



ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LA DEPOSICIÓN HISTÓRICA (1900-2000) DE AZUFRE OXIDADO DE ORIGEN ANTRÓPICO EN CHILE CENTRAL: ¿APOYO A LA INTERPRETACIÓN DE DATOS GLACIOLÓGICOS?

AMIGO, A.^{1,2}, GALLARDO, L.² y GÓMEZ, L.²

¹Departamento de Geología, Universidad de Chile. E-mail: aamigo@ing.uchile.cl

²Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile. E-mail: lgallard@dim.uchile.cl, lgomez@dim.uchile.cl

INTRODUCCIÓN

Chile tiene una larga tradición en la explotación de recursos minerales, especialmente cobre. Como subproducto de esta minería, se generan emisiones de azufre oxidado (SO_x) y arsénico (As). Como muestra la Figura 1, las estimaciones disponibles indican una variación significativa a lo largo del tiempo, destacándose una marcada disminución de dichas emisiones en la última década del siglo XX. En efecto, las emisiones antes referidas han dado lugar a varios problemas ambientales que han suscitado la atención de la sociedad, las autoridades y de la propia industria minera. Todo esto ha conllevado al establecimiento de normas ambientales cada vez más estrictas, redes de monitoreo y planes de descontaminación. Con todo, las emisiones de azufre oxidado provenientes de las fundiciones de cobre se han reducido, a través de la instalación de plantas de ácido, cambios tecnológicos y otras medidas, desde 0.82 [TgS/año]¹ en 1993 a 0.43 [TgS/año] en 2000. No obstante, estas emisiones siguen siendo significativas: para el año 2000 correspondían aproximadamente a un 70% de las emisiones nacionales (CONAMA, 1999), un 30% de las emisiones de Sudamérica y a un 1% del azufre oxidado de origen antrópico emitido mundialmente. Dado lo anterior, es evidente que las fuentes asociadas a la gran minería han generado emisiones y una deposición histórica significativa por períodos que abarcan varias décadas en zonas influenciadas por estas fuentes, vale decir, predominantemente en Chile central y norte, donde se concentra la actividad minera.

Las tasas de deposición de una traza dependen de las características fisicoquímicas de la misma (tamaño, reactividad, solubilidad, etc.), de las características de la superficie sobre la que ocurre la deposición (rugosidad, afinidad química y biológica, etc.) y de las condiciones meteorológicas (presencia de nubosidad, tasas y frecuencia de precipitación, turbulencia y estabilidad, etc.). Una forma de estimar las deposiciones es a través de un modelo capaz de representar los procesos de emisiones, dispersión y remoción a escala regional, alimentado con campos meteorológicos representativos de Chile central. Para esto se utilizaron campos meteorológicos interpolados dinámicamente a una resolución regional de 0.1° de paso horizontal a partir de los

¹ 1 Tg = 10¹² g = 1 M ton.

campos de re-análisis globales del centro europeo de pronóstico (Gallardo et al, 2002; Gidhagen et al, 2002). Los campos meteorológicos son promediados ponderadamente de modo de construir un año sintético que de cuenta de la variabilidad estacional e interanual característica de Chile central. La distribución de contenido y deposición de azufre oxidado es estimada según los escenarios históricos de emisión disponibles y verificados según datos pirometalúrgicos. De esta manera se estima la deposición de azufre, poniendo especial énfasis en los patrones de deposición y su evolución temporal, así como en las tasas de deposición ocurridas en el glaciar de Cerro El Plomo (5300 m, 33°14'S, 70°13'W) en la Región Metropolitana, de modo de entregar una estimación que pudiera ser útil a la interpretación de las mediciones de tasas de deposición en testigos de hielo que se realicen en esta zona (M. Schwikowski, comunicación personal).

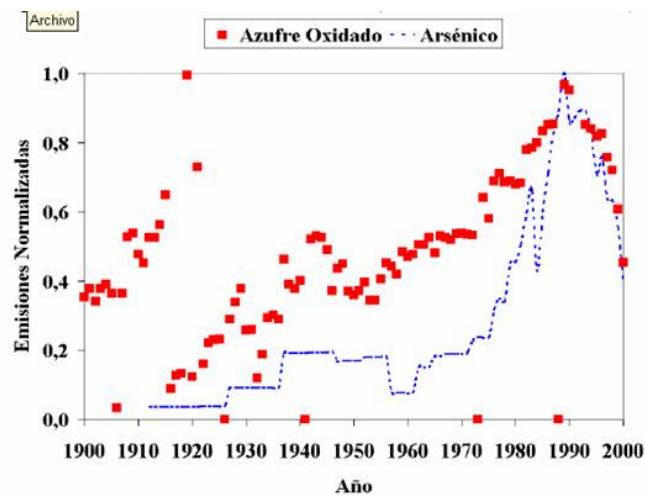


Figura 1. Emisiones de azufre oxidado (Lefohn et al., 1999; CONAMA, 2001) y arsénico (Gidhagen et al, 2002) de las fundiciones mineras durante el siglo XX. Las emisiones están normalizadas por la emisión máxima del período.

EMISIONES DE ORIGEN ANTROPICO

La producción de cobre y la emisión de azufre están íntimamente ligadas puesto que en los yacimientos de cobre generalmente existe presencia de minerales con compuestos de azufre (e.g. sulfuros) que poseen una ley de cobre económicamente rentable, razón por la que son explotados. Esta relación se observa en la Figura 2 donde se contrasta la producción total de cobre del país, el cobre producido mediante procesos pirometalúrgicos (información obtenida de anuarios Cochilco) y la emisión de azufre asociada a la minería (Lefohn et al. 1999). Cabe hacer notar que durante la última década, debido a mejoras ambientales y nueva tecnología usada en fundiciones mineras, se ha logrado aumentar la producción sin aumentar las emisiones de azufre. Las emisiones antrópicas no relacionadas con minería se asocian principalmente con la combustión de combustibles fósiles, provenientes de centros urbano-industriales (Figura 3). Estas emisiones son un orden de magnitud inferior que las relacionadas a la minería. En particular, para el caso de Chile central (regiones V, VI y Metropolitana), las emisiones de azufre de origen antrópico no relacionadas a minería, sólo representan el 3% (Olivares, 2001).

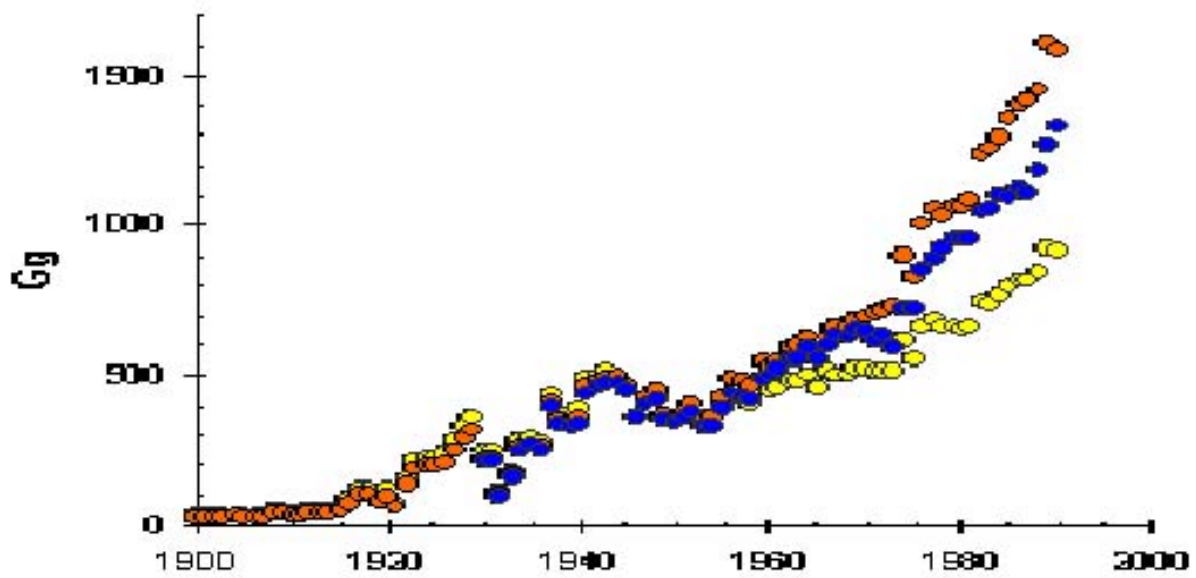


Figura 2: Emisiones de azufre proveniente de actividad minera - Producción de cobre por procesos pirometalúrgicos - y producción total nacional - . 1Gg=1000 ton

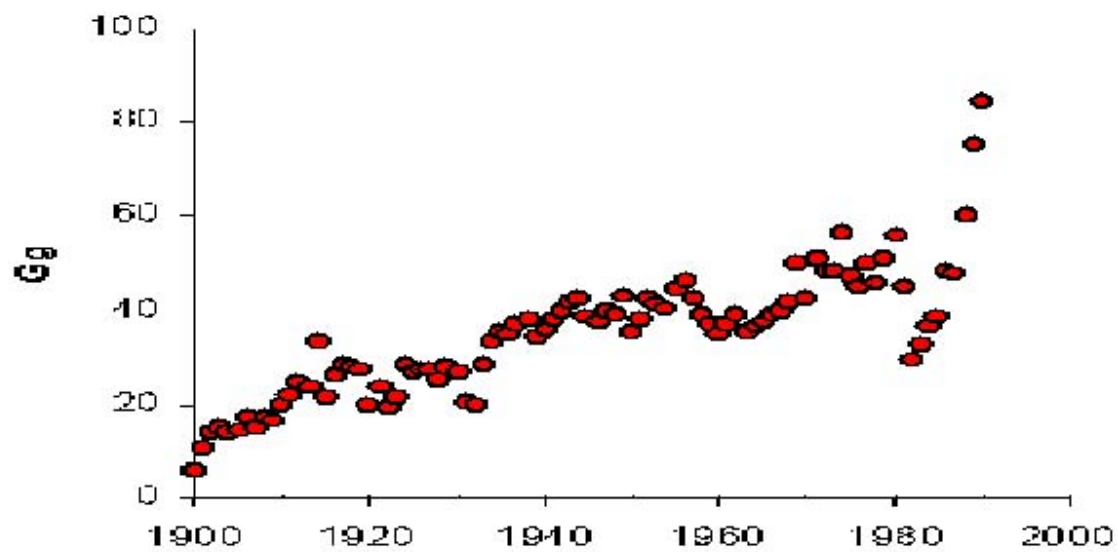


Figura 3: Emisiones de azufre de origen antrópico no relacionados a la minería. 1Gg = 1000 ton.

EMISIONES DE ORIGEN NATURAL: VOLCANES

Aunque no se incluye en la modelación presentada, la actividad volcánica representa una significativa fuente de emisiones de gases a la atmósfera, donde la especie de azufre más abundante emitida corresponde al SO₂ (oxidado) seguida por el H₂S (reducido), el que se oxida rápidamente a SO₂. La inyección de gases se registra en varios niveles de la atmósfera, principalmente en función del grado de explosividad de la erupción. El aporte de azufre oxidado (convertido en aerosol sulfato -H₂SO₄ y H₂O- dentro de un mes aproximadamente) a la estratósfera proviene en cerca de un 90% de erupciones volcánicas (Pyle et al.1996), lo que conlleva una serie de efectos climáticos, a saber: disminución de ozono estratosférico, forzamientos radiativos que disminuyen la temperatura de la superficie terrestre y la aumentan en la estratósfera, variación del albedo, entre otros. Estos efectos son perceptibles hasta por cuatro años desde producida la erupción (Zielinski, 2000).

Los volcanes chilenos carecen de un registro exhaustivo de sus emisiones. Las mediciones realizadas y publicadas (hasta mediados del 2003) se resumen en las tablas siguientes. La Tabla 1 muestra flujos que han sido medidos con un espectrómetro de correlación ultravioleta (COSPEC). La Tabla 2 muestra mediciones satelitales obtenidas a partir de Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS).

VOLCAN	FLUJO PROMEDIO [Mg/día]	FECHA MEDICION	REFERENCIA
Láscar	2300 ± 1120	Noviembre 1989	Andres et al. (1991)
Lonquimay	2380 ± 2720	Noviembre 1989	Andres et al. (1991)
Villarrica	260 ± 170	Enero-Marzo 2000	Witter et al. (2000)

Tabla 1. Mediciones de flujos de SO₂ realizados en volcanes chilenos.

VOLCAN	TOTAL SO ₂ [K ton]	FECHA ERUPCION	REFERENCIA
Láscar	400	Abril 1993 (VEI=3)	Francis et al. (1993)
Hudson	1500	Agosto 1991 (VEI=5)	Schoeberl et al. (1993)

Tabla 2. Mediciones de emisión total de SO₂ para erupciones en volcanes chilenos.

MODELACIÓN DE LA DEPOSICIÓN DE AZUFRE

La estimación del transporte atmosférico y la deposición de azufre proviene de los campos de azufre total generados con el modelo euleriano Multiscale Atmospheric Transport and Chemistry Model MATCH, (Robertson et al.1999), configurado con campos interpolados HIRLAM (High Resolution Limited Area Modelling) y las emisiones de la fundición de Caletones para los años 1997, 1998 y 1999 (Olivares et al. 2002). Posteriormente, se extrajeron los flujos de deposición obtenidos para el cerro El Plomo y con ellos se logró estimar un año típico de deposición de azufre, normalizado para la emisión máxima en la región, que en este caso corresponde a dicha fundición. Los flujos de deposición típicos de azufre total estimados en el cerro el Plomo (Figura

4) estarían relacionados con las condiciones meteorológicas dominantes, lo que se refleja en el carácter episódico y la distribución espacial de las mismas. Así por ejemplo, períodos en que se calculan las máximas tasas de deposición se relacionarían con flujos desde suroeste (Figura 5), mientras que las menores deposiciones de azufre (enero de 1997 con 0.7 [mgS/mes]) estarían relacionados con el movimiento hacia el noreste del penacho de Caletones (Figura 6).

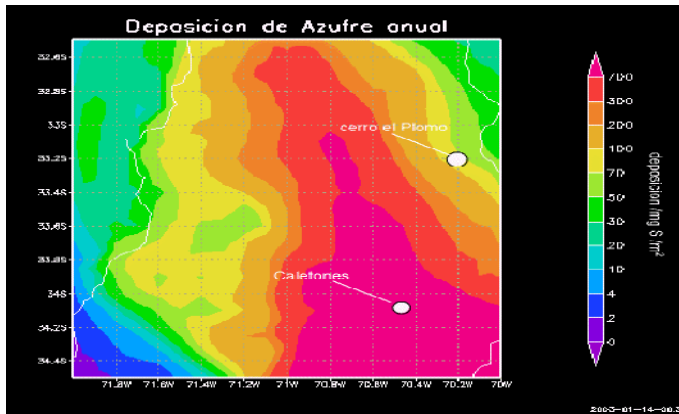


Figura 4: Flujos de deposición típicos (promedio anual) de azufre oxidado[mg/mes].

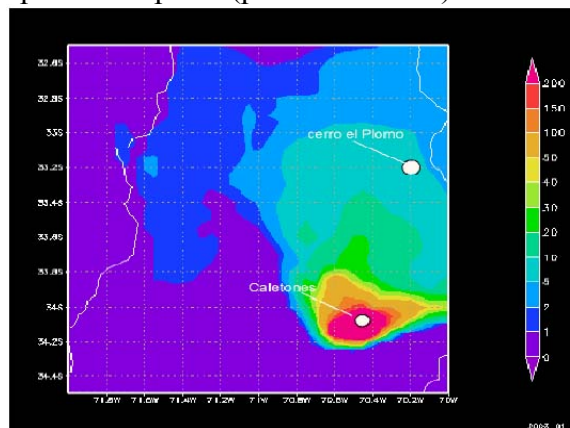


Figura 5: Deposición de azufre, asociado con flujos desde el suroeste [mg/mes].

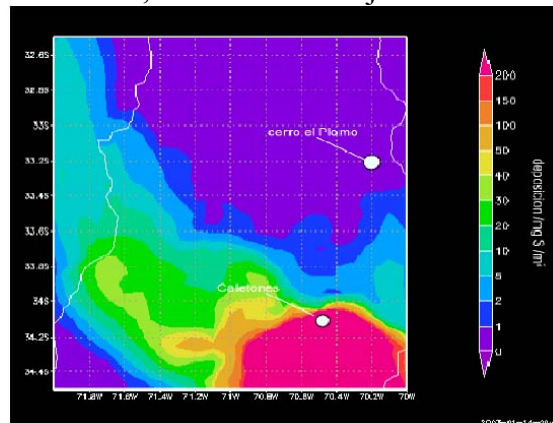


Figura 6: Mínimas concentraciones de azufre, asociado con flujos noreste [mg/mes].

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Finalmente, con estimaciones de las emisiones históricas asociadas a la fundición de cobre de Caletones, sumado el año típico promedio de deposición de azufre acumulado anual, se estima la deposición típica histórica en el cerro el Plomo (Figura 7).

Como tendencia general, a lo largo del siglo XX se comprueba un aumento de la tasa de deposición anual de azufre en el glaciar del cerro El Plomo, el que estaría relacionado principalmente con aumentos en las emisiones de la fundición de Caletones.

Puesto que este trabajo se trata de una estimación preliminar, a futuro se espera contar con estimaciones más precisas acerca de las emisiones de las distintas fundiciones de cobre en el país y para la región de estudio (Chagres y Ventanas). También se espera cuantificar e incluir en modelamientos, el aporte de emisiones de azufre oxidado como consecuencia de actividad volcánica y de otras fuentes naturales de azufre (DMS).

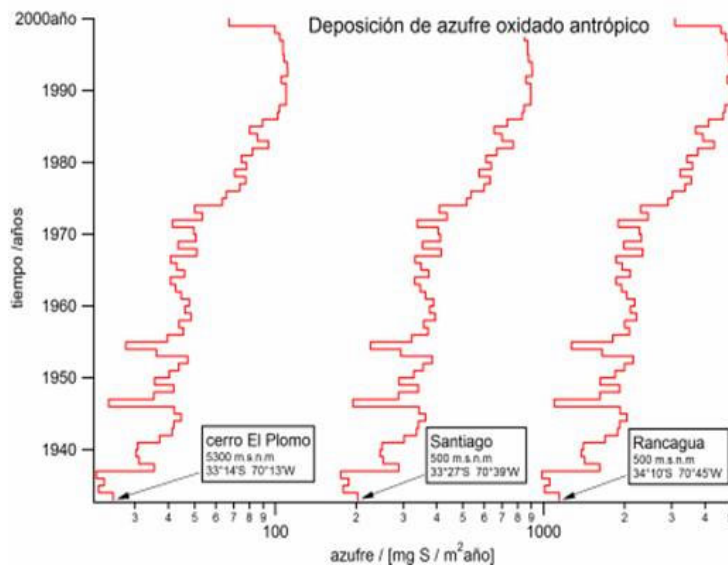


Figura 7: Deposición histórica estimada en el cerro El Plomo, Santiago y Rancagua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Sra. Sarita Pimentel (COCHILCO), Sra. Ximena Ubilla (CONAMA – VI) y al Sr. Jacques Wiertz (Universidad de Chile), por su valiosa cooperación para la realización de este ejercicio.

Resultados preliminares de este trabajo fueron presentados en el “Simposio de Cambio Global: Hacia una perspectiva sistémica” realizado en Punta Arenas en Enero de 2003.

REFERENCIAS

- Andres, R., Rose, W., Kyle, P., de Silva, S., Francis, P., Gardeweg, M. y Moreno, H. 1991. Excessive sulfur dioxide emissions from Chilean volcanoes. J. Volcanol. Geotherm. Res. Vol 46. p.323-329.
- CODELCO-Chile. 1975. El Cobre Chileno. Corporación Nacional del Cobre. 520 pp. Santiago.
- COCHILCO. 1981-2002. Anuario Estadísticas del Cobre y Otros Minerales. Comisión Chilena del Cobre. Santiago.

- CONAMA. 1999. Primera Comunicación Nacional bajo la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Santiago.
- Francis, P., Self, S., Oppenheimer, C. y Rothery, D. 1993. The April 1993 eruption of Láscar, north Chile: observations and inferences. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*. Vol. 74. p. 651
- Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J. y Aarhus, B. 2002. Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile. *Atmos. Environ.* Vol. 36. p. 3829-3841.
- Gidhagen, L., Kahelin, H., Schmidt-Thomé, P. y Johansson, C. 2002. Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in Central and Northern Chile. *Atmos. Environ.* Vol. 36. p. 8303-8317
- Lefohn, A., Husar, J. y Husar, R. 1999. Estimating Historical Anthropogenic Global Sulfur Emission Patterns for the Period 1850-1990. *Atmos. Environ.* Vol. 33. p. 3435-3444.
- Olivares, G. 2001. Dispersión Regional del Azufre Oxidado en Chile Central. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Química. Santiago. Chile. 80 pp.
- Olivares, G., Gallardo, L., Langner, J. y Aarhus, B. 2002. Regional dispersion of Oxidized Sulfur in Central Chile. *Atmos. Environ.* Vol. 36. p. 3819-3828.
- Pyle, D., Beattie, P. y Bluth, G. 1996. Sulphur emissions to the stratosphere from explosive volcanic eruptions. *Bull. Volcanol.* Vol. 57. p. 663-671.
- Robertson, L., Langner, J. y Engardt, M. 1999. An eulerian limited-area atmospheric transport model. *J. of Applied Meteorology*. Vol. 38. p. 190-210.
- Schoeberls, M., Doiron, S., Lait, L., Newmam, P. y Krueger, A. 1993. A simulation of the Cerro Hudson SO₂ cloud. *J. Geophys. Res.* Vol. 98. p. 2949-2955.
- Witter, J., Calder, E., Kress, V., Stix, J., Delmelle, P., Peña, P. y Fuentealba, G. 2000. Preliminary Results of COSPEC measurements at Volcan Villarrica, Southern Chile. IX Congreso Geológico Chileno. Puerto Varas, Chile. Vol. 2. p. 90-91.
- Zielinski, G. 2000. Use of paleo-records in determining variability within the volcanism-climate system. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 19. p. 417-438.