es decir, a nivel superficial, se puede apreciar la influencia de los vientos locales sobre la dispersión del contaminante, ya que este es trasladado en diversas direcciones, rompiendo un poco con el esquema de las sinópticas, todo esto independiente del periodo de los meses en estudio en que uno se encuentre.
- A pesar de lo anterior, es evidente un efecto de las condiciones sinópticas a diversas alturas. De hecho al observar los cortes verticales se puede apreciar que la mayoría del azufre es transportado hacia territorio argentino siguiendo la dirección de vientos oeste. Además en verano se hace sentir el corrimiento de la alta del Pacífico, la que transporta hacia el interior las vaguadas costeras y dispersa el contaminante hacia el Norte a través del Valle Transversal. En invierno, cuando se producen vientos desde el Norte, se aprecia la dispersión de los contaminantes en esa dirección.
- La deposición alcanza a afectar a parte del territorio nacional, aunque en bajas cantidades, llegando a ciudades como Temuco o Chillán, y ciudades intermedias entre estas. Este fenómeno, sin embargo, se produce en forma estacional, por lo que la presencia de este contaminante, de origen volcánico, en estas ciudades debiera ser intermitente.
- Este fenómeno, como se dijo antes, se puede deber a la influencia de vientos locales, como son el viento Puelche y el Viento de Valles. El primero tiene dirección Este, con fuerza en las noches. El Viento de los Valles, en cambio, de día tiende a hacer que los contaminantes vayan hacia las partes altas del valle, es decir, hacia el Este y de noche se atenúa este efecto, produciéndose incluso un viento descendente que conduciría la pluma de contaminantes hacia el Oeste.
- Además se aprecia claramente que el hecho de que los volcanes Villarrica y Llaima se encuentren tan cerca, potencia el efecto de sus emisiones, ya que ambos forman una gran fumarola en permanente emisión. De todas maneras se pueden caracterizar ambas emisiones por separado, notándose que las emisiones del Volcán Llaima poseen un efecto menor y más localizado, concentrándose alrededor de su chimenea, en cambio los efectos del Volcán Villarrica son mayores y se suelen dispersar más fácilmente que los del volcán Llaima, ya que sus emisiones, al parecer, pueden circular con mayor facilidad y suelen ser arrastradas por los vientos Oeste.
- Con respecto a los valores de las concentraciones de óxidos de azufre encontrados sobre Temuco se puede decir que estos, en general, varían entre los $0,1-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Concentraciones que son importantes, sin embargo como se dijo anteriormente, sólo son estacionales, producto de los vientos de Valle y el viento Puelche, lo cual dejaría un promedio de concentración un orden de magnitud

inferior, es decir entre los 0,01-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Eso sí es importante mencionar que los valores de las fuentes son bastante imprecisos, por lo que no se puede catalogar este valor, como algo 100% efectivo hasta caracterizar en buena forma las emisiones volcánicas. Lo mismo sucede para los valores de deposición y razón de mezcla (PPB).

- De todas maneras lo anterior respondería a la incógnita de la concentración de este contaminante encontrado en forma inusual en la ciudad de Temuco, viendo que estos tienen alta probabilidad de ser de origen volcánico.
- Un dato sorprendente de este estudio es que otras ciudades del Valle Central, como Chillán, se ven afectadas por esta contaminación, de hecho las concentraciones en esta ciudad son bastante altas, especialmente en verano debido a los vientos Sur. Esto puede traer consecuencias a la salud y a la agricultura, ya que son valores bastante elevados.
- Por último y como respuesta a todo lo encontrado en este estudio se recomienda una urgente caracterización, cuantificación y control de las emisiones fumarólicas de los Volcanes Llaima y Villarrica (especialmente este último), ya que sus emisiones y su influencia sobre el territorio nacional no parecen despreciables y alcanzan dos importantes centros poblados como son Temuco y Chillán, los cuales ya poseen sus propias fuentes de contaminación de Sulfuro, por lo que la suma de ambas puede traer importantes efectos en la salud de la población y en el desarrollo de la agricultura.

Referencias

- Robock, A. (2003), Volcanoes/Role in Climate. Elsevier Science Ltd. 2003.
- Volcanes de Chile.
- T. García Huidobro, A risk assesment of potencial crop losses due to air pollution in the Central Regions of Chile. 1999
- <http://www.angelfire.com/nt/volcanesdeChile/>
- www.conama.cl
- Witter, J.; Kress, V.; Delmelle, P.; Hersum, T. 2001. Acid gas emissions measured by COSPEC, volatile trap, and filter pack at Volcan Villarrica, South Chile. Eos. Trans. AGU, 82(47), Fall Meet. Suppl., Abstract V42B-1012.
- Jorge Clavero (comunicación personal).
- Dispersión Regional de azufre en Chile Central. Gustavo Olivares. 2001.