

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE PROCESOS DE DRENAJE ÁCIDO EN LOS MANGLARES DEL PASIVO MINERO SULFOMETALES.
ENVIRONMENTAL MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF ACID DRAINAGE PROCESS IN MANGROVES OF MINING LIABILITIES SULFOMETALES.

Ileana Cabrera Díaz ⁽¹⁾, José A. Alonso, José F. Lastra ⁽²⁾, Guillermo Cozzi ⁽³⁾, Andrés Pinto ⁽³⁾, Blasa Delgado ⁽¹⁾, Abdel Casanova ⁽¹⁾, Asor M. Martínez ⁽¹⁾, Antonio Aguila, Roxana Trueba ⁽¹⁾, Lucía Canel ⁽¹⁾

Se exponen los resultados finales de una investigación que durante el período (2009-2010), se ejecutó en el CIPIMM en tres pasivos mineros (PAM) de la región noroccidental de Cuba, para realizar así la caracterización mineralógica con un enfoque ambientalista e incluye, el antiguo complejo industrial sulfometales. En los residuales que se generan en dicho PAM y, dado los intensos procesos de drenaje ácido de mina (DAM) que se producen en: (1) cenizas de tostación de la pirita; (2) oxisales cercanas a las pilas; (3) sedimentos de manglares; (4) aguas de mar del canal de entrada al PAM, se determinó la asociación geoquímica que existe entre las fases que se identifican con los elementos potencialmente tóxicos (EPT: Fe, Zn, S y Pb), los cuales se lixivian de manera continua sobre la superficie expuesta al ambiente costero en las pilas de cenizas de tostación y por dicho motivo, se incrementan las cargas contaminantes en los suelos de manglares, sedimentos y aguas, las que se acumulan en áreas de la antigua instalación minero-fabril. Los resultados de composición sustancial muestran que, en las oxisales de los escurrimientos de diferentes tonalidades que se observan en las áreas y la barrera de contención del PAM, hay presencia de oxisales (coloreadas) típicas de metales de transición, en este caso hierro (Fe II), estables en medio ácido tales como: rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), zsomolnokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y bianchita ($\text{Zn, Fe}^{2+} \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), las cuales constituyen fuentes importantes de aporte de tres EPT: (Fe^{3+} , Zn^{2+} y SO_4^{2-}), a los sedimentos del manglar que rodean al PAM, debido a procesos combinados de lixiviación ácido-precipitación- evaporación solar, sobre la superficie expuesta al medio ambiente costero de las cenizas de tostación, las que a su vez presentan en su composición sustancial, fases minerales tales como: maghemita; $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (fase principal), pirita (FeS_2 , residual del proceso industrial), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), plumbojarosita ($\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$) y octazufre elemental (S_8), entre otros minerales de interés.

Palabras clave: Drenaje ácido, pasivos mineros, mineralogía y geoquímica ambiental

The final results of an investigation that during the period (2009-2010), was implemented in three miners CIPIMM liabilities (PAM) in the northwestern region of Cuba are exposed, thus making the mineralogical characterization with an environmental focus and includes, sulfometales former industrial complex. In waste generated in said PAM and, processes intense acid mine drainage (AMD) that occur in: (1) ash pyrite roasting; (2) oxisales near the batteries; (3) mangrove sediments; , Which continuously leach (4) seawater input channel to PAM, geochemistry association between the phases identified with potentially toxic elements (Fe, Zn, and Pb S EFA) was determined exposed on the coastal environment in piles of ash roasting and on that ground surface pollutant loads in mangrove soils, sediments and waters, which accumulate in areas of the former mining and manufacturing plant are increased. Substantial compositional results show that in the run-off oxisales different shades observed in the areas and the containment barrier of MAP is present oxisales (colored) transition metal typical in this case iron (Fe II) stable in acid medium such as: Rozenite ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) zsomolnokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) and bianchita ($\text{Zn, Fe}^{2+} \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), which are important sources of contribution of three EPT: (Fe^{3+} , Zn^{2+} and SO_4^{2-}) in mangrove sediments surrounding the PAM due to combined processes of leaching acid-precipitation-solar evaporation on the exposed to the coastal environment from the ashes of roasting surface, which in turn present in composition substantial mineral phases such as maghemite; $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (major phase), pyrite (FeS_2 , residual industrial process), hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), plumbojarosite ($\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$) and elemental octazufre (S_8), and other minerals of interest.

Key words: Acid drainage, mining passive, environmental mineralogy and geochemistry

Recibido: 10 de julio del 2014

Aprobado en su forma original: 8 de septiembre del 2013

(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km 1 ^{1/2} Boyeros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: ileana@cipimm.miner.cu

(2) Facultad de Geología, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saiz", ilastra@upr.edu.cu

(3) Instituto de Tecnología Minera (INTEMIN), Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR); e-mail: andres.pinto@segemar.gov.ar; guillermo.cozzi@segemar.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Como parte de la política ambiental cubana, a partir del otorgamiento de rango constitucional al medio ambiente, y al ser incluida esta en la Constitución de la República en el año 1976 (artículo 27), la posterior promulgación de la Ley 33 de enero 1981, acerca de: "La protección del medio ambiente y del uso racional de los recursos naturales" y de las resoluciones que se emiten con posterioridad hasta la aprobación de la Leyes de Minas en 1994 [1] y la 81 del Medio Ambiente 1997[2], el Grupo Empresarial GEOMINSAL, en correspondencia con la política y estrategia del nuevo Ministerio de Energía y Minas (MINEM), desarrolla su propia estrategia ambiental para el desarrollo sostenible de la actividad geólogo-minera en el país, con el propósito de establecer mejoras continuas de dicha gestión, en especial la ejecución de proyectos de investigación que se relacionan con la temática de la contaminación ambiental en pasivos mineros que provocan problemas de drenaje ácido de mina (DAM).

En el marco de las premisas anteriores, se proyectó la realización de una investigación conjunta entre las instituciones homólogas del servicio geológico-minero de las Repúblicas de Argentina y Cuba durante el período (2010-2013), para realizar trabajos de caracterización mineralógica con una dimensión ambientalista, tanto en menas como residuales de pasivos mineros (PAMs) de Cuba noroccidental, a través del empleo de diversas técnicas analíticas de avanzada: DRX, MEB-EDAX y análisis químico entre otras, lo que incluye, la posterior elaboración de la matriz de impacto ambiental de Leopold, y de esta manera proponer las acciones concretas para reducir la contaminación que estos producen, dado el alto nivel de contaminación de especies potencialmente tóxicas (Fe^{3+} , Zn^{2+} , SO_4^{2-}) en los sistemas hidrográficos y sedimentos de la región.

Los PAMs de esta zona minero-industrial, se localizan en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río. En las menas y residuos polimetálicos asociados a los antiguos depósitos tienen lugar intensos procesos de drenaje ácido de mina (DAM) con la participación de microorganismos biológicos que catalizan la reacción de los sulfuros primarios: pirita, esfalerita y galena, disminuyendo de forma significativa a valores extremos, el pH (<3,0) de los efluentes que provienen de las escorrentías y que vierten finalmente sus cudales a los ríos más importantes de los depósitos polimetálicos y a la costa.

En el caso particular del complejo industrial Sulfometales, construido en 1959 por la firma francesa Krebs, con la finalidad de producir ácido sulfúrico (grado técnico), a partir del balance de la mena de pirita y azufre elemental, recuperándose de forma paralela los metales preciosos (Au, Ag), plomo y el zinc, comenzó sus operaciones en el año 1961, con la explotación de las menas pirito-polimetálicas de la región para lo cual esta se diseñó.

La recuperación de plomo, zinc, oro y plata nunca llegó a materializarse de manera continua, debido a problemas en el abastecimiento de la materia prima idónea y las consecuentes deficiencias en la operación de los equipos, principalmente de los hornos de tostación, lo que conllevó que a finales de 1964, fuera paralizada la recuperación de metales, limitándose solamente al procesamiento de la pirita para la producción de ácido sulfúrico, almacenándose gran cantidad de residuos (cenizas), procedentes de los hornos de tostación áreas que se ubican contiguo a la planta, además de pilas de azufre elemental, las que se utilizaban para el balance de dicho elemento durante el proceso de producción continuo de la fábrica. Debido al cierre de la mina principal -por autocombustión del mineral- y hundimiento progresivo de la misma, desde 1983 hasta 1993 estuvo fuera de operación por reparación, reanudando sus

operaciones en 1994 hasta el 2003 en que finalmente concluyeron.

De lo anterior se evidencia, la deficiente ejecución que en materia gestión de desechos sólidos se llevó a cabo en el PAM sulfometales, y que propiciaron la ocurrencia de intensos procesos de drenaje ácido que allí se observan de forma sistemática sobre la superficie de lotes de cenizas acumuladas, expuestas a la acción del agua (precipitaciones, mar), la acción eólica del dióxígeno (O_2) del aire y el aerosol marino, con posible participación de microorganismos que catalizan diversas reacciones adversas al medio ambiente.

El vertimiento de tales residuales líquidos, determina entonces el drenaje subterráneo y superficial, donde influyen varios factores físicos y químicos tales como: (1) propiedades químicas intrínsecas de cada elemento potencialmente tóxico, (2) forma mineralógica en que estos se encuentran, (3) la superficie de interacción sólido / agua, (4) el nivel (superficial o subterráneo) en que estos se presentan, todo lo cual genera peligrosas situaciones ambientales, en particular el PAM de referencia con sus consecuencias, en este caso la contaminación de los suelos y devastación del ecosistema de manglares tal como se observa en la figura 1.



Figura 1. Sedimentos donde se observan a la izquierda, las pilas de cenizas de tostación de la pirita, azufre elemental y los sedimentos de sales precipitadas por procesos DAM. Al final se observa la barrera costera de manglares parcialmente devastada.

Es por ello que, las investigaciones de mineralogía ambiental que se apliquen en la etapa de inventario y caracterización de pasivos mineros polimetálicos, reviste gran interés, dada la inestabilidad de los diferentes minerales oxidados frente al ataque químico y, porque la presencia del sulfuro (pirita) puede dar lugar a la generación de drenaje ácido lixivante. La superficie de interacción es también un factor que tiene que controlarse, porque de su extensión puede depender la efectividad del traspaso. También el fracturamiento de

las rocas tiene un efecto similar, especialmente cuando las fracturas abiertas facilitan el paso de las soluciones. En el caso de depósitos que generan residuos, la granulometría del material tiene además un efecto decisivo, como es el caso del PAM objeto de evaluación dado el grado de fineza de tales residuos.

Los argumentos expuestos, indican que la actual situación problemática del trabajo consiste en la necesidad de realizar valoraciones científico-técnicas que ayuden

a la comprensión de tales procesos de drenaje ácido en el pasivo de referencia como son la influencia de: (1) *composición mineralógica de menas primarias y residuos sólidos*, (2) *procesos de alteración de las fases primarias*, (3) *granulometría de residuos sólidos*, (4) *composición química de elementos potencialmente tóxicos (EPT) tanto en residuales sólidos líquidos*, los que en su conjunto determinarán como las diferentes transformaciones mineralógicas que se suceden en sulfometales, dieron paso a los procesos de lixiviación de los EPT en los residuos sólidos y generaron el deterioro ambiental en la barrera de manglares costeros.

El objetivo general se fundamenta en el siguiente planteamiento: *“Contribuir al incremento del nivel de conocimiento de los procesos de drenaje ácido de roca en el pasivo minero sulfometales, a través de sus correspondientes asociaciones mineralógicas y geoquímicas con EPT”*.

Del mismo modo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- (1) *Caracterizar muestras representativas de residuos sólidos (precipitados, sedimentos y suelos), a través del empleo de diversas técnicas instrumentales de análisis de fases.*
- (2) *Calcular la composición cuantitativa de elementos potencialmente tóxicos en residuales sólidos y líquidos del pasivo minero que se investiga, mediante técnicas instrumentales de avanzada de análisis químico elemental.*
- (3) *Proponer el mecanismo de reacciones redox que transcurren en el pasivo minero a partir de la información analítica que se logra.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras seleccionadas (16 en total) se tomaron de forma puntual en épocas de seca y lluvia durante la campañas de muestreo realizadas por los geólogos y

técnicos en los años 2009 y 2010, teniendo en cuenta como factor predominante para la selección, la extensión de la contaminación que se observó “in situ” en cada zona de interés. En la figura 2 se muestra la vista satelital con todos los puntos donde se realizó el muestreo.

Con posterioridad todas las muestras se procesaron, creándose las condiciones necesarias para que las propiedades físico-químicas de sus EPT constituyentes no sufrieran alteraciones y cambios sensibles antes de ser analizadas por el complejo de técnicas y ensayos analíticos. Por último, el tiempo transcurrido entre toma, preservación y análisis de las muestras fue el que establece la Norma Cubana correspondiente.

De forma paralela, se realizaron determinaciones de pH a las soluciones acuosas que proceden de las muestras sólidas (sedimentos) y los residuales líquidos, colectados en el muelle de la planta de sulfometales).

Todas las muestras se caracterizaron mediante la técnica instrumental de DRX. Los análisis químicos se realizaron mediante fusión de la muestra con metaborato de litio y su lectura por ICP-AES y/o Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) según el elemento específico y el rango de contenido a evaluar.

Los difractogramas se registraron por el método de polvo en un equipo Philips, modelos PW 1710 y XPERT (SEGEMAR) con goniómetro vertical. La radiación empleada fue la $K\alpha$ Fe filtrada con Mn, diferencia de potencial aplicada de 30 Kv y 20 mA, registro angular $6-80^\circ (2\theta)$. Todos los difractogramas se registraron según la variante de medición punto a punto; paso angular de $0,05^\circ$ y tiempo de medición en cada posición angular de 3 segundos. La calibración del equipo se chequeó con patrón externo de silicio. Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción se convirtieron en

difractogramas continuos con el empleo del programa Origin, versión 8.0. Las distancias interplanares se determinaron con el programa Ttod para PC.

Para las pruebas en los residuos sólidos con agua meteórica y así determinar las concentraciones de iones potencialmente tóxicos (EPT) que escurren sus flujos contaminantes hacia los diferentes acuíferos, se analizaron muestras

adicionales de efluentes líquidos colectadas por Delgado B *et al.* (2010) [3] -en campañas anteriores de seca y lluvia-, teniendo en cuenta para el muestreo los indicadores básicos visibles de la contaminación. Con posterioridad, los sólidos se secaron a temperatura ambiente y se pulverizaron a un tamaño de partícula (100% por debajo del tamiz de 0,074mm) para realizar los correspondientes análisis.

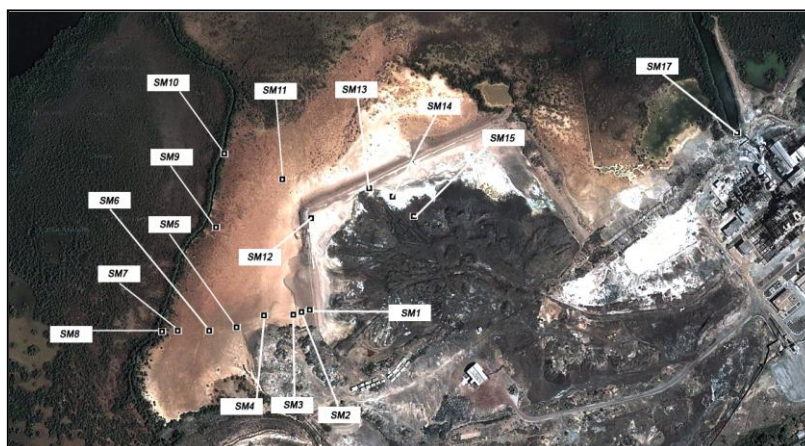


Figura 2. Vista satelital por GPS del área de muestreo del Manglar en el PAM Sulfometales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1) Análisis Químicos

En la tabla I se presentan los resultados de los análisis químicos EPT en las muestras evaluadas del PAM Sulfometales.

En las muestras de sedimentos arenosos del manglar -totalmente arrasado o con nivel de afectación parcial- (SM-1 a la SM-8; SM-12 y SM-15), predominan contenidos significativos de SiO_2 que se asocian al cuarzo y otros silicatos, con altos valores de pérdida por ignición de especies volátiles (H_2O , SO_2), azufre (total) y Fe_2O_3 , lo que indica que la principal fuente de contaminación de EPT lo constituyen los óxidos y oxisales de Fe, además de los contenidos apreciables de sodio que provocaron la erosión de los sedimentos e indica efectos notables de salinización, esto combinado a su vez con las reacciones de

lixiviación ácida DAM en presencia de bacterias acidófilas en toda el área que ocupan los manglares parcialmente devastados (figura 1). Se señala en estos sedimentos la vinculación del potasio a las arcillas del grupo de las micas hidratadas (illita, hidromoscovita).

Por su parte, las muestras de residuos formados al pie de la planicie de las pilas de cenizas del antiguo proceso industrial de tostación de la pirita (SM-13 a la SM-16), las que se acumulan hasta el muro de contención del PAM, corroborándose las regularidades de composición química señaladas para los elementos potencialmente tóxicos (Fe, S), existe también aporte significativo del Zn en tres de ellas (excepto la SM-15), lo cual es característico de los procesos de drenaje ácido de mina (DAM) que transcurren en menas polimetálicas sulfurosas y sus

residuos, con formación de oxisales de Fe (II) hidratadas de diferentes coloraciones (blanquecinas, amarillentas, verdosas, azules-verdosas) conocidas en inglés como “yellowboys”, en las que predominan: la zsmolnokita, rozenita, melanterita, bianchita y magnesio-copiapita, como

demonstraron Alonso J.A, Pinto A *et al.* (2011) [4] en las evaluaciones realizadas en los PAMs: de esta región minera, por dicha razón aportan los principales elementos potencialmente tóxicos identificados, dada su solubilidad en medio acuoso, pH ácido.

Tabla 1. Resultados de A.Q de elementos mayoritarios y trazas en sedimentos y residuos del PAM Sulfometales

Mtra	S(total) (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	PbO (%)	ZnO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	PPI (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
SM-1	2.45	8.23	0.34	0.25	65.12	3.07	4.2x10 ⁻³	0.70	10.55	2.16	2.16
SM-2	5.84	18.72	0.60	0.18	39.86	3.33	2.9x10 ⁻³	0.72	22.29	2.75	3.64
SM-3	5.77	19.58	0.63	0.24	35.28	4.61	5.6x10 ⁻³	0.75	25.36	3.20	3.56
SM-4	8.54	19.87	0.78	0.19	37.84	5.12	7.0x10 ⁻³	0.72	23.07	2.74	3.11
SM-5	4.36	14.86	0.77	0.31	36.94	5.38	4.2x10 ⁻³	0.90	25.74	2.77	3.36
SM-6	3.76	14.86	0.99	0.23	35.88	5.84	4.2x10 ⁻³	1.10	23.17	3.52	3.06
SM-7	5.12	21.08	0.74	0.27	30.82	4.35	1.4x10 ⁻³	0.86	26.26	3.34	3.27
SM-8	6.67	25.44	0.77	0.18	25.10	4.10	5.6x10 ⁻³	0.60	26.95	2.39	3.48
SM-9	6.73	37.31	0.53	0.36	10.50	3.58	2.8x10 ⁻³	0.88	28.04	6.09	3.74
SM-10	6.21	34.59	0.53	0.54	11.12	4.35	2.8x10 ⁻³	0.92	30.09	6.20	2.87
SM-11	8.32	36.24	0.72	0.28	9.18	4.10	1.4x10 ⁻³	0.76	31.01	4.28	5.76
SM-12	3.50	8.76	0.13	0.89	60.44	4.10	7.0x10 ⁻³	0.75	12.10	2.31	2.18
SM-13	18.38	24.59	0.17	4.67	20.78	4.10	7.4x10 ⁻²	2.48	44.31	3.24	0.19
SM-14	14.81	41.74	0.48	1.21	1.94	4.61	6,9 x10 ⁻¹	0.45	39.47	4.82	0.77
SM-15	2.68	52.43	3.65	6.36	5.09	1.02	1.12	1.32	18.15	2.15	1.30
SM-16	16.92	25.16	0.23	4.76	13.42	3.84	2.4x10 ⁻²	3.23	47.53	2.17	0.53

Nota: La muestra SM-15 contiene además 4.65% de BaO (por presencia de barita)

Tabla 2. Resultados de los análisis químicos de muestras de agua de mar con presencia de EPT en el manglar y laguna del PAM Sulfometales.

Mtra	Ubicación	pH	St (g/l)	Fe (g/l)	Mn (g/l)	Pb (g/l)	Zn (g/l)	K (g/l)	Na (g/l)	Ca (g/l)	Mg (g/l)
1	manglar	2.97	2.42	0.025	0.020	0.054	0.021	0.74	20.97	0.65	2.91
2	manglar	2.99	2.18	0,170	0.018	1.210	0.040	0.67	14.94	0.50	2.56
3	manglar	3.37	1.18	0,010	0.020	0.006	0.036	0.48	11.74	0.63	1.49
4	Laguna	2.51	3.40	0.039	0.020	0.021	0.240	1.03	28.25	0.90	4.04
5	Canal	1.45	47.42	44,51	0.010	0.016	6.07	0.020	19.69	0.052	8.32
NC 827 2012	Límites máximos permisibles en aguas residuales	6.5 a 8.5	-	0.3	0.1	0.05	5.0	-	-	-	-

Los resultados de las muestras de agua (TABLA II), corroboran que las mismas presentan valores de pH de elevada acidez, y concentraciones anómalas -por encima de los valores límites- que establece la Norma Cubana NC 827/2012 de Fe, S (total) y Zn, que provienen fundamentalmente de la lixiviación ácida de las Sulfosales formadas por procesos DAM de oxidación-reducción de la pirita en presencia de microorganismos en el PAM.

Los contenidos significativos del ión Na^+ , que se reportan para las muestras del manglar, se justifican por la lixiviación de la oxisal jarosita y halita (NaCl) presente en las mismas, como se demuestra con posterioridad mediante DRX. En la muestra 4 se destacan los valores altamente significativos de Na^+ y S (total), en menor medida por tratarse de agua de la laguna que proviene del mar que lixivia en parte las cenizas que se acumulan.

En la muestra 5, se detectaron contenidos muy elevados de S (total), Fe y Na que provienen de su lixiviación en las pilas y aguas de la laguna, además del efecto adicional del aerosol marino, que aporta también iones Na^+ y Zn^{2+} , concentrándose ambos finalmente en el muro de contención, por ello dicha zona constituye la fuente principal de contribución de estos iones potencialmente tóxicos al manglar de sulfometales, que afectan el entorno ambiental de este ecosistema vegetal por los efectos severos de salinización y lixiviación ácida cada vez más intensos que allí se observan.

2) Difractometría de polvos (DRX)

En el difractograma que se muestra a continuación (figura 3), se constata la composición sustancial típica de las cenizas de tostación del proceso industrial.

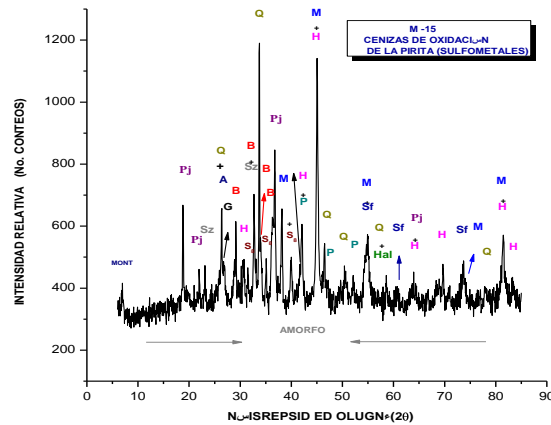


Figura 3. Difractograma de la muestra SM-15 (cenizas de tostación de sulfometales)

Leyenda: M – Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), H – Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), Pj – plumbojarosita $\text{PbFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, B- (BaSO_4), S₈ – azufre elemental, Hal.-halita (NaCl), G- Goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), P – Pirita (FeS_2), Mont- montmorillonita, M.A – Material Amorfo, Sf- Esfalerita (ZnS)

En el mismo se identifica una mezcla compleja de fases de hierro, en las que predominan maghemita y hematita, además de plumbojarosita, barita, azufre (proveniente del proceso de balance de la pirita en el proceso fabril), goethita, pirita, cuarzo, esfalerita, arcilla montmorillonita y material amorfo. Se señala que la pirita es el mineral que aporta el drenaje ácido en el PAM y su efecto es aún mayor dado por la fina granulometría de estos residuos (< 0,074 mm).

Los registros difractométricos que se obtuvieron en los sedimentos (figuras 4 y 5), señalan la composición sustancial de las oxisales de diferentes coloraciones, en los que se identifican mezcla de oxisales de Fe (II) hidratadas: **zsmolnokita** ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) **y rozenita** ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), las que precipitan a partir de la reacción de oxidación y acción catalítica de las bacterias acidófilas sobre el sulfuro residual **pirita** (FeS_2), presente en la composición de las cenizas y que aportan los EPT: Fe, Zn, S, Pb y Ba, por procesos de drenaje ácido .

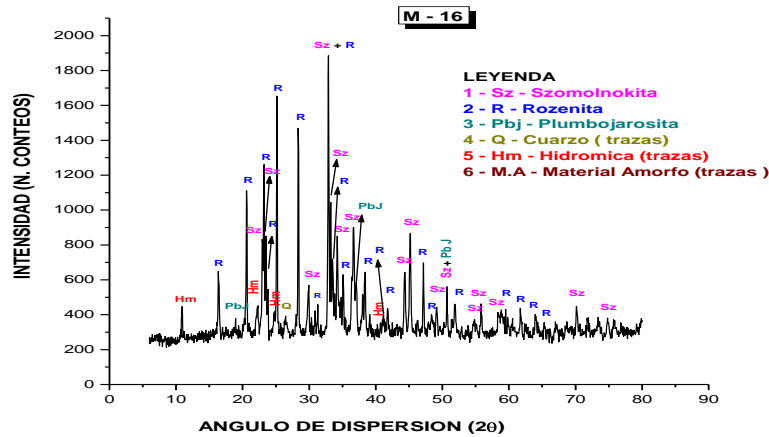


Figura 4. Diffractograma de oxisales formadas por procesos DAM en la planicie de las pilas de cenizas de tostación (mtra SM-16)

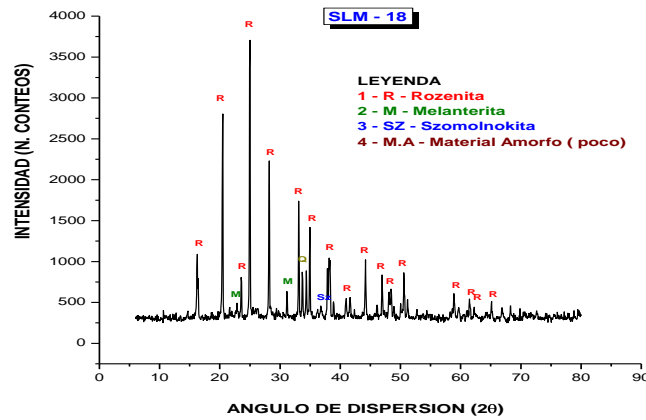


Figura 5. Diffractograma de las oxisales precipitadas y acumuladas por procesos DAM en Sulfometales en un punto de muestreo en el área cercana a los depósitos de cenizas de tostación (mtra SLM-18)

Con posterioridad dichas oxisales se lixivian en medio acuoso (pH < 3,0), dando lugar a soluciones con altas concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos ya mencionados, las que se mezclan con las aguas del canal que contienen iones Na⁺ y Cl⁻, penetrando más tarde al manglar a través de diversos factores antrópicos combinados (roturas, grietas, etc.) que favorecen su paso por la barrera o muro de protección, facilitando así la posterior formación de la oxisal jarosita. Tales escurrimientos, pudieran aportar estos elementos a su forma geodisponible (EGD),

si estos alcanzan la costa y contaminan el agua de mar con iones Fe, S y Zn (ver tabla II; muestra 5), de ahí la grave situación de contaminación ambiental que explica la devastación de los manglares, la cual debe prevenirse en el menor tiempo posible.

Como un aspecto de interés, Alonso J.A, Cabrera I, Pinto A, Cozzi G *et al.* (2011) [4], demostraron que el ión Zn²⁺, el cual se detectó en las aguas residuales de los PAMs polimetálicos cubanos se asocia al mineral *bianchita*; (Zn, Fe²⁺)(SO₄).6 H₂O (Figura 6).

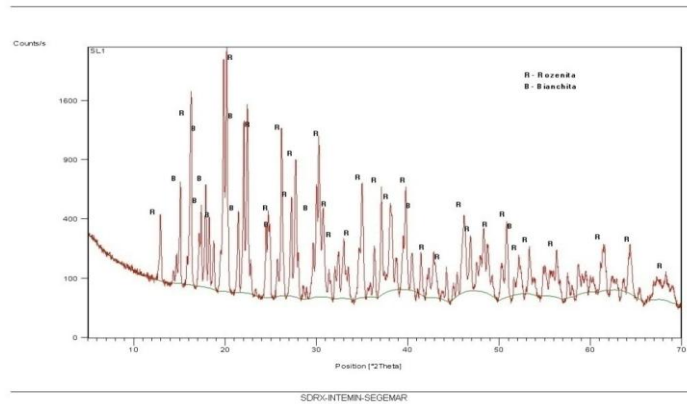


Figura 6. Difractograma que muestra la asociación de bianchita y rozenita

Por último, en la figura 7 se presenta el difractograma típico de los sedimentos del manglar severamente afectados, como consecuencia de los procesos de drenaje ácido que se manifiestan en el manglar, hecho que se evidencia dada la precipitación de la oxisal **jarosita (K, Na) Fe₆ (SO₄)₄(OH)₁₂ acompañada de halita (NaCl) proveniente del proceso de**

evaporación de esta en el agua de mar. El resto de la composición sustancial la componen minerales tales como el cuarzo, la arcilla hidromica, goethita caolinita y material amorfo, minerales típicos de suelos arenosos costeros.

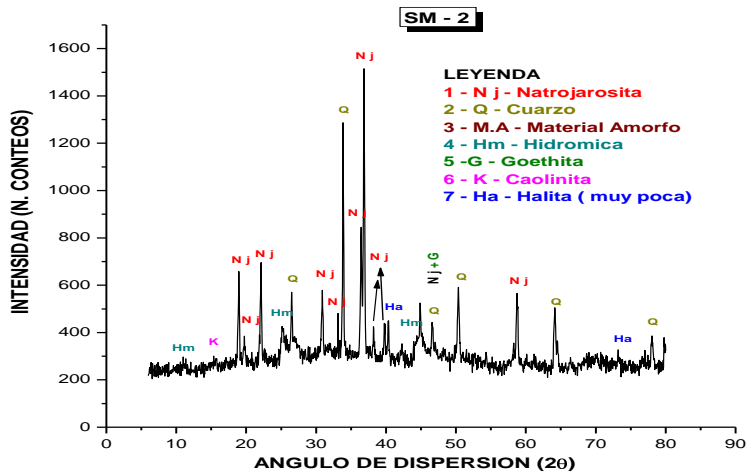


Figura 7. Difractograma de sedimentos del manglar en la zona más devastada (sin vegetación), muestra SM-2

SO_4^{2-}) y *halita* (Na^+), la primera precipita mediante un mecanismo redox en medio ácido a partir de las oxisales de Fe (II) que se formaron en las cenizas de tostación acumuladas en el PAM, provocando la afectación del ecosistema de manglares con el continuo avance del proceso en dirección a la costa.

4. Se comprueba mediante el empleo de la técnica instrumental de DRX, las diferentes etapas de reacciones DAM (más probables) que ocurrieron en el PAM, a partir de la oxidación del sulfuro residual (pirita), proceso catalizado por microorganismos acidófilos.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso J. A; Pinto, A; Cabrera I; Cozzi, G; Gallardo, D; Valdivia, G; Díaz; A. 2010. Principales asociaciones mineralógicas de

los elementos contaminantes presentes en residuales de la industria minero-metalúrgica (Informe final). Proyecto conjunto argentino-cubano MINCYT- CITMA, CU: 08/10)

Delgado, B; Lubián, T; del Río M; Cortés, N; Millán; E. 2009. Identificación de pasivos ambientales mineros y remediación ambiental del drenaje ácido de la mina Santa Lucía. Informe de Investigación, Proyecto 62020, CIPIMM, MINBAS.

Figueredo, M.; Delgado, B. 2014. Tratamiento de efluentes cianurados en una planta hidrometalurgia de oro. INFOMIN Vol. 6, No 1, enero-junio, pp. 21-32 ISSN: 1992 4194.

Ley de Minas para el control de la actividad de exploración y explotación minera en Cuba. 1994. Gaceta Oficial de la República de Cuba.

Ley 81 del Medio Ambiente y del uso racional de los Recursos Naturales.1997. Gaceta oficial de la República de Cuba.

Norma Cubana 827/2012. Vertimientos de aguas residuales a las aguas terrestres y del alcantarillado.