

# **Aplicación del análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos (PGNAA) para el perfilaje de perforaciones de voladura en una cantera de Cementos Lima. Reporte Preliminar**

César Zanabria<sup>1</sup>, Rafael Medina<sup>1</sup>, Leoncio Gilvonio<sup>1</sup>, Marco Munive<sup>2,\*</sup>, Oscar Baltuano<sup>2</sup>, José Solís<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cementos Lima S.A., Av. Atocongo 1440, Lima 35, Perú

<sup>2</sup> Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

## **Resumen**

El análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos (PGNAA) es una técnica de análisis elemental que se usa en la industria. Estamos investigando la factibilidad de la aplicación de la técnica PGNAA en la caracterización elemental de las perforaciones de voladura de la cantera de Atocongo de Cementos Lima.

## **Abstract**

The prompt gamma neutron activation (PGNAA) is a technique that has been used in the industry. We are investigating the feasibility of the PGNAA technique for elemental characterization of the blast holes in the open cut Atocongo mine from Cementos Lima.

## **1. Introducción**

Los sondeos mecánicos son una herramienta muy importante en la exploración minera, esta técnica permite obtener muestras del subsuelo a diferentes profundidades. El principal problema es su representatividad y en el mejor de los casos, sondeos con recuperación de testigo continuo al manipularla puede no haberse recuperado completamente. Posteriormente, estas muestras son enviadas al laboratorio para realizar los análisis respectivos, usando técnicas como Fluorescencia de Rayos X (FRX), Absorción Atómica, etc. Este proceso toma tiempo y puede producirse errores en los resultados como consecuencia de la manipulación de las muestras, debido a que la masa de la muestra analizada es de algunos gramos. No obstante, representa la información más valiosa que se dispone sobre la mineralización, mientras no se llegue hasta ella mediante labores mineras. Entre las diferentes técnicas para analizar las perforaciones se tiene al Análisis por Activación Neutrónica de Gammas Inmediatos (Prompt Gamma Neutron Analysis Activation) (PGNAA) que tiene la capacidad de proporcionar una información cuantitativa "in-situ" de la ley de cobre/hierro/carbón en tiempo real [1-3]. Esta técnica aparte de su capacidad para entregar datos instantáneos, tiene la ventaja que la radiación usada es altamente penetrante y puede analizar volúmenes mayores que la muestra extraída en la perforación.

Comercialmente, están disponibles analizadores elementales en línea basados en la técnica PGNAA para el análisis de la materia prima que se usan en diferentes partes del proceso en la industria cementera [4]. Sin embargo, no hay trabajos sobre el uso de la técnica PGNAA para la caracterización de la caliza en cantera. En el presente trabajo se ha explorado la aplicación de la técnica PGNAA en la cantera de Atocongo de Cementos Lima.

## **2. Fundamento**

La técnica PGNAA es un método nuclear no destructivo de análisis elemental, que se realiza al exponer el material a un flujo de neutrones. Como los neutrones carecen de carga eléctrica, no sufren la acción de campos eléctricos ni magnéticos; por lo tanto, son capaces de atravesar grandes espesores del material. Cuando un neutrón choca con un átomo, le cede parte de su energía mediante la acción de choques elásticos (se conserva la energía del sistema) e inelásticos (la energía del sistema se convierte en excitación interna del núcleo). Una interacción inelástica de los neutrones térmicos con los núcleos se produce cuando el neutrón es absorbido produciendo un isótopo diferente. El núcleo excitado normalmente emite radiación gamma de alta energía.

\* Correspondencia autor: mmunive@ipen.gob.pe

La energía de la radiación gamma es específica al núcleo y tipo de reacción nuclear. Si la intensidad y energía se mide con un detector espectrométrico, se puede determinar el elemento y la cantidad de la misma, presente en una muestra. Los rayos gamma emitidos pueden ser clasificados como inmediatos o retardados provenientes del decaimiento de la radioactividad inducida según el tiempo de vida media de la desintegración. La radiación gamma inmediata tiene vida media muy corta, aproximadamente  $10^{-13}$ s mientras que la radiación gamma retardada tiene vida media del orden de segundos u horas, dependiendo del elemento. En la técnica PGNAA se detecta los fotones gamma inmediatos producidos por la reacción nuclear de captura neutrónica, que son característicos de cada elemento. En la Tabla 1 se tiene las secciones eficaces y la energía de los fotones gamma para algunos elementos. Los elementos Ca, Si, Fe y Al, son los que se pueden determinar fácilmente con la técnica de PGNAA y justamente estos son los elementos mayoritarios en las canteras de caliza.

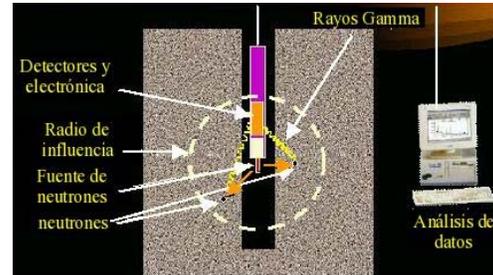
**Tabla 1:** Secciones eficaces y energía de fotones gamma inmediatos para algunos elementos.

|    | $E_\gamma$<br>(keV) | $\sigma_\gamma$ ( $E_\gamma$ )<br>(b) |    | $E_\gamma$<br>(keV) | $\sigma_\gamma$ ( $E_\gamma$ )<br>(b) |
|----|---------------------|---------------------------------------|----|---------------------|---------------------------------------|
| H  | 2223                | 0.3326                                | Si | 3538                | 0.1190                                |
| C  | 4945                | 0.0026                                | Cl | 1164                | 8.91                                  |
| N  | 5269                | 0.0236                                | Mg | 3916                | 0.0320                                |
| Na | 90.99               | 0.235                                 | Fe | 7631                | 2.55                                  |
| Ca | 1942                | 0.352                                 | Al | 4259                | 0.0153                                |

### 3. Proceso Experimental

La instrumentación utilizada para el perfilaje de las perforaciones de voladura está compuesto de una fuente de neutrones ( $Cf^{252}$ ) con una actividad actual de 1.68 mCi, un detector de radiación gamma de tipo centelleo BGO, y su electrónica asociada (fotomultiplicador, amplificadores multicanal y fuente de alto voltaje), estos componentes se encuentra dentro de un tubo de plástico de 1.65 cm de longitud y 7 cm de diámetro, al que se denomina sonda. La sonda se introduce a la perforación de voladura mediante un sistema mecánico y consta de una polea y un motor para hacerlo a una velocidad constante, el cable es de acero

y no sólo sirve para sostener la sonda sino también por el mismo se transmite la señal obtenida por la sonda a una interfase, que es colectada a una computadora portátil. Este sistema se denomina SIROLOG y es de fabricación australiana (Figura 1).



**Figura 1:** Diagrama de la sonda SIROLOG.

Los neutrones interactúan con los materiales de las paredes de la perforación de voladura y penetran unos 40 cm y los núcleos excitados emiten fotones gamma característicos de los elementos mayoritarios (Ca, Al, Fe, Si y S) de la cantera.

El presente estudio se inició en el mes de agosto del 2007, conjuntamente con el personal de Control de Calidad de Cementos Lima. Las mediciones mediante PGNAA se hicieron en las perforaciones de voladura de la cantera de Atocongo de Cementos Lima. (Figura 2).



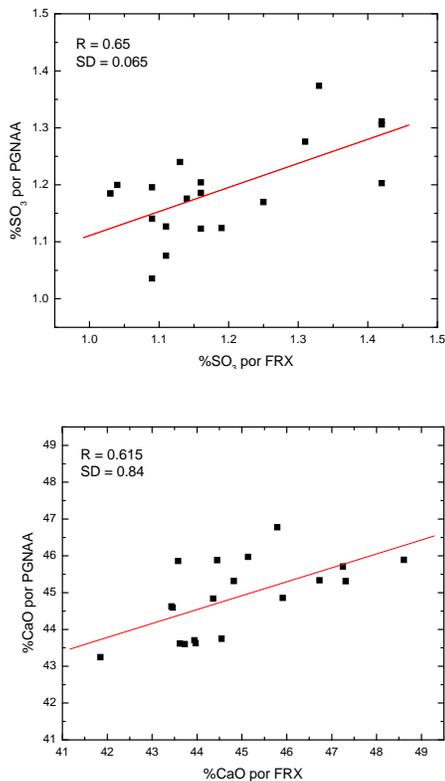
**Figura 2:** Instalación de sistema SIROLOG en una perforación de voladura en la cantera de Atocongo.

El objetivo del trabajo es lograr las curvas de calibración que nos permita determinar los niveles de concentración de los compuestos de interés ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SO_3$ ) en las perforaciones de voladura. La sonda se introduce en las perforaciones y al extraerla, a una velocidad de 2 m/minuto, se obtiene el espectro de gamma inmediatos cada 20 cm. Los resultados se analizan teniendo en cuenta las regiones del espectro donde se encuentran

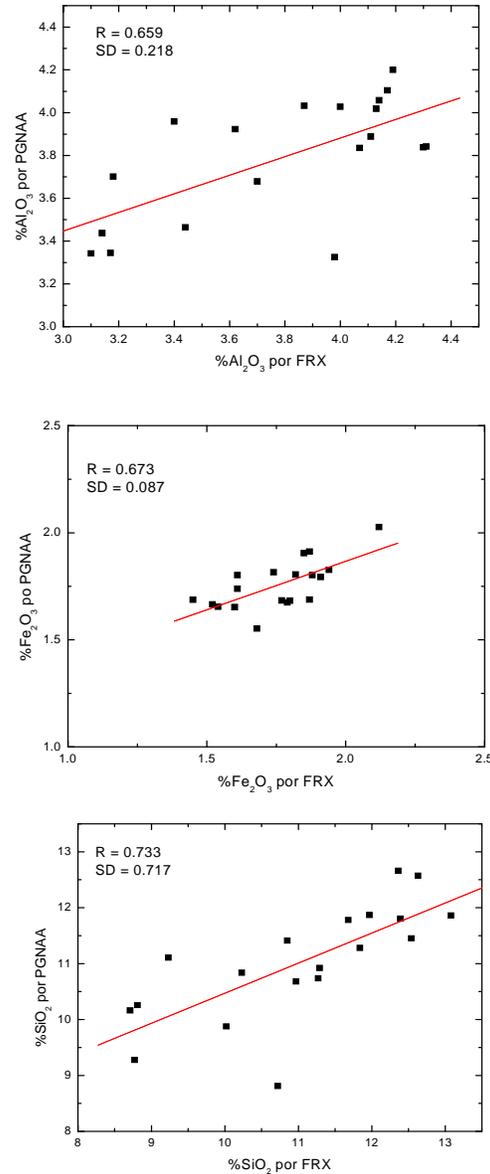
los fotones característicos de los elementos de interés.

Se hicieron medidas en 19 perforaciones de voladura de los proyectos 2602 y 2600, estas perforaciones fueron caracterizadas por Fluorescencia de Rayos X (FRX) en el Departamento de Control de Calidad de Cementos Lima (Tabla 2).

A partir de las regiones de interés del espectro para el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SO}_3$  se ha logrado en una primera aproximación, la concentración de cada uno de esos compuestos. En las Figuras 3 y 4 se comparan los resultados obtenidos por FRX y PGNAA para los elementos.



**Figura 3:** Correlación de los resultados obtenidos por PGNAA y FRX para el  $\text{SO}_3$  y  $\text{CaO}$ .

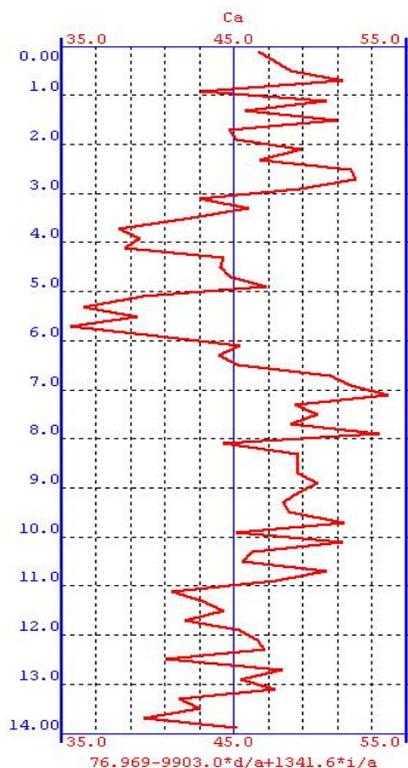


**Figura 4:** Correlación de los resultados obtenidos por PGNAA y FRX para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{SO}_3$ .

También se puede obtener el perfil de las concentraciones de cada elemento, durante las perforaciones de voladura debido a que se obtiene un espectro cada 20 cm. En la Figura 5 se muestra el perfil de  $\text{CaO}$  de una perforación de voladura, esto nos brinda información de la formación geológica de la zona estudiada.

**Tabla 2:** Composición química de las algunas perforaciones de voladura realizadas por FRX, laboratorio de control de calidad Cementos Lima.

|              | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|
| Py2602 T 485 | 11.29            | 4.13                           | 2.12                           | 44.55 | 2.19 | 1.42            | 0.8              | 0.16              |
| Py2602 T 486 | 11.27            | 4.07                           | 1.91                           | 44.82 | 2.54 | 1.25            | 0.83             | 0.16              |
| Py2602 T 487 | 9.23             | 3.18                           | 1.6                            | 48.61 | 2.24 | 1.16            | 0.62             | 0.15              |
| Py2602 T 488 | 8.71             | 3.1                            | 1.45                           | 47.25 | 2.19 | 1.09            | 0.59             | 0.15              |
| Py2602 T 489 | 8.81             | 3.14                           | 1.52                           | 47.31 | 2.25 | 1.04            | 0.63             | 0.13              |
| Py2600 T 449 | 11.84            | 4                              | 1.79                           | 44.45 | 2.54 | 1.11            | 0.72             | 0.24              |
| Py2600 T 467 | 10.97            | 3.7                            | 1.68                           | 45.14 | 2.32 | 1.09            | 0.68             | 0.24              |
| Py2600 T 468 | 10.85            | 3.62                           | 1.61                           | 44.36 | 2.26 | 1.09            | 0.66             | 0.23              |
| Py2600 T 471 | 12.36            | 4.19                           | 1.85                           | 41.85 | 2.51 | 1.33            | 0.77             | 0.29              |
| Py2600 T 424 | 12.54            | 4.14                           | 1.82                           | 43.46 | 2.6  | 1.19            | 0.74             | 0.21              |



**Figura 5:** Perfil del % CaO de la perforación de voladura 487 del proyecto 2602.

#### 4. Comentarios y conclusiones

- Las pruebas preliminares obtenidas, sugieren la necesidad de hacer un mejor proceso de calibración de la sonda usando muestras uniformes en una geometría similar a una perforación de voladura y un mayor número de perforaciones de voladura.

- Los resultados obtenidos nos indican que se puede obtener el perfil de las perforaciones de voladura.

#### 5. Agradecimientos

A los Srs. Javier Gago y Yuri Hernández por su apoyo en el mantenimiento y reparación del sistema mecánico de perfilado y trabajo de campo.

#### 6. Referencias

- [1]. Borsaru M, Ceravolo C. A low activity spectrometric gamma-gamma borehole logging tool for the coal industry. Nuclear Geophysics. 1994 Aug; 8(4): 343-350.
- [2]. Charbucinski J, Malos J, Rojc A, Smith C. Prompt gamma neutron activation analysis method and instrumentation for copper grade estimation in large diameter blast holes. Applied Radiation and Isotopes. 2003 Aug-Sep; 59(2-3):197-203.
- [3]. Charbucinski J, Nichols W. Application of spectrometric nuclear borehole logging for reserves estimation and mine planning at Callide coalfields open-cut mine. Applied Energy. 2003; 74: 313-322.
- [4]. Leethan D. Online Stockpile Analysis. World Cement, January 2008.
- [5]. Paul RL, Lindstrom RM. Prompt gamma-ray activation analysis. Fundamentals and applications. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2000 Jan; 243(1):181-189.