

Environmental study of gold mining tailings in the Ponce Enriquez mining area (Ecuador)

Elizabeth Peña-Carpio ^a & Juan M. Menéndez-Aguado ^{a,b}

^a Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil Ecuador, gepena@espol.edu.ec

^b Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, Oviedo, España. maguado@uniovi.es

Received: July 7th, 2015. Received in revised form: December 15th, 2015. Accepted: January 25th, 2016.

Abstract

As a result of the artisanal mining activities in Ecuador (specially in Ponce Enriquez mining area, province of Azuay), great quantities of mining wastes have been disposed, usually without adequate management standards. Consequent acid rock drainage has been responsible of surface and underground water and surface water bodies. The aim of this study is to show a methodology which can characterize mining wastes to assist the taking decision process about remediation and/or ultimate disposition possibilities.

Keywords: mining tailings, mining environmental impact, acid drainage, remediation

Estudio de las colas de tratamiento de oro de la explotación minera en Ponce Enríquez (Ecuador) desde una perspectiva ambiental

Resumen

En todas las regiones mineras del Ecuador, especialmente en la zona minera de Ponce Enríquez (Azuay), se han depositado a lo largo del tiempo importantes volúmenes de residuos provenientes de las operaciones mineras artesanales, sí que por regla general se hayan considerado los estándares ambientales deseables en su disposición. Como consecuencia, la producción de Drenaje Ácido de Roca (DAR) ha sido una consecuencia habitual, produciendo la contaminación de cuerpos acuáticos superficiales y/o subterráneos. El objetivo de esta investigación es contribuir a mejorar la disposición de las colas de los procesos de recuperación de oro mediante una metodología de caracterización geoquímico-ambiental de dichos residuos que sirva de base para la toma de decisiones sobre las alternativas de disposición final y/o remediación.

Palabras clave: colas mineras, impacto ambiental minero, drenaje ácido, remediación.

1. Introducción

En todas las regiones mineras del Ecuador, se han depositado a lo largo del tiempo, grandes volúmenes de residuos provenientes de las operaciones mineras, con importantes contenidos en sulfuros (pirita, pirrotina). Dado que en raras ocasiones dicho residuo es gestionado conforme a los estándares deseables desde el punto de vista ambiental en su disposición, la acción de las aguas superficiales o de lluvia y el oxígeno de la atmósfera, van generando Drenaje Ácido de Roca (DAR) que produce la contaminación de cuerpos acuáticos superficiales y/o subterráneos [1-4].

Este es el caso más habitual en el distrito minero del cantón

Camilo Ponce Enríquez (provincia Azuay), en el que de forma casi general el manejo y disposición de relaves se realiza sin medidas ambientales acertadas en los diferentes procesos de beneficio mineral [5, 6]. En muchas ocasiones, debido a la baja eficiencia del proceso de tratamiento, incluso puede evaluarse la posibilidad de reprocesamiento del depósito de colas [7]

También es importante considerar que las operaciones mineras generalmente no concluyen con el cierre de operaciones de explotación, como debería ser una Responsabilidad Ambiental enmarcada en un Plan de Cierre y una Restauración de los sitios afectados, utilizando técnicas de remediación que tengan un carácter local [8], lo cual permitiría eliminar los riesgos, limitando la producción y propagación de contaminantes

a fin de generar un estado visual aceptable y compatible con un posible uso futuro.

Las pruebas de evaluación del Drenaje Ácido de Roca (DAR) [9-11] consisten en pruebas geoquímicas estáticas a partir de la caracterización química de los residuos y pruebas geoquímicas dinámicas en celdas húmedas, utilizadas para predecir el potencial neto de neutralización y la tasa de generación de ácido de residuos mineros, además de la calidad de los lixiviados generados en función del tiempo. Esta información es clave para definir el manejo ambiental de dichos residuos, evaluar el efecto de impacto ambiental que éstos están generando y establecer propuestas de remediación ambiental de los sitios mineros en los que han sido dispuestos.

Todas las pruebas geoquímicas a realizar están basadas en la Norma ASTM D5744-9; en el caso de las pruebas geoquímicas estáticas, la finalidad es determinar el poder de generación de ácido que podrían generar los residuos, basándose en el balance entre los minerales que pueden producir ácido (potencial de acidificación PA) y los minerales neutralizantes (potencial de neutralización PN) de la muestra. Las pruebas geoquímicas dinámicas, permiten evaluar la cinética de generación de drenajes ácidos y las cargas de metales pesados que pudieran aportar [12-14]

Así, el objetivo de esta investigación es contribuir a mejorar la disposición de las colas de los procesos de recuperación de oro en Ponce Enríquez mediante una metodología de caracterización geoquímico-ambiental de dichos residuos que sirva de base para la toma de decisiones sobre las alternativas de disposición final y/o remediación.

2. Metodología

2.1. Toma de muestras

En coordinación con el personal técnico de una de las sociedades mineras que operan en el Cantón de Ponce Enríquez, se tomaron muestras representativas de un dique de colas, el mismo que se encuentra cerca de la planta de procesamiento mineral.

Tomando en cuenta el volumen de este dique de relaves se consideró el criterio de “recolección de muestras de mayor sospecha por presencia de sulfuros”; lo que permitirá “predecir el escenario ambiental” más negativo; y por tanto, las “medidas a ser recomendadas” serán en el ámbito de los casos extremos.

2.2. Preparación de las muestras

Las muestras de los relaves fueron procesadas de acuerdo al flujograma presentado en la Fig. 1.

2.3. Caracterización de las muestras

La caracterización de la muestra de relaves mineros fue la siguiente:

2.3.1. Caracterización química

El Análisis Químico de la muestra preparada, pasó por la determinación de los siguientes parámetros: $S_{TOTAL} - SO_4=$, As, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe y otros (Ca, Mg). Los análisis se realizaron en el Laboratorio Certificado SPECTROLAB.

2.3.2. Caracterización mineralógica

A la muestra preparada se le realizó un proceso de separación magnética y luego por un proceso de flotación de sulfuros, cuyo concentrado sulfuroso “espumas” fue analizado por Difracción de Rayos X.

2.3.3. Caracterización Bacteriológica

Las muestras preparadas fueron sometidas a una determinación de pH en pasta a objeto de establecer el pH de hábitat de microorganismos.

2.4. Metodología de las Pruebas Geoquímicas Estáticas

La prueba geoquímica estática se basa en el balance del potencial de generación de acidez (AP) y el potencial de neutralización (NP), y es utilizado para determinar el ácido producido y ácido consumido por los componentes minerales que se encuentran en la muestra del residuo minero.

La diferencia entre estos dos valores, el potencial neto de neutralización (NNP) permite la clasificación de la muestra como un residuo minero generador o consumidor potencial de ácido.

Para facilitar la comparación de los valores del NP, AP y el PNN; estos expresados en unidades de toneladas de $CaCO_3$ por tonelada de residuo minero.

El potencial de ácido es determinado por análisis del total de sulfuros y el cálculo del potencial ácido (AP) asumiendo una total conversión de los sulfuros a sulfatos, y que 2 moles de H^+ son producidos por cada mol de pirita que se oxida.

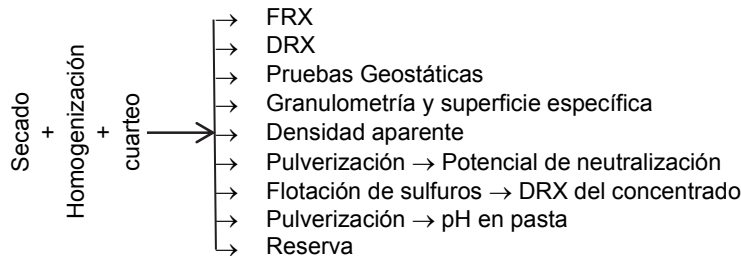


Figura 1. Flujograma del Tratamiento de la Muestra de Relave Minero Ponce Enríquez-Ecuador.
Fuente: Los autores.

El potencial de neutralización es determinado utilizando un procedimiento de titulación con un exceso de ácido clorhídrico, calentando para asegurarse que la reacción sea completa. La prueba FIZZ es empleada para conseguir que la cantidad de ácido adicionado sea suficiente para hacer reaccionar todos los minerales presentes en la muestra que son consumidores de ácido. El exceso de ácido es titulado por una base hasta el pH inicial de pasta del residuo; lo que permitirá calcular el carbonato de calcio que es equivalente al ácido consumido.

Finalmente, el potencial neto de neutralización (NNP), en toneladas CaCO₃ equivalente por toneladas de material está dado por:

$$NNP = NP - AP$$

La interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas estáticas se desarrolla a partir de los dos criterios:

El **primer criterio**, determina el valor de NNP a partir de la diferencia entre el valor NP menos AP. De acuerdo al valor del NNP, el residuo podrá ser considerado como generador (cuando el valor de NNP es menor a -20 Kg de CaCO₃/tonelada) o no generador de DAR (cuando el valor de NNP es mayor a +20 Kg de CaCO₃/tonelada), o encontrarse en la zona de incertidumbre, hecho que precisa llevar a cabo una prueba geoquímica dinámica.

Mientras que, en el **segundo criterio**, se debe determinar la relación entre NP/AP. Si la relación es menor a 1, el residuo es generador de DAR; por el contrario, si la relación es mayor a 1, el residuo es estable químicamente.

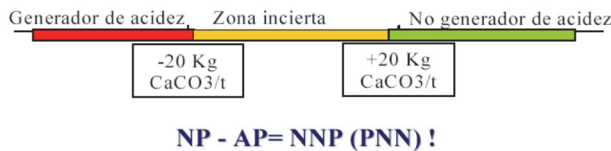


Figura 2. Primer criterio ABA.
Fuente: los autores.

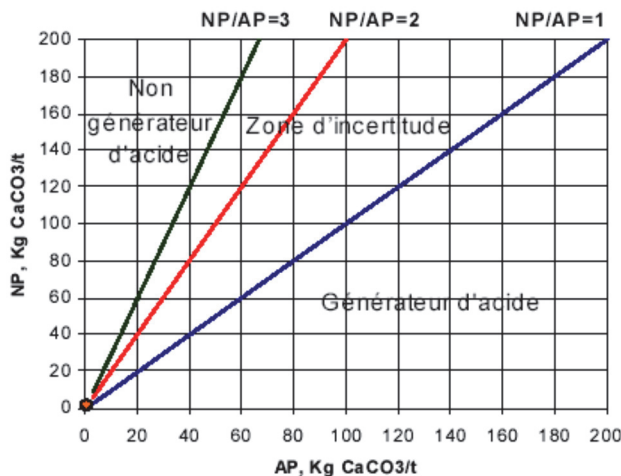


Figura 3. Segundo Criterio ABA.
Fuente: los autores

2.5. Metodología de las Pruebas Geoquímicas Dinámicas

Las pruebas geoquímicas dinámicas permiten someter a efectos de intemperismo extremo, muestras de residuos mineros, bajo condiciones controladas del laboratorio. Dichas pruebas se realizan en los casos en los que el valor del NNP, determinado mediante pruebas geoquímicas estáticas, se encuentra en la zona de incertidumbre; o en aquellos casos, en los que se desea determinar la tasa de generación de DAR y/o la carga de metales pesados que aportan los residuos al ecosistema circundante.

Es decir, mientras que las pruebas estáticas proporcionan información sobre las características de los desmontes y el potencial total para la generación de ácido, independientemente del tiempo; las pruebas cinéticas definen explícitamente las velocidades de reacción tanto para la disolución de metales, como para la generación de ácido y lixiviación, a través del tiempo y bajo condiciones específicas.

En consecuencia, las pruebas geoquímicas dinámicas son más caras y tardan más. Por tal razón, los objetivos de su realización, deben ser bien definidos con el fin de desarrollar un programa de pruebas eficiente y efectivo. Si bien se sabe que las pruebas dinámicas muestran el comportamiento geoquímico de la muestra para períodos cíclicos semanales, la predicción, a partir de los resultados obtenidos de la calidad de las soluciones de percolación, permite conocer el comportamiento del residuo en el futuro.

Existen diferentes tipos de pruebas que llamamos cinéticas; las diferencias entre ellas, están dadas por el tamaño de la prueba y la velocidad y cantidad de agua utilizada. Algunas, pueden ser realizadas en el terreno mismo (piezómetros, celdas de terreno); mientras que otras, se realizan en laboratorio, bajo condiciones que se acercan lo más posible a las del terreno. Asimismo, cada una tiende a ser utilizada para un tipo diferente de predicción.

Las pruebas cinéticas permiten además determinar el potencial de contaminación de un material cualquiera y de analizar escenarios de remediación como el efecto de un aditivo, la puesta en lugar de las coberturas, el efecto del nivel freático, etc.

En este estudio, se realizaron pruebas Geoquímicas Dinámicas en Celdas Húmedas [10,12]

Una celda de humidificación es una cámara climática diseñada para facilitar el control del ingreso del aire, temperatura y humedad; en ella, se simulan condiciones de intemperismo que asemejan las condiciones a las que el residuo minero se encuentra sometido en el lugar en el que se encuentra dispuesto.

Es decir, es un reactor que permite la oxidación de la muestra de residuo minero bajo condiciones extremas; generando así, información necesaria de predicción del comportamiento del mismo. El análisis físico-químico de los lixiviados recolectados permite predecir la tasa de generación de acidez del residuo minero estudiado; además de la calidad del drenaje generado en función del tiempo; y con ello, se puede entonces predecir el impacto ambiental que pueden generar los residuos sino se consideran medidas ambientales.

De las muestras preparadas, se determinó el potencial de generación de acidez (AP) y el potencial de neutralización (NP).

El potencial ácido AP de las muestras, en toneladas de

CaCO₃ por tonelada de residuo minero, fue determinado a partir de la siguiente relación: $AP = \text{Porcentaje de sulfuro} \times 31.25$

El porcentaje de sulfuros se determinó a partir de la relación:

$$\% \text{ Sulfuro} = \% \text{ STotal} - \% \text{ SO}_4^{=} / 2.996$$

El potencial de neutralización fue determinado utilizando un procedimiento de titulación con un exceso de ácido clorhídrico, calentando para asegurarse que la reacción sea completa. La prueba FIZZ es empleada para conseguir que la cantidad de ácido adicionado sea suficiente para hacer reaccionar todos los minerales presentes en la muestra que son consumidores de ácido. El exceso de ácido es titulado por una base hasta el pH inicial de pasta del residuo; lo que permitirá calcular el carbonato de calcio que es equivalente al ácido consumido.

Es decir, el potencial de neutralización NP de la muestra está dado por:

$$NP = \frac{50a \left[x - \left(\frac{b}{a} \right) y \right]}{c}$$

NP = potencial de neutralización en toneladas de CaCO₃ por tonelada.

A = normalidad del HCl.

B = normalidad de NaOH

c = peso de muestra en gramos

x = volumen del HCl añadido en ml.

Y = Volumen de NaOH añadido hasta pH 7.0 en ml.

Finalmente, el potencial neto de neutralización (NNP), en toneladas CaCO₃ equivalente por toneladas de material está dado por:

$$NNP = NP - AP \text{ (kg CaCO}_3 \text{ / ton Residuo Minero)}$$

La Fig. 4, muestra la batería de una celda húmeda montada para la realización de pruebas.

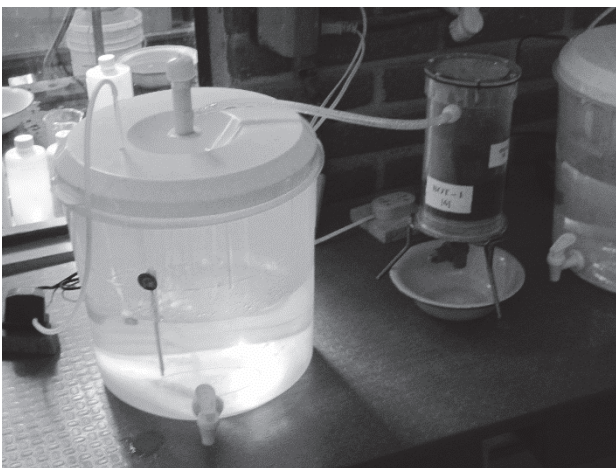


Figura 4. Celda de humidificación.

Fuente: los autores

Para la carga de cada una de las pruebas, se pesaron 500

gramos de muestra, preparada según el flujograma presentado en la Fig. 1.

El periodo de duración de cada ciclo fue de 7 días. Las pruebas se realizaron de acuerdo a la Norma ASTM (D 5744-96).

Después de la circulación de aire seco a través de la muestra durante 3 días, se hizo circular aire húmedo durante otros 3 días; para finalmente, efectuar el enjuague de la muestra al séptimo día con 500 ml de agua desionizada; el volumen de la solución de dicho proceso de enjuague fue determinado y, previa preservación, se enviaron las muestras a SPECTROLAB para ser sometidas al análisis físico-químico respectivo; para luego, iniciar un nuevo ciclo.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de la caracterización química

En la Tabla 1, se presentan los resultados de la caracterización química de la muestra de relave objeto de estudio.

3.2. Resultados de la caracterización mineralógica

Con el fin de identificar las especies sulfuradas presentes en la muestra de relave, se realizó la flotación bulk de sulfuros y el concentrado de sulfuros para determinar con mayor precisión los componentes "acidogénicos" presentes en la muestra. Mediante análisis DRX sobre los productos obtenidos se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 2.

También se determinó la densidad específica de la muestra, siendo esta de 2,5571 gr/cm³. En la Fig. 5, se muestra los resultados del análisis granulométrico de la muestra estudiada.

Tabla 1.

Análisis Químico de la Muestra de Relave Minero (Ponce Enríquez-Ecuador). Fuente: los autores

Parámetro	Valor (%)
Antimonio (Sb)	< 0,03
Arsénico (As)	0,12
Calcio (Ca)	1,22
Cadmio (Cd)	<0,01
Cobre (Cu)	0,13
Hierro (Fe)	11,51
Magnesio (Mg)	3,07
Plomo (Pb)	<0,03
Zinc (Zn)	0,06
Sulfatos (SO ₄ =)	0,03
Azufre (S)	5,84

Fuente: los autores

Tabla 2.

Resultados del análisis DRX. (* minerales acidogénicos).

Mineral	Unidad	Valor
Esfalerita *	%	8
Pirita *	%	20
Calcopirita *	%	3
Arsenopirita *	%	35
Tetraedrita *	%	2
Pirrotina *	%	18
Oro (III) Teluro	%	3
Krennerita	%	3
GANGA		
Silice	%	8

Fuente: los autores

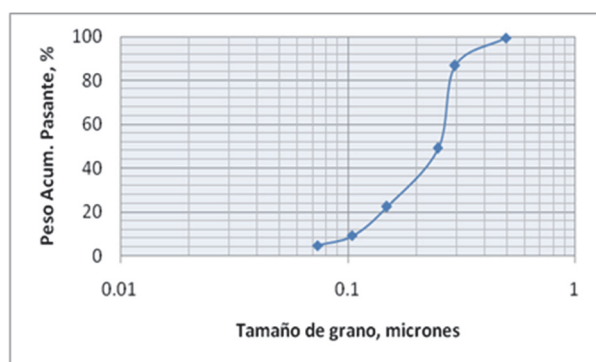


Figura 5. Análisis Granulométrico de la Muestra de Relave Minero.
Fuente: los autores

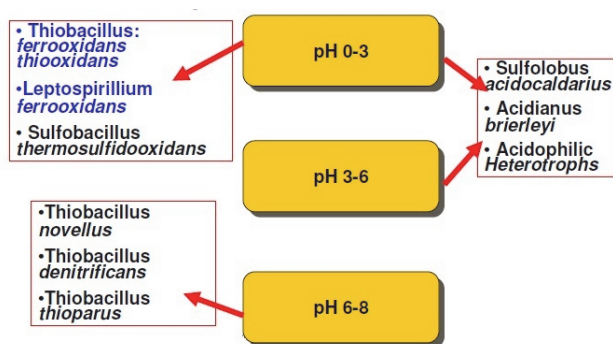


Figura 6.- Relación del valor de pH pasta y la presencia de microorganismos.
Fuente: los autores

Tabla 3.
Resultados del Potencial Neto y de Neutralización de la Prueba Geoquímica Estática.

Parámetro	Unidad	Valor
S total	%	5,84
Sulfato	%	0,03
Sulfuro	%	5,83
NP	kg CaCO ₃ /t	0,99
AP	kg CaCO ₃ /t	182,2
NNP	kg CaCO ₃ /t	-181,2
NP/AP	kg CaCO ₃ /t	0,0054

Fuente: los autores

3.3. Resultados de la caracterización bacteriológica

Se determinó el pH en pasta de la muestra de relave minero, que resultó ser de valor pH 5,5. La presencia de bacterias implicadas en la formación del drenaje ácido está directamente relacionada con el pH en pasta de acuerdo a la Fig. 6.

3.4. Resultados de las pruebas geoquímicas estáticas

Se determinó el Potencial Neutro (NP) y el Potencial Ácido (AP) de la muestra de relave minero con el fin de calcular el Potencial Neto de Neutralización (NNP). La Tabla 3, presenta los resultados de dichos cálculos.

Conforme al primer criterio mencionado, la muestra sería claramente generadora de drenaje ácido por ser el valor de NNP menor a -20 kg CaCO₃/t.

Aunque con este criterio ya sería suficiente, se llevó a cabo la aplicación del segundo criterio, según el cual si el valor de NP/AP es menor que la unidad, entonces el residuo sería considerado como generador de drenaje ácido, hecho que en este caso también se cumple con claridad.

3.5 Resultados de las pruebas geoquímicas dinámicas

Para el desarrollo de las pruebas geoquímicas dinámicas, se utilizó la celda húmeda construida y se realizaron ciclos de humidificación con una duración de 7 días por ciclo. Los resultados obtenidos de la muestra, se presentan a continuación.

3.5.1. Comportamiento Eh-pH-conductividad

Las gráficas siguientes muestran el comportamiento del potencial REDOX, el pH y la conductividad para cada ciclo de enjuague.

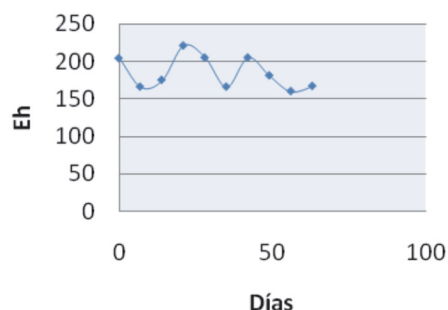


Figura 7.- Variación del Eh de la muestra.
Fuente: los autores

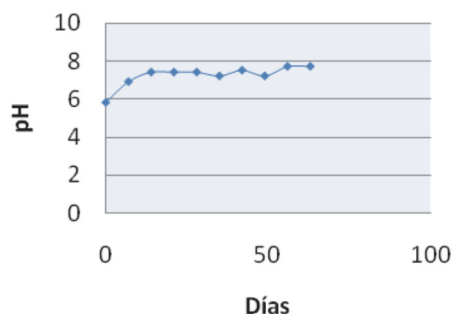


Figura 8.- Variación del pH de la muestra.
Fuente: los autores

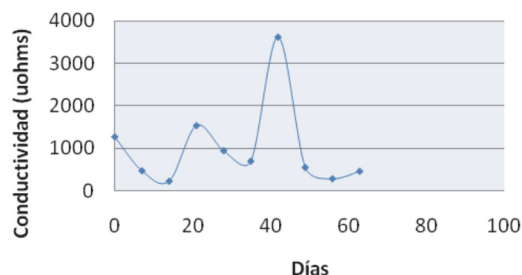


Figura 9.- Variación de la conductividad de la muestra.
Fuente: los autores

Tabla 4
Tasa de Generación de DAR de la Muestra.

Año	gr H ₂ SO ₄ /t
1	64,1841
2	58,4133
3	56,3716
4	56,3716
5	56,3716
6	57,1540
7	55,9960
8	57,1540
9	55,2741
10	55,2741
Total	572,5647

Fuente: los autores

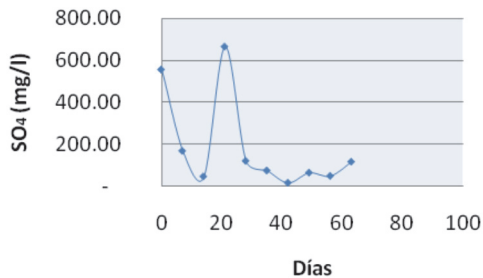


Figura 11.- Variación de la Concentración de Sulfato de la muestra.
Fuente: los autores

De las figuras anteriores es posible diferenciar tres etapas marcadas por el comportamiento del pH, Eh y la conductividad.

Teniendo en cuenta que los potenciales REDOX de las soluciones de enjuague de la muestra de relave minero objeto de estudio, se encuentran en el rango de 160 a 205 mV y los pHs entre 5.8 a 7.7. Por lo tanto se puede evidenciar en el diagrama Eh-pH del sistema Fe-S-H₂O presentado en la Fig. 10, que el FeOOH es la fase estable, aunque no se puede descartar la formación de jarositas.

La Tasa de Generación de DAR, a partir de los valores del pH, es presentada en la Tabla 4. Estos valores han sido referidos a gramos de H₂SO₄ por tonelada de residuo minero.

3.5.2. Comportamiento de iones

La variación de la concentración de SO₄= en función del tiempo, es presentada en la Fig. 11.

Como se puede observar en la Fig. 11, se tiene una tendencia descendente de las concentraciones de sulfato en las diferentes soluciones de enjuague en función del tiempo; aspecto que, podría hacer pensar que no se estaría generando drenaje ácido a partir del residuo minero estudiado. No hay que olvidar que la oxidación de los sulfuros, genera sulfato como producto de la reacción química.

Sin embargo, si representamos la eliminación del Sulfato vs Tiempo (Fig. 12); es decir, si le vamos restando la cantidad de sulfato disuelto a la cantidad inicial que existía en el mineral, veremos que se genera sulfato procedente de la oxidación de los sulfuros presentes.

Es decir, los valores negativos, expresan que existe un incremento con respecto al valor inicial; o sea que, se

demuestra que el SO₄= generado proviene de la oxidación de los sulfuros presentes, especialmente de la pirrotina y pirita.

La tendencia descendente de la gráfica, muestra que la oxidación de los sulfuros no ha sido agotada.

El poder neutralizante del mineral, puede confirmarse si se grafica el comportamiento del Calcio en función del tiempo. La representación de dicho comportamiento es presentado en la Fig. 13. En ésta, se puede corroborar que la concentración de iones calcio en las soluciones de enjuague disminuye de manera general en función del tiempo.

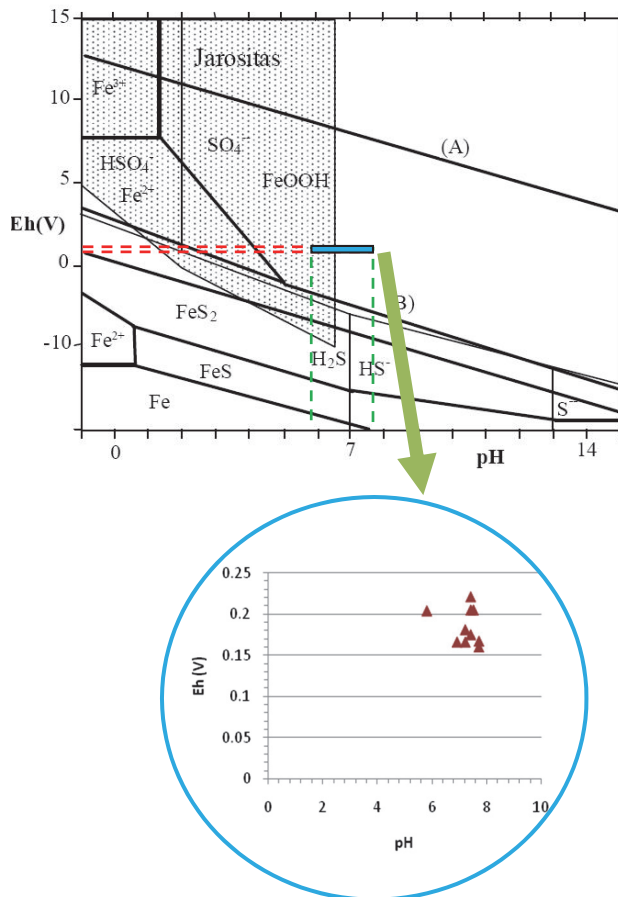


Figura 10.- Diagrama Eh – pH del Sistema Fe-S-H₂O a 25° C.
Fuente: los autores

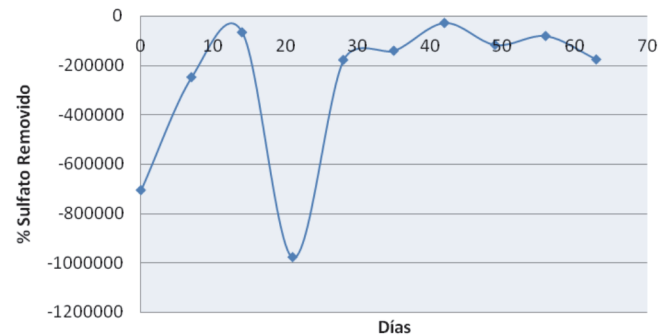


Figura 12.- Variación de la concentración de Sulfato de la muestra generadora de DAR.
Fuente: los autores

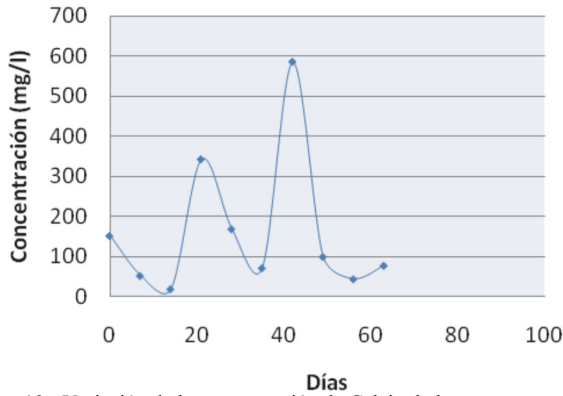


Figura 13.- Variación de la concentración de Calcio de la muestra.
Fuente: los autores

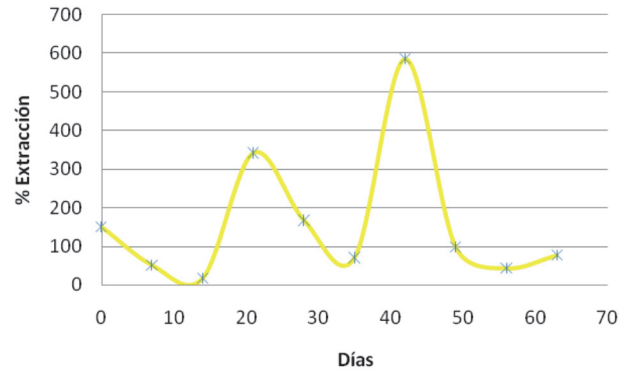
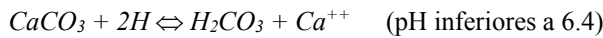
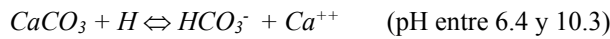


Figura 15.- Disolución Calcio en las pruebas geoquímicas dinámicas.
Fuente: los autores

Las dos reacciones, en función del valor del pH, que explican la presencia de Ca^{2+} en las soluciones de enjuague son:



El $CaCO_3$ descrito en las dos reacciones anteriores, puede representar a los minerales acidívoros presentes en el residuo minero (roca de caja, aditivos de cal, u otros).

Es decir que, la acidez generada por las reacciones de oxidación de los sulfuros, principalmente pirrotina y piritita, inmediatamente es neutralizada por los minerales de la roca de caja o aditivos de cal, presentes en el residuo minero. Producto de dicha neutralización, los iones Ca^{2+} se encuentran en la solución de enjuague.

Por lo expuesto, deberá existir una correlación lineal entre la cantidad de Calcio Acumulado versus la cantidad de Sulfato Acumulado.

Finalmente, para completar con el análisis geoquímico, se muestra en la Fig. 14, la disolución de los metales pesados As, Pb, Cd, Cu, Fe y Zn, además en la Fig. 15, la disolución de Calcio.

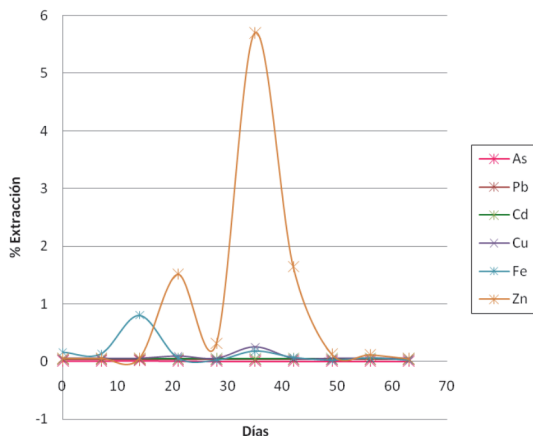
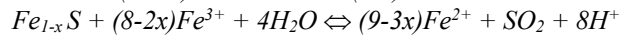
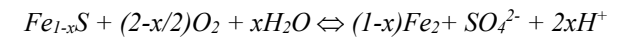
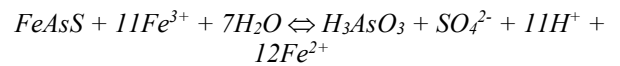
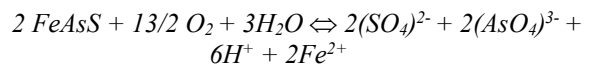
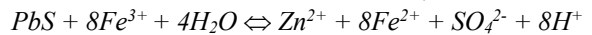
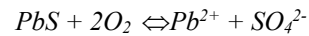
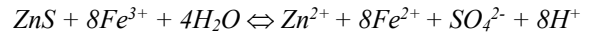
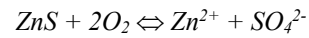
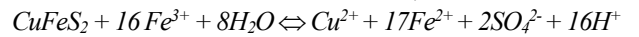
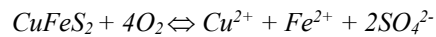


Figura 14.- Disolución de los metales pesados en las pruebas geoquímicas dinámicas.
Fuente: los autores

La presencia de metales pesados en las soluciones de enjuague se debe probablemente a las posibles siguientes reacciones químicas:



De las Figs. 14 y 15, es posible establecer lo siguiente:

- El As, Pb y Cd pueden pasar a la solución pero en baja proporción. Por lo que, su presencia en las soluciones de enjuague puede ser que sea en forma de complejos.
- El Fe, Cu y Zn son considerados como los mayores fuentes de generación de metales pesados. Dicha aseveración, corrobora los datos de las tasas de generación de acidez presentados en la Tabla 4.
- La tasa de disolución de Ca procedente del aditivo presente en el relave y de los minerales presentes en la roca de caja es limitado.
- Finalmente, las tasas de generación acumuladas por año de metales pesados por tonelada de residuo minero, se presentan en la Tabla 5.

3.5.3. Relación entre los elementos neutralizantes (Ca) y los productores de acidez (SO_4)

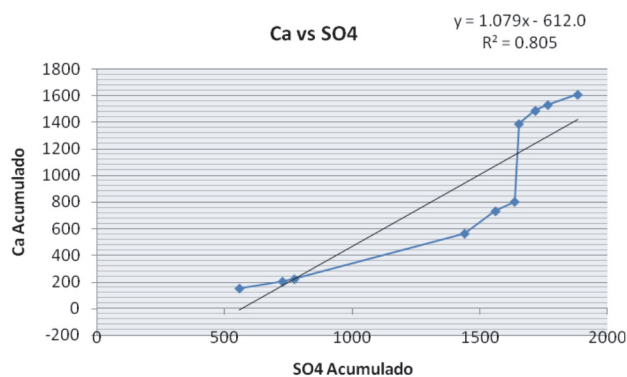
Para poder establecer la correlación entre los minerales acidívoros y los acidogénicos, es necesario representar el comportamiento de los valores acumulados de Ca frente a

Tabla 5

Tasa de generación acumulada de metales pesados de la muestra.

AÑO	Zn (g/t)	As (g/t)	Pb (g/t)	Cd (g/t)	Cu (g/t)	Fe (g/t)
1	0,2631	0,0315	0,1578	0,2631	0,2631	0,8421
2	0,4545	0,0590	0,2727	0,4545	0,4545	1,3181
3	0,7142	0,1095	0,4285	0,7142	0,7142	5,190
4	7,5454	0,1318	0,5454	0,9090	1,0909	5,2272
5	8,9545	0,1409	0,6818	1,1363	1,3181	5,3181
6	27,3928	0,1214	0,6428	1,0714	1,9285	4,8214
7	38,0000	0,1469	0,8571	1,4285	2,4081	5,7959
8	34,9259	0,1407	0,8888	1,4814	2,3703	5,3333
9	38,9387	0,1632	1,1020	1,8367	2,8163	6,1224
10	42,5777	0,1866	1,3333	2,2222	3,2888	6,7555

Fuente: los autores

Figura 16.- Correlación entre Ca y SO₄ acumulados de las pruebas geoquímicas dinámicas.

Fuente: los autores

SO₄=. La Fig. 16 muestra los resultados obtenidos, en la que también se muestra un ajuste lineal de los datos.

3.5.4 Interpretación final del potencial de acidificación de los residuos

Aplicando los criterios de clasificación de los residuos mineros descritos, dado que el relave minero objeto de estudio tiene un valor del Potencial Neto de Neutralización (NNP) menor a $-20 \text{ Kg CaCO}_3/\text{ton}$ y una relación de NP/NA menor a la unidad, se puede considerar que los relaves en cuestión son generadores de drenaje ácido de roca, y por tanto químicamente inestable. Esto indicaría que en la etapa de operaciones mineras, se deben tomar las medidas de gestión de control del drenaje ácido y que en la fase de cierre de la operación minera, serán requeridas medidas de remediación.

4. Conclusiones

De la caracterización química y mineralógica del relave minero estudiado, se determinó que los minerales acidogénicos o generadores de drenaje ácido mayormente presentes en el residuo minero estudiado son pirrotina, pirita, esfalerita, arsenopirita y tetraedrita; también se detectó la presencia de oro (III), telurio y krennerita. Por otra parte, los minerales acidívoros o consumidores de drenaje ácido son minerales presentes en la roca encajante como los feldespatos o CaO. La ganga en su mayoría es sílice.

De la caracterización bacteriológica, se evidencia la presencia de poblaciones bacteriales de los géneros

Sulfolobus acidocaldarius, *Acidianus brierleyi*, *Acidophilic Heterotrophs*; su valor de pH en pasta conduce a pensar que el relave se encontraría en la Fase I de formación de drenaje ácido.

Se realizó una estimación de la carga de metales pesados acumulada a 10 años, que aportaría el relave minero generador de DAR. Igualmente, mediante las pruebas geoquímicas se determinó el potencial ácido y el potencial neutro, así como el potencial neto de neutralización, lo que permitió aplicar los dos criterios y concluir por ambos que el residuo minero tiene un alto potencial de generación de drenaje ácido, por lo que se deben tomar las medidas oportunas tanto en las fases de operación como en las fases de cierre de la mina.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno de Ecuador por el apoyo recibido dentro del programa de becas Prometeo.

Referencias

- [1] Nordstrom, D.K. and Alpers, C.N., Geochemistry of acid mine waters. The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, 6 A, pp. 133-160, 1999.
- [2] Blowes, D.W., Ptacek, C.J. and Jurjovec, J., Mill tailings: Hydrogeology and geochemistry. In: Buckby, R.A., Otton, J.K. and Johnson, C.A., Eds., Environmental Aspects of Mine Wastes, Mineralogical Association of Canada, 31, 2003.
- [3] Evangelou, V.P. and Zhang, Y.L., A review: Pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 25(2), pp. 141-199, 1995. DOI: 10.1080/10643389509388477
- [4] Lindsay, M.B.J., Condon, P.D., Jambor, J.L., Lear, K.G., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J. Mineralogical, geochemical, and microbial investigation of a sulfide-rich tailings deposit characterized by neutral drainage. Applied Geochemistry, 24(12), pp. 2212-2221, 2009. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.09.012
- [5] Carling, G.T., Diaz, X., Ponce, M., Perez, L., Nasimba, L., Pazmino, E., Rudd, A., Merugu, S., Fenandez, D.P., Gale, B.K. and Johnson, W.P., Particulate and dissolved trace element concentrations in three southern Ecuador rivers impacted by artisanal gold mining, Water, Air, and Soil Pollution 224(2), pp. 1415, 2013. DOI: 10.1007/s11270-012-1415-y
- [6] Appleton, J.D., Williams, T.M., Orbea, H. and Carrasco, M., Fluvial contamination associated with artisanal gold mining in the Ponce Enriquez, Portovelo-Zaruma and Nambija Areas, Ecuador, Water, Air, and Soil Pollution 131(1), pp 19-39, 2001. DOI: 10.1023/A:1011965430757
- [7] Tremolada, J., Dzioba, R., Bernardo-Sánchez, A. and Menéndez-Aguado, J.M., The preg-robbing of gold and silver by clays during cyanidation under agitation and heap leaching. International Journal of Mineral Processing, 94(1-2), pp. 67-71, 2010. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.12.001
- [8] Martínez, E.A., Tobón, J.I. and Morales, J.G., Coal acid mine drainage treatment using cement kiln dust. DYNA, 81(186), pp. 87-93, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n186.38834
- [9] Parbhakar-Fox, A.K., Edraki, M., Walters, S. and Bradshaw, D., Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage. Minerals Engineering, 24(12), pp. 1277-1287, 2011. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.04.019
- [10] Sapsford, D., Bowell, R., Dey, M., Williams, C. and Williams, K., A comparison of kinetic nag tests with static and humidity cell tests for the prediction of ARD. Mine Water and the Environment, pp. 325-328, 2008.

- [11] Verburg, R., Bezuidenhout, N., Chatwin, T. and Ferguson, K., The global acid rock drainage guide (GARD Guide). *Mine Water and the Environment*, 28(4), pp. 305-310, 2009. DOI: 10.1007/s10230-009-0078-4
- [12] Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Material Using A Modified Humidity Cell, Designation D 5744-96, 2001.
- [13] Barazzoul, L., Sexsmith, K., Buckham, C. and Lopex, D., Application of an advanced mineralogical technique: Sulphide mineral availability and humidity cell interpretations based on MLA analysis. 9th International Conference on Acid Rock Drainage, 2012.
- [14] Paktunc, A.D., Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. *Environmental Geology*, 39(2), pp. 103-112, 2000. DOI: 10.1007/s002540050440

E. Peña Carpio, es graduada en Ing. Geológica por la Universidad de Guayaquil, Ecuador y Dra. por la Universidad Politécnica de Madrid, España desde 1995, y Profesora Titular de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador. Su principal ámbito de trabajo es el impacto ambiental de las operaciones de Mineralurgia y Metalurgia Extractiva.
ORCID: 0000-0001-9362-4506

J.M. Menéndez-Aguado, es Ing. de Minas y Dr. por la Universidad de Oviedo, España, donde es profesor desde el año 1999. Es profesor visitante de varias universidades en Argentina, Colombia, Cuba, Ecuador y Venezuela. Su principal ámbito de investigación es la Mineralurgia, con énfasis en la eficiencia energética en molienda, procesos de separación
ORCID: 0000-0002-6216-6984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68