

APLICACIÓN DEL MÉTODO PIXE Y XRF EN EL ESTUDIO DE AEROSOLES VOLCANICOS

Rodolfo Figueroa S. David Caro C. y Julio Valdés A.
Departamento de Ciencias Físicas, Universidad de La Frontera,
Casilla 54-D, Temuco-Chile.

En el transcurso de los últimos tres años, han habido tres erupciones volcánicas en el macizo andino del sur de Chile: Volcán Lonquimay (1988-1989), Volcán Hudson (1991) y Volcán Copahue (1992), las cuales han afectado incluso, vastas zonas del sur de la Argentina. Todas estas erupciones se han caracterizado por la emisión de una gran cantidad de material piroclástico de diferentes formas y tamaños, incluido el respirable. En este trabajo se analizan: las concentraciones, la composición multielemental mediante los métodos PIXE y XRF, la morfología y distribución de tamaño mediante SEM, de la fracción PM-15 de los aerosoles volcánicos o ceniza volcánica en suspensión. Se comparan y correlacionan concentraciones elementales respecto del Silicio para los elementos más representativos detectados por estos métodos.

I. INTRODUCCIÓN

La erupción de un volcán genera un fuerte impacto en el medio ambiente debido principalmente a la emisión de lava, piroclastos, ceniza y gases. El conocimiento oportuno de la composición elemental y de los niveles de concentración del material emitido, permiten evaluar los efectos inmediatos y de largo plazo que se tendrán sobre los ecosistemas próximos al sitio eruptivo.

Los aerosoles volcánicos son partículas de material emitido por una erupción que quedan en suspensión (MPS) y se caracterizan por tener un diámetro aerodinámico menor que 45 μm , de éstos, son semi-resperables, aquellos con un diámetro menor que 15 μm (PM-15). La concentración, morfología y composición elemental asociada a la fracción PM-15, permite determinar, la presencia de elementos potencialmente nocivos para la salud humana y animal, puesto que invaden al organismo por las vías respiratorias.

La concentración de la fracción PM-15 de los aerosoles volcánicos se determina mediante gravimetría, utilizándose una microbalanza de 10 μg de sensibilidad.

La morfología y distribución de tamaño de la fracción PM-15 del MPS es analizada mediante SEM (Scanning Electron Microscopy).

Los métodos PIXE (Particle induced X-ray emission)^{1,2} y XRF (X-ray Fluorescence)^{3,4}, usados en este trabajo permiten detectar de manera simultánea elementos (multielemental) más pesados que el Aluminio. El método PIXE utilizado es recomendable para la detección de elementos livianos ($12 < Z < 30$), en cambio XRF, inducida con fuentes radioactivas o tubos de rayo X, permite detectar elementos hasta el Uranio y

con una menor sensibilidad para los elementos livianos.

En este trabajo se aplican ambos métodos a la ceniza caída y a la fracción PM-15 del material eyectado por las erupciones de los volcanes Lonquimay, Hudson y Copahue.

La erupción ocurrida en el complejo volcánico Lonquimay (38, 3° S-71, 5° W), se inició el 25 de Diciembre de 1988 y se mantuvo por un lapso de un año aproximadamente, y tuvo las características típicas anteriormente mencionadas, cabe señalar que el MPS cubrió algunas localidades cercanas, como Malacahuello, Lolco, Sierra Nevada, Lonquimay y parte del territorio argentino, La localidad mas afectada debido a los vientos predominantes fue Lonquimay, como se muestra en la Fig. 1. La situación crítica se mantuvo aproximadamente por 8 meses, período durante el cual debieron extremarse las medidas de emergencia^{5,6}.

El ciclo eruptivo del volcán Hudson (45,9°S - 73°W) se inició el 8 de Agosto de 1991 y se mantuvo durante tres meses aproximadamente, contempló dos erupciones principales, la primera de ellas afectó algunas ciudades del norte como Chacabuco, Aysen y levemente la ciudad de Coyhaique. a partir del 11 de Agosto producto de la segunda activación, la pluma se orientó en dirección S.E., afectando entre otras a la ciudad de Murta, Río Tranquilo, Cerro Castillo, Ingeniero Ibañes, Chile Chico, Los Antiguos, Perito Moreno y gran parte de la Patagonia Argentina (Fig. 2). A pesar de que el ciclo eruptivo fue de menor duración que en el Lonquimay, durante este período se debió realizar un plan de emergencia⁷.

El 31 de Julio de 1992 entró en erupción el volcán Copahue (37,8° S-71,2°W) ubicado en el límite entre Chile y Argentina, afectando principalmente

mediante la misma metodología descrita por PIXE, introduciendo las correcciones adecuadas en los programas computacionales.

En el caso del volcán Lonquimay se realizaron campañas de muestreo desde Enero de 1989 hasta Mayo de 1991, cubriendo parte de las etapas eruptiva (Enero-Julio de 1989) y posteruptiva (Enero 1990-Mayo 1991), éstas estuvieron orientadas a la colocación del MPS, piroclastos y ceniza caída, en sitios cercanos al volcán y que fueron afectados directamente por las cenizas, determinándose la concentración y composición multi elemental del material detectado, en base a la densidad superficial δ del elemento Z en la muestra, de acuerdo a:

$$\delta(Z) = \frac{N_x(Z)}{N_i} \frac{4\pi A(Z)}{\sigma_x(E,Z)\Omega\epsilon_x(Z)}$$

en que $N_x(Z)$ es el número de fotones X provenientes de el elemento Z que han sido detectados; N_i es el número de partículas que han bombardeado la muestra; $A(Z)$ es el peso atómico del elemento Z; $\sigma_x(E,Z)$ es la sección eficaz de emisión de rayos X característicos del elemento Z por partículas de energía E; Ω es el ángulo sólido de detector y $\epsilon_x(Z)$ es la eficiencia del detector para los fotones X del elemento Z. $N_x(Z)$ se determina del espectro, N_i se obtiene conociendo la corriente del haz y el tiempo en que irradió la muestra. El ángulo sólido se determina por geometría y la eficiencia se conoce por experimentos previos^{3,8}.

En la etapa posteruptiva, el MPS colectado se generó principalmente por resuspensión de la capa de polvo que cubría tanto los sitios amagados durante la erupción como aquellos afectados directamente por la actividad antropogénica. Los resultados aquí presentados se refieren en especial a los obtenidos en la ciudad de Lonquimay.

En el caso del volcán Hudson se analizan los resultados correspondientes a una campaña de muestreo de una semana de duración, en diversas localidades afectadas por la erupción, colectándose el mismo tipo de material que en el caso del Lonquimay.

En cuanto al volcán Copahue, sólo se recogió material piroclástico y ceniza caída durante la erupción, y se analiza cualitativamente mediante FRX en conjunto a ceniza caída de los otros dos volcanes.

III. RESULTADOS

En la fig. 4 se muestran las concentraciones de la fracción PM-15 de los aerosoles emitidos por el volcán Lonquimay, colectados en cuatro campañas durante el proceso eruptivo y cinco en la etapa posteruptiva, en la ciudad de Lonquimay. Se observa una clara disminución en las cantidades de MP-15 en el período posteruptivo a pesar de la resuspensión. Durante el período eruptivo, el cambio en la distribución de las concentraciones de los modos fino y grueso, en que el incremento del modo grueso indica una mayor actividad volcánica, lo cual está en consecuencia con el incremento de la concentración en dicha fracción.

Durante el período posteruptivo, si bien hay niveles de concentración que superan los 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ promedio diario, esto se debe principalmente a la resuspensión de la ceniza caída por la acción de los vientos locales. En las localidades próximas al volcán Lonquimay se detectaron niveles de la fracción MP-15 que superaron los 2000 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ promedio diario.

En la Fig. 5, se muestra la evolución elemental en el modo fino y grueso de la fracción respirable de los aerosoles colectados, para los elementos Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Fe y Cu detectados mediante PIXE. En ambos modos se muestra una disminución de las concentraciones elementales en el período posteruptivo, la cual es mayor que la correspondiente a la fracción PM-15 del MPS, lo que indica la incorporación de algunos elementos livianos

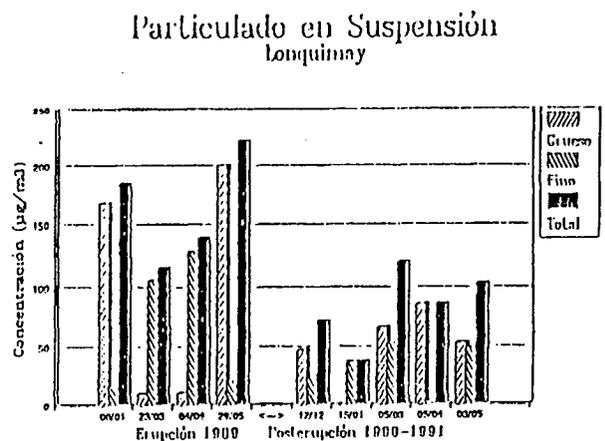
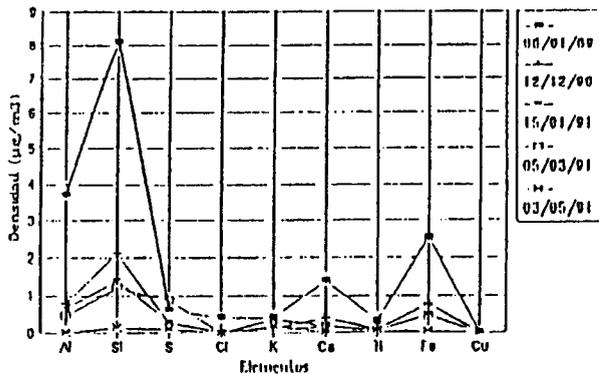


Fig.4: Particulado en suspensión (Lonquimay).

Densidad Volum. de Elementos Detectados
Lonquimay Modo Fino



Densidad Volum. de Elementos Detectados
Lonquimay Modo Grueso

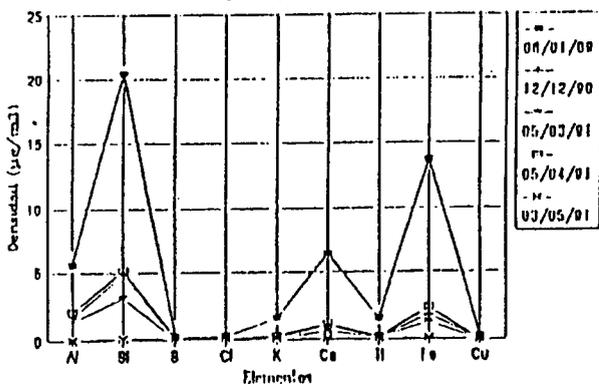


Fig.5: Densidad volumétrica de elementos detectados (Lonquimay): arriba, modo fino; abajo, modo grueso.

no detectados por este método y propios de la actividad antropogénica. En el modo fino se aprecia que el K en las dos últimas campañas presentó niveles de concentración cuyas razones respecto del Silicio son mayores que en el período eruptivo, hecho que confirma la incorporación de elementos típicos generados por la actividad humana, como es el caso del K y el C, debido a la quema de leña.

En la Fig. 6 se muestra la microfotografía del modo grueso de la fracción PM-15 mediante filtro de 8 µm de diámetro de poro, correspondientes a los aerosoles colectados en el entorno del volcán Hudson. A partir de la imagen es posible observar una morfología de aristas agudas en las partículas, cuya componente principal es el SiO₂ amorfo y cristalino (cuarzo). Este compuesto generalmente se encuentra presente en un 40 y un 60 por ciento de todo material volcánico, es por esta razón que a este material también se le denomina "vidrio volcánico".

En las Figs. 7 y 8 se muestran las tendencias de las concentraciones asociadas a los elementos principales detectados por PIXE, con respecto al Si (Al, Ca y Fe), para el modo grueso correspondiente

a las erupciones de los volcanes Lonquimay y Hudson. Las tendencias en ambas erupciones presentan una buena correlación para cada elemento, apreciándose notorias diferencias en las proporciones de los elementos respecto del Si (elemento mayoritario). La concentración de Fe emitido por el volcán Lonquimay es prácticamente el doble que la del volcán Hudson, la concentración del Al es similar para las erupciones de ambos volcanes y la concentración de Ca emitida por el volcán Lonquimay es de aproximadamente un 50% mayor que la emitida por el Hudson.

En la Fig. 9 se puede apreciar una gráfica de la distribución del tamaño de partícula encontrada en el modo grueso para el caso de la erupción del volcán Hudson, apreciándose un máximo en torno a los 4 µm, menor que el tamaño de poro (8 µm), lo cual se debió a la alta estática ambiental generada por la erupción.

La Fig. 10 muestra en escala logarítmica los espectros correspondientes a la ceniza caída para las erupciones de los volcanes Lonquimay, Hudson y Copahue, estos espectros fueron adquiridos mediante XRF activada con una fuente de ¹⁰⁹Cd con un tiempo de colección de 6000 a c/u y en condiciones de geometría idénticas. En virtud de que los espectros muestran como elemento principal al Fe y a que en todo material volcánico además del Fierro, el Silicio y el Aluminio están también presentes en forma mayoritaria en los compuestos SiO₂, FeO y Al₂O₃ y que la granulometría y densidad es similar en cada una de las muestras volcánicas y por tanto, comparar elemento a elemento de un modo directo. Sin embargo cada volcán presenta un perfil elemental propio, puesto que los elementos aparecen en distintas proporciones. De acuerdo a esta comparación hay concordancia con los resultados obtenidos con PIXE.

Mediante XRF se detectaron elementos más pesados que con PIXE, pero con menor sensibilidad para los livianos, aquí aparecen: Zn, Pb, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, y Mo. En el caso de la ceniza emitida por el volcán Copahue se detectó una mayor cantidad de S, Cu, Se y Br y una mayor cantidad de Fe y Sr, que la encontrada en los volcanes Lonquimay y Hudson y prácticamente hay una carencia de K, Zn, Ca, Mn e Y.



Fig.6: Microfotografía del modo grueso.

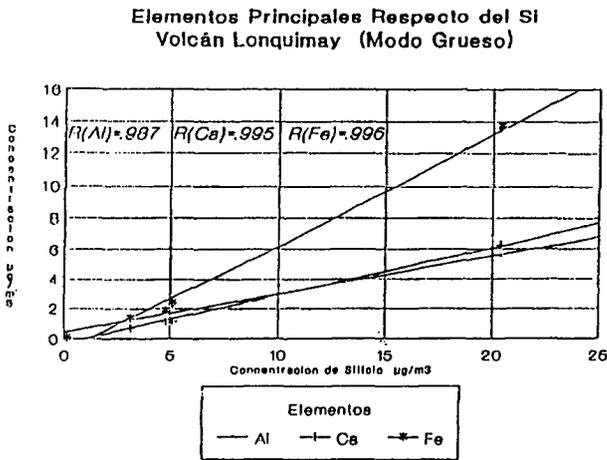


Fig.7: Elementos principales respecto del Si volcán Lonquimay (modo grueso).

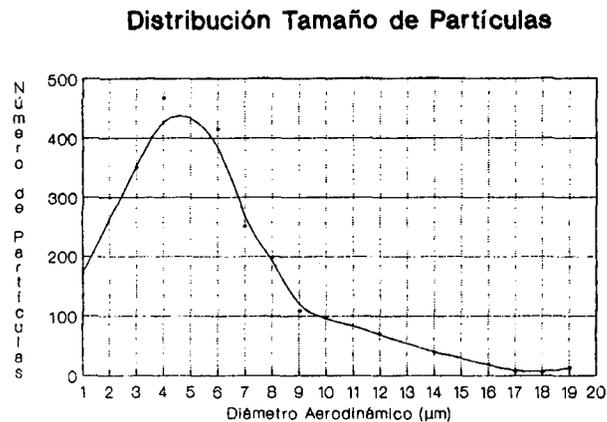


Fig.8: Elementos principales respecto del Si volcán Hudson (modo grueso).

Distribución Tamaño de Partículas

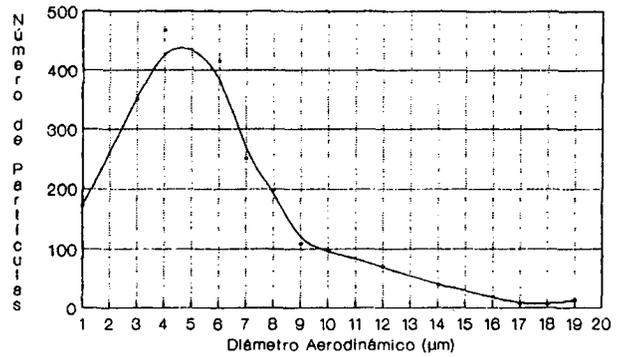


Fig. 9: Distribución del tamaño de partículas.

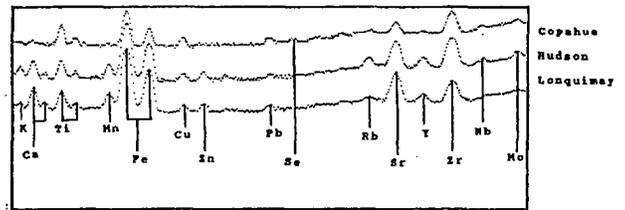


Fig. 10: Espectros de ceniza.

IV. CONCLUSIONES

Los estudios realizados mediante los métodos PIXE y XRF en el material volcánico proveniente de las tres erupciones descritas, prueban ser eficaces en cuanto a la determinación multi-elemental tanto en aerosoles como en ceniza caída, permitiendo además, conocer el perfil multi-elemental característico de cada volcán y su evolución.

Los resultados muestran que los métodos PIXE y XRF utilizados son complementarios para el estudio del material volcánico, ya que mediante XRF se detectan elementos más pesados, tales como: Zn, Pb, Rb, Sr, Y, Zr, Nb y Mo, no detectados con PIXE. Así como también, XRF confirma los resultados obtenidos con PIXE en las proporciones de la concentración de Hierro respecto del Silicio, en el material expelido por los volcanes Lonquimay y Hudson.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación de la Universidad de la Frontera por su aporte al financiar parcialmente este trabajo.

REFERENCIAS

1. J.A.Cahill "Physical Methods in air pollution research: The second decade", Physics in Environmental and Biomedical Research, pp. 55-61 Ed. S.Onord, E.Taber World Scientific Publishing Co. N.Y., 1986.
2. S.A.E. Johansson and J.L.Campbell "PIXE, a novel technique for elemental analysis", chap 12 (John Wiley and Sons, Chichester, 1988).
3. Ron Jenkins, "Quantitative X-Ray Spectrometry", (Marcel Dekker Inc, New York, 1981)
4. M. Dinator, F. Llona, J. Valdés, R. Figueroa y S. Contreras. "Análisis por fluorescencia de rayos-X inducida por una fuente de ^{109}Cd de cenizas volcánicas emitidas por el volcán Lonquimay". Avances en análisis por técnicas de rayos-X, Vol VII 1990.
5. R. Figueroa, J. Valdés, R. Morales, M. Dinator, C. Romo y F. Llona, Aerosoles volcánicos sobre la localidad de Lonquimay, Revista Frontera N° 8, 1989.
6. R. Figueroa, M. Dinator, J. Valdés, R. Morales, David Caro y F. Llona. "Evolución de las concentraciones de Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Fe, Cu en la fracción PM-15 del material particulado en suspensión en sitios cercanos al volcán Lonquimay (IX Región-Chile)", Anales Cuarto Simp. Chileno de Fis. Exp. y Aplic. Concepción-Chile, 85, 1992.
7. R. Figueroa, R. Morales, F. Llona, M. Dinator y J. Valdés. "Aplicación del Método PIXE al Estudio del Material Particulado menor que 15 μm emitido por el volcán Hudson", Anales Cuarto Simposio Chileno de Física Experimental y Aplicada, Concepción-Chile, 90, 1992.
8. J.R. Morales, "Estudios analíticos con el método PIXE", Anales I Simposio Latino Americano de Análisis por técnicas de rayos-X. La Falda (Córdoba), Argentina, 78, 1985.