



Generalidades sobre la Evaluación Geoquímica Ambiental para Proyectos Mineros en Colombia

Overview of Environmental Geochemical Assessment for Mining Projects in Colombia

Por: JUAN PABLO SALAZAR GIRALDO
colombiano, Geólogo, PhD Ingeniería,
Instructor
Centro de Recursos Naturales Renovables -
La Salada, Servicio Nacional de
Aprendizaje – SENA, Regional Antioquia.
Email jpsalazar@sena.edu.co

Resumen

Se presenta en este artículo de revisión, una explicación y discusión de las exigencias ambientales a nivel de ensayos geoquímicos, solicitados bajo la Resolución 2206 del 2016, por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales- ANLA a las empresas mineras y su interpretación para fines del manejo ambiental.

La actividad minera bajo tierra y a cielo abierto en sus procesos de exploración, explotación, beneficio y cierre, se caracterizan por apertura de vías y túneles, destape de frentes rocosos, voladuras, movimiento de tierras y rocas, y transformación de minerales (procesos metalúrgicos), que entre otros ponen en contacto minerales especialmente sulfuros con oxígeno atmosférico, aguas superficiales y bacterias quimiotróficas; lo que conlleva a una serie de reacciones químicas (oxidación, hidrólisis, complejación, disolución), que causan impactos ambientales significativos asociados al aumento de acidez en aguas y presencia de metales pesados y metaloides en aguas superficiales y subterráneas.

El documento parte del análisis de los dos principales impactos ambientales mineros, como son el drenaje ácido de minas y la contaminación química por metales pesados, para pasar luego a conocer la normatividad colombiana de calidad de aguas residuales, aplicada a minería y se finaliza con una exposición y discusión de los ensayos exigidos y otros complementarios (no exigidos), que son tomados como base para formular los planes de manejo ambiental.

Palabras Claves: geoquímica ambiental, drenaje ácido de minas, elementos potencialmente tóxicos, removilización de metales, pruebas estáticas y dinámicas.

Abstract

This review article presents an explanation and discussion of the environmental requirements at the level of geochemical tests requested under Resolution 2206 of 2016, by the National Environmental Licensing Authority- ANLA to mining companies and their interpretation for environmental management purposes.

Underground and open pit mining activities in their exploration, exploitation, beneficiation and closure processes are characterized by the opening of roads and tunnels, uncovering of rock faces, blasting, earth and rock movement, and transformation of minerals (metallurgical processes), which, among others, bring minerals, especially sulfides, into contact with atmospheric oxygen, surface water and chemotrophic bacteria; which leads to a series of chemical reactions (oxidation, hydrolysis, complexation, dissolution) that cause significant environmental impacts associated with increased

acidity in water and the presence of heavy metals and metalloids in surface and groundwater.

The document starts with the analysis of the two main mining environmental impacts such as acid mine drainage and chemical contamination by heavy metals, and then goes on to learn about the colombian regulations on wastewater quality applied to mining and ends with an exposition and discussion of the required tests and other complementary ones (not required), which are taken as a basis for the formulation of environmental management plans.

Keywords: environmental geochemistry, acid mine drainage, potentially toxic elements, metal remobilization, static and dynamic testing.

Introducción

La explotación minera y los relaves generan impactos ambientales asociados a los desechos producidos y por la presencia de metales pesados y traza asociados (Candeias, 2017; Agboola et al., 2020). Esta actividad ha jugado un papel fundamental en procesos de contaminación química a través de un incremento en la concentración de metales tóxicos en el ambiente (Fashola et al., 2016). Los impactos se relacionan no solo a las concentraciones presentes en aguas, sedimentos, suelos y relaves, sino a los grados de toxicidad dependientes de estados de oxidación, complejación, movilidad, geo y biodisponibilidad en el ambiente (Reeder and Schoonen, 2006). Elementos tóxicos tales como arsénico, plomo y mercurio son especialmente peligrosos aún a bajas concentraciones (Jaishankar et al., 2014).



Además del impacto ambiental asociado a la removilización de metales pesados, yacimientos mineros en especial de oro y metales base, así como de carbón, presentan sulfuros especialmente de hierro (pirita, calcopirita, pirrotita), cuya oxidación produce acidez, lo que genera el drenaje ácido de minas (Blowes, et al., 2003). La acidez generada ocasiona removilización de los metales tóxicos a cuerpos de agua y a los suelos, en especial cuando el pH es menor a 6 (Ministerio de Minas y Energía, y Asesorías Técnicas Geológicas-ATG LTDA, 2021).

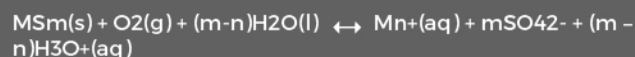
Los ensayos estáticos y cinéticos de los materiales mineros son fundamentales para poder predecir y medir la probabilidad que tienen estos desechos para generar drenaje ácido de minas y su potencial de liberación y removilización de elementos tóxicos al ambiente (Gautama and Kusuma, 2008; Bouzahzah et al., 2014; Dold, 2017). Aunque los resultados de los ensayos presentan importantes niveles de incertidumbre son realmente valiosos para comprender los cambios fisicoquímicos y biológicos que se presentan sobre los residuos mineros (Maest et al., 2005).

El Drenaje Ácido de Minas (DAM) y la Liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's)

Los procesos de alteración química, mediadas por bacterias acidófilas de sulfuros metálicos tales como pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), enargita (Cu_3AsS_4), arsenopirita (FeAsS), entre otros, presentes en los yacimientos minerales son los principales generadores de acidez (Plumlee, 1999).

La alteración se inicia cuando se exponen los sulfuros (MSm) a ambientes rico en oxígeno ($\text{O}_2(\text{g})$) y agua, en donde procesos de oxidación química (Con O_2 y

Fe^{3+}), mediada por bacterias genera metales solubles (Mn^{+}), sulfatos (SO_4^{2-}) y acidez (H_3O^{+}), como lo indica Montes-Atenas (2022):



s: fase sólida o. mineral

g: fase gaseosa

l: fase líquida

En un segundo momento el proceso de hidrólisis de los metales que están en fase soluble (aq), aumenta la acidez del drenaje ácido (Montes-Atenas, 2022):



Cuando los valores de pH se registran por debajo de 4.5, es indicativo de procesos de oxidación catalizados por bacterias acidófilas del género *Thiobacillus* tales como *Thiobacillus ferrooxidans*, y bacterias neutrófilas del género tales como *Leptothrix* sp., entre otras (Wolkersdorfer, et al., 2020; Klein et al., 2013). Se han registrado casos de valores de pH negativos (Nordstrom et al., 2000). En Colombia este tipo de drenajes se le conoce comúnmente como “Capa Rosa” y se generan por la precipitación conjunta de hidróxidos y óxidos de Fe (Figura 1).

Los Elementos Potencialmente Peligrosos EPT's, comprenden el conjunto de elementos traza metales y metaloides tales como As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn, presentes en el DAM, relaves, suelos mineros e inclusive estériles, cuyas formas químicas disponibles (Coprecipitados, intercambiables, carbonatos, sulfuros y complejos organometálicos), afectan de forma severa las condiciones ambientales y son un riesgo para la salud (Kavamura y Esposito, 2010; Masciandaro et al., 2013; Pourret and Hursthouse, 2019).



FIGURA 1: PRODUCTO DE LA OXIDACIÓN DE SULFUROS EN MINERÍA DE CARBÓN (MINA LA MARGARITA TITIRIBÍ- ANTIOQUIA). SALAZAR (2014)

Los elementos potencialmente tóxicos en su mayoría provienen directamente de la oxidación de sulfuros; estos pueden quedar en forma compleja y soluble en el agua ácida o precipitando como sulfatos secundarios que suelen verse alrededor del drenaje ácido (Figura 2).



FIGURA 2: FORMACIÓN DE SULFATOS, ALREDEDOR DEL DRENAJE ACIDO (MINERALIZACIÓN BLANCA), GENERADO EN UN RELAVE EN LA MINA NACÓZARI EN MÉXICO. SALAZAR (2018)

Normatividad Ambiental

En cuanto a vertimientos el artículo 10 de la Resolución 631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), establece el rango del pH para aguas residuales mineras (6,00 a 9,00), y las

concentraciones máximas de algunos elementos potencialmente tóxicos (Tabla 1).

TABLA 1: CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN AGUAS RESIDUALES MINERAS

Elemento	Concentración Máxima (mg L ⁻¹)
As	0,1
Cd	0,05
Cr	0,5
Cu	1,0
Hg	0,002
Ni	0,5
Pb	0,2
Zn	3,0

MODIFICADO Y ADAPTADO DE MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (2015)

Como puede verse en la tabla anterior, sólo se aplica a elementos tóxicos presentes en vertimientos mineros, si bien Colombia presenta un marco legal al fijar límites máximos permisibles, y obliga al sector minero a diseñar e implementar tecnologías activas y pasivas de tratamiento del agua, no hay una norma nacional que establezca límites máximos de elementos potencialmente tóxicos en relaves, estériles y otro tipo de residuos sólidos mineros. De ahí que, independientemente de los resultados que se obtengan de análisis de elementos totales en un relave, cola de minas o en un botadero, no hay forma legal de comparar estos valores con un límite máximo.

Por otro lado, la resolución vigente 2206 del 2016 -Términos de Referencia para la Elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental- (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2016), establece los estudios mínimos requeridos (Tabla 2). Como puede verse en la tabla anterior, sólo se aplica a elementos tóxicos presentes en vertimientos



mineros, si bien Colombia presenta un marco legal al fijar límites máximos permisibles, y obliga al sector minero a diseñar e implementar tecnologías activas y pasivas de tratamiento del agua, no hay una norma nacional que establezca límites máximos de elementos potencialmente tóxicos en relaves, estériles y otro tipo de residuos sólidos mineros. De ahí que, independientemente de los resultados que se obtengan de análisis de elementos totales en un relave, cola de minas o en un botadero, no hay forma legal de comparar estos valores con un límite máximo.

Por otro lado, la resolución vigente 2206 del 2016 -Términos de Referencia para la Elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental- (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2016), establece los estudios mínimos requeridos (Tabla 2).

TABLA 2: PRUEBAS GEOQUÍMICAS EXIGIDAS EN LOS TÉRMINOS DE REFERENCIA

Exigencia	Tipo de Prueba
Caracterización geoquímica del yacimiento y del sitio donde se dispondrán los sobrantes.	Muestreo intensivo y aplicación de modelos geoquímicos.
Establecimiento de potencial de generación del DAM y de lixiviación (liberación) de metales.	Prueba Balance Acido Base (BAB). Caracterización mineralógica. Ensayos Cinéticos en especial las pruebas de columna. Ensayos de lixiviación a corto plazo: MWMP ó BC SWEP.
Clasificación de materiales geológicos a partir de pruebas estáticas y cinemáticas.	

PRUEBAS EXIGIDAS EN LOS TÉRMINOS DE REFERENCIA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS EIA, PROYECTOS DE EXPLOTACIÓN MINERA. SALAZAR (2016)

Los análisis presentados en la Tabla 2 indican que, aunque si se tienen exigencias de análisis de relaves y/o estériles para evaluar su posibilidad de generar drenaje ácido ó de liberar y removilizar elementos

potencialmente tóxicos, queda a discreción de la autoridad ambiental interpretar, analizar y exigir tanto pruebas complementarias como medidas de manejo ambiental a las empresas mineras.

En Colombia, a través de la página de seguimiento a los proyectos por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA (<https://www.anla.gov.co/todos-los-proyectos/interes-en-seguimiento>), se puede analizar las condiciones de otorgamiento de licencias ambientales y los seguimientos a proyectos de minería. Para el momento de la elaboración del presente artículo, es posible conocer algunos como : Cerrejón y La Jagua, entre otros.

Proyectos mineros que hayan obtenido licencia ambiental sea por el ANLA o Corporaciones Autónomas Regionales, hace suponer que han presentado los análisis de las pruebas geoquímicas y que sus resultados han sido tomados como base para establecer medidas de prevención, mitigación y control ambiental. Sin embargo, los resultados de pruebas geoquímicas por lo general quedan a discreción de las empresas mineras.

Las Pruebas Geoquímicas Exigidas en los Términos de Referencia

Se explica y discute brevemente algunas de las pruebas exigidas por los Términos de Referencia:

- **Balance Acido Base (BAB):** este ensayo estático estima la cantidad de ácido que podría generar la muestra por oxidación total de la pirita o sulfuro contenido en el material y la cantidad de ácido que puede neutralizar este material (Amira, 2002;

Sutthirat, 2011); se basa en los análisis de pH en pasta, cálculo del azufre en forma de sulfuro y medición del potencial de neutralización. El balance parte de la determinación de la capacidad de acidez (método Sobek modificado), determinado el azufre en forma de sulfuros y la determinación de la capacidad de neutralización a partir de la titulación de los carbonatos presentes (Amira, 2002).

Este análisis permite determinar qué partes de un depósito mineral presentan una mayor probabilidad de generar acidez y cuáles asociaciones litológicas tienen mayor capacidad de neutralización (combinado con modelos geoquímicos basados en mediciones de elementos en campañas de sondeo).

Los resultados le podrían permitir a los responsables de las explotaciones mineras hacer “mezclas y combinaciones” en los botaderos de ambos tipos de material (previos ensayos de campo), para mitigar la capacidad generadora de drenajes ácidos de minas.

Una desventaja de este método es que el balance no considera condiciones ambientales del emplazamiento de la mina, la actividad microbiológica y otros factores a nivel hidrológico que pueden ser propios de cada zona minera.

- **Caracterización Mineralógica:** los análisis mineralógicos semicuantitativos por mineralogía óptica, mediciones SEM-EDX o SEM-DRX (microscopía electrónica de barrido-SEM, acoplado a difracción), permiten determinar asociaciones minerales de las muestras analizadas, y buscan establecer la presencia de sulfuros potencialmente generadores de acidez (Lapakko, 2002).

Este segundo ensayo facilita la identificación de asociaciones minerales ricas en sulfuros, con potencial de oxidarse, sumado a los elementos con los cuales están asociados; por ejemplo, esta tecnología sirve para reconocer la presencia de sulfuros tales como galena que es fuente de Pb y la arsenopirita de As. Otra de sus bondades es que el análisis óptico admite clasificar los minerales en su estado de alteración que permita un mayor acercamiento a la evaluación de la capacidad generadora de acidez (Parbhakar-Fox et al., 2011). El análisis está bajo la Norma ASTM E1508-12A.

- **Ensayos Cinéticos de Columna:** en los ensayos de columna (inclusive los de celdas de humedad), se hace circular agua a través de una muestra sólida de relaves ó estéril, para establecer la carga de metales, aniones (sulfatos y cloruros), pH, potencial redox y conductividad eléctrica del lixiviado, estas pruebas duran entre 6 y 8 meses con lecturas semanales (Amira, 2002). Los ensayos de humedad bajo la norma ASTM D5744.

Estos estudios indican de una manera empírica, el comportamiento del pH durante el período de análisis, en conjunto con los metales y sulfatos que se pueden liberar; no obstante, dado que las celdas de humedad corresponden a un ensayo de laboratorio bajo condiciones de control con ciclo de humedad (3 días), ciclo seco (3 días) y un ciclo de lavado (1 día), no reflejan de manera exacta el pH del lixiviado y los elementos y su concentración a generarse.

- **Ensayo de Lixiviación Meteoric Water Mobility Procedure – MWMP (Norma ASTM E2242):** prueba cinética entre 24 y 48 horas que consiste en hacer



pasar agua destilada-desionizada a través del material de análisis (Menor a 2 pulgadas). El lixiviado generado se recoge y se filtra para análisis de pH, Eh, Sulfatos y Elementos Potencialmente Tóxicos (ASTM, 2012).

- **Ensayo de Lixiviación British Columbia Special Waste Extraction Procedure – BC SWEP:** prueba de lixiviación de 24 horas, consiste en hacer pasar una solución levemente ácida (HCl 0,1 N) a través del material de análisis. El lixiviado se recoge y se filtra para análisis de pH, Eh, Sulfatos y Elementos Potencialmente Tóxicos (INAP 2011). Los ensayos MWMP y BC SWEP, aunque son más rápidos que los ensayos de columna y celdas de humedad (Ciclos entre 24 y 48 horas), no son adecuados para predecir el pH del posible drenaje generado más rápidos, además el reactivo usado para la prueba BC SWEP es agresivo en la medida que es ácido diluido y los valores generados podrían sobreestimar lo que realmente puede ser liberado.

Otras pruebas de lixiviación rápida

Además de las pruebas MWMP y BC SWEP, autores como Hageman et al (2014), presenta ensayos tales como SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) y USGS FLT (Test de lavado de campo), sumado a ensayos rápidos de campo (Diehl et al., 2006). Estas otras pruebas, podrían ser usadas como fase preliminar de los posibles metales liberados y proceder a los exigidos por la resolución 2206 del 2016.

Interpretación de los resultados de los análisis

La interpretación de los resultados permite indicar a la empresa minera, medidas tales como: mezcla de

materiales (Generadores Vs. Neutralizadores) para mitigar la generación, diseño de sistemas de tratamiento fisicoquímico o biológico (Humedales de flujo subsuperficial) en el caso de drenajes ácidos generados y ricos en EPT's. En esta misma dinámica, el diseño de medidas para prevenir la generación especialmente en botaderos y presas de colas mineras, mediante la aplicación de capas de caliza o cal, arcilla y establecimiento de sistemas de control de EPT's para suelos, botaderos y colas de minas, a través de procesos fisicoquímicos o biológicos (Fitorremediación), para cumplir la norma de vertimientos.

Conclusiones

La presencia de sulfuros en explotaciones metálicas y en mantos de carbón, puede ser el origen de drenajes ácidos de minas (DAM), y de liberación de elementos potencialmente tóxicos; por lo que se requiere de un diagnóstico de las condiciones químicas de drenajes mineros y los estériles generados. Sin excepción, toda actividad minera debe cumplir las dos exigencias regulatorias: resoluciones 631 del 2015 y 2206 del 2016. Para determinar el potencial contaminante de materiales geológicos, se tienen ensayos estáticos y dinámicos, que identifican el potencial de liberación de drenajes ácidos, como también la liberación de metales y sulfatos. Los resultados obtenidos, son la base para tomar medidas de manejo ambiental tales como sistemas de tratamiento de aguas mineras, medidas de control en relaves y botaderos de minas.

Recomendaciones

Toda empresa minera por norma, debe determinar el potencial contaminante de sus materiales geológicos; por consiguiente, se cuenta con

entidades consultoras tanto a nivel nacional como internacional con capacidad técnica para realizar estos análisis. Los estudios del probable impacto ambiental no se limitan a los componentes minerales observables a simple vista, es necesario los análisis químicos identificados en este artículo.

Referencias

- [1] Agboola, O., Babatunde, E. D., Ojo, S. I., Rotimi, S. E., Popoola, P., Moropeng, L., Yahaya, A., and Mamadu, O. A. (2020). A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management. *Results in Engineering*, 8 100181, 1 – 23. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100181>
- [2] AMIRA International (2002). *ARD Test Handbook: Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage*, AMIRA P387A. Ian Wark Research Institute and Environmental Geochemistry International Ltd., Melbourne.
<http://www.amira.com.au/documents/downloads/P387AProtocolBooklet.pdf>
- [3] ASTM (2012). *Standard test method for column percolation extraction of mine rock by the Meteoric Water Mobility Procedure*, Designation E2242-12: ASTM, West Conshohocken, Penn., 8 pp.
- [4] Bernhard Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 172, Pages 120-132. ISSN 0375-6742
- [5] Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener, C.G. (2003). *The geochemistry of acid mine drainage*. In: Lollar, B.S. (Ed.), *Environmental Geochemistry*, *Treatise on Geochemistry*, vol. 9. Elsevier, pp. 149-204.
- [6] Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Bussiere, B. et al. (2014). *Prediction of Acid Mine Drainage: Importance of Mineralogy and the Test Protocols for Static and Kinetic Tests*. *Mine Water Environ* 33, 54-65. <https://doi.org/10.1007/s10230-013-0249-1>
- [7] Candeias, C., Ávila, P., Coelho, P., and Teixeira, J.P. (2017). *Mining Activities: Health Impacts*. *Earth Systems and Environmental Sciences*, Volume. 1 – 22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11056-5>
- Diehl, S.F., Hageman, P.L. and Smith, K.S. (2006). *What's weathering? Mineralogy and field leach studies in mine waste, Leadville and Montezuma mining districts, Colorado*. 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD).
- [8] Fashola, M.O., Ngole-Jeme, V.M., Babalola, O.O. (2016). Heavy metal pollution from gold mines: environmental effects and bacterial strategies for resistance. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13 (11), 1047. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>.
- [9] Gautama, R. S., & Kusuma, G. J. (2008). Evaluation of geochemical tests in predicting acid mine drainage potential in coal surface mine. *Mine Water and the Environment*, 2008, 271-274.
- [10] Hageman, P.L., Seal, R. R., Diehl, S. F., Piatak, N. M. and Lowers, H.A. (2015). Evaluation of selected static methods to estimate element mobility, acid-neutralizing potentials associated with geologically diverse mining wastes. *Applied Geochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.007>



Observación
Ala con endorrea para su vida
con líquido en la parte
superior
con endorrea y no en la parte inferior