

Evaluación geoambiental para la mitigación de los impactos provocados por elementos contaminantes originados por la actividad minera metalúrgica en Santa Lucía, Pinar del Río, Cuba

Geo-environmental assessment for impact mitigation caused by polluting elements from mining and metallurgy activities in Santa Lucia, Pinar del Río, Cuba.

Damaris Gallardo-Martínez¹, Noel Bruguera-Amarán², José Antonio Díaz-Duque³, Ileana Cabrera-Díaz⁴, José Francisco Lastra Rivero⁵

- ¹. Delegación Territorial del CITMA. Calle Colón. No. 106, e/Maceo y Virtudes. Pinar del Río. dgm@citma.vega.inf.cu
- ². Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales, ECOVIDA. Km. 2 ½ Carretera a Luis Lazo, Pinar del Río. noel@ecovida.cu
- ³. Universidad Técnica de La Habana "José A. Echeverría". Boyeros. La Habana. diazduque@yahoo.com
- ⁴. CIPIMM. Grupo Empresarial GEOMINSAL. Ministerio de Energía y Minas. Cuba. iliana@cipimm.geominsal.minbas.cu
- ⁵. Universidad Hnos. Saíz Montes de Oca, Calle Martí final # 270. Pinar del Río

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2017 Fecha de aceptación: 26 de diciembre de 2017

RESUMEN. El yacimiento Santa Lucía está constituido por dos tipos de menas, las piritopolimetalicas y las barito-polimetalicas. El yacimiento Castellanos está compuesto por pirita y calcopirita en el lado yacente de las menas polimetalicas. Para este procesamiento se crearon dos industrias la planta de Sulfometales y Castellanos. Esta actividad se desarrolla en momentos donde la legislación ambiental del país era incipiente y no se realizaron los procesos de evaluación de impactos ambientales correspondientes, lo que provocó la generación de impactos ambientales negativos. En el trabajo se realiza la evaluación geoambiental de los impactos ambientales de la actividad minera metalúrgica de la región donde se proponen medidas para su mitigación y monitoreo las cuales se corresponden con las principales áreas afectadas por la explotación, los pasivos mineros originados y los procesos industriales que se desarrollan en la actualidad. Para realizar la identificación y evaluación de los impactos ambientales se utilizó la matriz causa-efecto (Matriz de Leopold), se determinó la magnitud de los impactos por variables ambientales y se evaluaron los impactos de procesos asociados a las explotaciones de yacimientos sulfurados como el drenaje ácido de minas.

Palabras claves: contaminación, metales pesados, evaluación de impactos ambientales, explotación minera, menas polimetalicas.

ABSTRACT. The mine of Santa Lucia consisted by two types of ores: the pyrite-polymetallic and the barito-polymetallics. The Castellano's mine is formed by pyrite and calcopyrite in the adjacent side of the polymetallic's ores. To ores process, two industries were founded: Sulfometales and Castellanos. This activity started when the regulatory system in Cuba was not well established, thus the environment-impact assessment was not required and its generated negative environmental impacts. The aim of the study was to carry out the geo-

environmental assessment from the mining and metallurgy activities of the region. Likewise, we propose the mitigation and monitoring actions for the main affected areas by current exploitation, passive miners and the industrial processes. To identify and assess the environmental impacts was used cause-effect matrix (Leopold Matrix), while the magnitude of the impacts was determined by each environmental variable and evaluates the impacts associated to the exploitations of sulfurous mine like acid drainage from mines.

Key words: pollutions, heavy metals, environmental impacts assessment, mining, polymetallic's ores.

INTRODUCCIÓN

La minería, a través de los siglos, ha formado parte de la historia y el desarrollo económico de muchos países en el mundo. Sin embargo, esta industria ha generado impactos sociales y ambientales que inciden en los diferentes ecosistemas relacionados con la actividad.

Más del 60% de los materiales en el mundo se extraen en la actualidad mediante la modalidad de minería de superficie, lo que provoca desastres medioambientales de índole ecológico y social, debido a la devastación de los ecosistemas que provoca el laboreo minero, dentro de ellos se encuentran la deforestación, contaminación y la alteración del equilibrio ecosistémico con elementos geodisponibles a las aguas superficiales y subterráneas con destrucción del hábitat natural. Como consecuencia de ello, se considera al sector minero el más contaminante de las aguas superficiales y subterráneas, especialmente con cargas adicionales de elementos potencialmente tóxicos (EPT) tales como: cobre, zinc, plomo, cadmio, plata, arsénico, manganeso, entre otros (Salvado, 2009).

La contaminación generada por la actividad minera y las plantas metalúrgicas se debe principalmente a la descarga de colas con contenidos de minerales sulfurosos, el uso de reactivos químicos, productos orgánicos y otros, cuyos efectos negativos repercuten directa e indirectamente en el hombre y en la biodiversidad. (Coronado, 2008).

La región de Santa Lucía, ha sido durante años objeto de una explotación minera intensiva lo que ha ocasionado consecuencias negativas al medio ambiente. En la década del '60 del pasado siglo, se construyó la planta de procesamiento metalúrgico Sulfometales, para producir ácido sulfúrico. Uno de los yacimientos utilizados fue Santa Lucía como suministro

de pirita para la obtención del ácido. En 1994, se comienza a explotar el yacimiento Castellano y se inaugura la planta de procesamiento Oro Castellano, para obtener oro y plata.

Según, Cañete *et al.* (2009), acerca de la degradación de la minería en la región de Santa Lucía, exponen los altos niveles de contaminación por metales pesados procedentes de las áreas no rehabilitadas, ocasionados por el arrastre de sedimentos ricos en estos metales que originan el drenaje ácido procedente de pasivos ambientales mineros, los cuales contaminan las aguas superficiales y el litoral.

En la región no se ejecutaron proyectos de recuperación efectivos para mitigar los impactos de las actividades minero – metalúrgicas. Se realiza un inadecuado manejo de los pasivos mineros derivados de las actividades productivas. Las evaluaciones técnicas realizadas no son integrales, lo que limita el alcance de las medidas de mitigación y monitoreo diseñadas. Los procesos de evaluación de impacto ambiental realizados no complementan la solución de los problemas ambientales de la actividad en la región, solo se enmarcan en las demandas de proyectos de explotación minero- metalúrgicos de estos yacimientos polimetálicos.

La investigación tuvo como propósito realizar la evaluación geoambiental de los impactos negativos provocados por elementos contaminantes en la actividad minero- metalúrgica en Santa Lucía, para realizar un diseño efectivo de las medidas de mitigación y monitoreo a ejecutar para la recuperación de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los trabajos de campo realizados se aplicó para la descripción de los puntos, el método geológico de itinerarios irregulares por el área. Se describieron un total de 14 puntos tomados directamente en el terreno. Teniendo en cuenta como factor predominante para la selección, la extensión de la contaminación que se observó "*in situ*" en cada zona de interés y la experiencia de muestreo. En la **Tabla 1** se describen las muestras tomadas en proceso investigativo.

Tabla 1. Selección de muestras en las áreas más vulnerables a la contaminación del objeto de Investigación.

CODIGO	SELECCION DE MUESTRAS OBJETO DE LA INVESTIGACION
M-1	Muestra del Frente de Cantera donde afloran las rocas del mineral polimetálico primario en el yacimiento Santa Lucía
M-1A	Residual líquido que procede de la escorrentía dentro de la propia mina de Santa Lucía
M-2	Sedimento del escurrimiento en el afloramiento mineral dentro de la propia mina Santa Lucía.
M-2A	Residual líquido colectado a la salida del socavón de la mina Santa Lucía.
M-3	Sedimento del escurrimiento del embalse que procede de la solución acuosa de la muestra-1A de la mina Santa Lucía
M-3A	Residual líquido que proviene de la escorrentía del lado del socavón de la mina Santa Lucía
M- 4	Sales de color verde amarillentas formadas a la salida del socavón de Santa Lucía
M- 4A	Residual líquido que proviene del mineral estéril de Castellano.
M-5	Sedimento de la salida del socavón de la mina Santa Lucía.
M-5A	Residual líquido del proceso de lixiviación del oro de las menas del sombrero de hierro de la mina Castellano.
M-6	Sedimento recolectado a un lado del socavón de Santa Lucía.
M-6A	Residual líquido a la salida del socavon.
M-7	Sedimento del material estéril, mineral no económico para el proceso de recuperación de oro de Castellano.
M-7A	Muestra de agua de mar tomada del canal detrás de la planta de sulfometales laguna natural.
M-8	Residuo sólido (cola) del mineral lixiviado del proceso de recuperación de oro de Castellano
M-8A	Muestra de agua de mar que procede del muelle situado detrás de la planta de Sulfometales
M-9	Sedimento de los manglares que se encuentran detrás de la planta de Sulfometales.
M-9A	Muestra de agua del efluente del río Santa Lucía (in situ)
M-10	Sedimentos del muelle detrás de la planta de sulfometales
M-10A	Muestra de agua del propio río Santa Lucía tomada in situ.
M-11	Sedimentos del efluente del río Santa Lucía donde desembocan los residuales líquidos del socavón y de la cantera de Santa Lucía.
M-12	Sedimento del río Santa Lucía.
M-13	Material esateril proveniente del yacimineto Santa Lucía recolectado en el patio de la escuela primaria en el poblado de Santa Lucía.
M-14	Cenizas de tostación de la pirita que provienen del muestrero de las pilas en la planta de Sulfometales.

Se evaluó la peligrosidad que provoca el proceso de Drenaje Ácido de Minas (DAMs) dada las características de las menas y los residuos asociados a pasivos ambientales mineros que se encuentran en la región, y que constituyen una fuente importante de contaminación por metales pesados. Este proceso permitió conocer de acuerdo a los resultados analizados el grado de afectación de cada variable ambiental estudiada.

Después del análisis de los resultados preliminares para profundizar en la investigación, se procede a realizar otra selección de muestras, las cuales se recogen en las imágenes satelitales de las zonas de muestreo más afectadas figuras 1 y 2 de los anexos. Todas las muestras sólidas (sedimentos y minerales) se secaron hasta temperatura ambiente en el laboratorio de mineralogía del departamento de caracterización de minerales (DCM) del CIPIMM y se sometieron a proceso de molienda fina por debajo del tamiz de 0,074mm (malla 200µm) para efectuar los análisis químicos y mineralógicos, correspondientes.

Mediante las pruebas y ensayos químicos realizados, se determinó el potencial neto de neutralización por drenaje ácido y movilidad de metales en los residuos sólidos con agua meteórica y se comprobaron las concentraciones geodisponibles que drenan hacia los acuíferos.

En la investigación se emplearon varias técnicas analíticas que permitieron realizar los análisis cuantitativos para la evaluación de los impactos negativos de la actividad minero - metalúrgica en la región. Estos se describen a continuación en coordinación.

Análisis Químico y Mineralógico

Los análisis químicos de elementos mayoritarios y trazas se determinaron empleando los métodos de disolución ácida y fusión con Metaborato de Litio para la preparación de las muestras. Se empleó un Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-AES) modelo *Spectroflame* de la firma SPECTRO (Alemania). Estos análisis se realizaron con el propósito de conocer la concentración de los elementos presentes en las muestras, así como las fases mineralógicas.

Difracción de rayos-X (DRX)

Se obtuvo los difractogramas de todas las muestras sólidas de sedimentos con la correspondiente identificación de sus principales fases mineralógicas, mediante el empleo de la base de datos de difracción de polvos cristalinos, compatible con *Windows* para Office 2002. Se obtuvo con el ensayo la composición mineralógica típica de las menas, así como la composición de los residuos sólidos, sales y sedimentos, con presencia del sulfuro primario (pirita).

Microscopía Electrónica de Barrido con Espectrometría Dispersiva en Energía

A las muestras, se les realizó la observación microestructural en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de tipo ambiental de la firma Philips, modelo XL30 ESEM del Instituto INTEMIN-SEGEMAR de la República de Argentina. La composición química elemental puntual se analizó mediante una Microsonda Electrónica de Fluorescencia de Rayos-X Dispersiva de Energía Dispersiva (EDAX). Este análisis permitió determinar las etapas del proceso del drenaje ácido de mina (DAM), además el análisis de la secuencia de reacciones que transcurren durante los procesos (DAM) asociados a los minerales sulfurados. Se realizaron microfotografías MEB-EDAX, en dos partes: una individual que describe las transformaciones experimentadas por los cristales de la pirita (morfología cúbica) y otra para reconocer las posibles fases oxidadas de los sulfuros primarios y sus productos de oxidación a sulfatos.

Pruebas de movilidad de metales en desechos sólidos en presencia de agua meteórica

Se realizó para confirmar la posibilidad de lixiviación de metales en los desechos sólidos (escombros, cenizas y colas) en concentraciones geodisponibles de movilidad de metales. Se empleó el procedimiento MWMP (*Meteoritic Water Mobility Procedure*).

Prueba estática estándar de conteo ácido-base

Permitió obtener la capacidad de neutralización de la muestra, determinando el ácido consumido durante la digestión con un exceso de éste. El resultado se comparó con el potencial ácido, calculado del análisis del ácido sulfúrico. Este procedimiento analítico fue descrito por Lawrence *et al.* (1997) y Price *et al.* (1997).

Pruebas químicas de neutralización de aguas ácidas generadoras de DAM

Se realizaron con el propósito de neutralizar las aguas ácidas provenientes del drenaje ácido de minas, así como comprobar la efectividad y viabilidad del agente neutralizante. Se tomaron 500 ml de cada efluente en el lugar muestreado y se trataron con pulpas al 20 % de carbonato de calcio (99% pureza), hasta alcanzar pH entre 6 y 6,5. Se le añadió soluciones de hidróxido de calcio (60% pureza) y pulpas de óxido de calcio (60%), manteniendo agitación continua hasta alcanzar un valor de pH de 9-9.5. Se corresponde con el índice de acidez que se requiere para precipitar soluciones que contienen los diferentes metales. Para la comparación de los mismos, se empleó la Norma Cubana NC: 27:2012 Vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres y el alcatarillado. Especificaciones.

La neutralización/precipitación con cal (como CaO o Ca(OH)₂), en la práctica mundial se reporta como el tratamiento más eficiente a nivel industrial. Esta alternativa logra la neutralización de la acidez y la precipitación de los metales. A medida que aumenta el pH, los aniones se tornan más disponibles para su precipitación.

Determinación de la presencia de microorganismos en el agua residual de la mina Santa Lucía

En los yacimientos sulfurosos la generación de drenaje ácido de minas se ve incrementada por la presencia de diversos microorganismos que sobreviven en ambientes ácidos y extremos, como en los residuos mineros. La literatura especializada, reporta a *Thiobacillus*, *Acidithiobacillus* y *Leptospirillum* como microorganismos que están presentes en los sedimentos de los diques de colas y escombreras. Utilizan la energía que se libera de la oxidación del hierro para su metabolismo. Estas bacterias tienen preferencia por los sulfuros que contienen Hierro (Fe²⁺) como la Piritita. Su oxidación es acelerada por la actividad microbiana, lo que incrementa la producción de drenaje ácido de minas (Nordstrom 1982; Nordstrom y Southam 1997 y Dold 2010). Para comprobar la presencia de los mismos en las muestras de agua del drenaje de la mina Santa Lucía, se realizó el aislamiento de microorganismos acidófilos. Se utilizó el medio 9K (Karavaiko, Kuznetsov & Golomzik 1972) aplicando el método de las diluciones sucesivas o seriadas: *end point* en el que se

encuentran presentes los elementos nutrientes, energéticos y la acidez requerida para el crecimiento del microorganismo. Una vez preparadas las soluciones se mezclan y se ajusta la acidez con ácido sulfúrico a pH 2.0. Para la adaptación del microorganismo al concentrado, se añadió 1.0 g de mineral a 10 ml de medio 9K con 1.0 ml del cultivo del microorganismo aislado.

Metodología de Evaluación de Impacto Ambiental

La metodología utilizada en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental es la matriz de Leopold. Se trata de un método simple, útil para realizar un primer análisis o para presentar un cuadro - resumen de impactos. Esta matriz se desarrolla para establecer relaciones causa – efecto de acuerdo con las características particulares del proyecto, a través de dos listas de chequeo. Para la evaluación de impactos se requiere considerar la identificación de las acciones del proyecto y de las componentes del medio afectado; así como la estimación subjetiva de la magnitud del impacto, en una escala de 1 a 10, siendo el signo (+) un impacto positivo y el signo (–) uno negativo. La evaluación subjetiva de la importancia, en una escala de 1 a 10.

Identificación y evaluación de los impactos ambientales

La metodología utilizada para la identificación y evaluación de los impactos ambientales generados en los yacimientos Santa Lucía, Castellanos y la Planta Sulfometales, permitió determinar los impactos ambientales sobre cada una de las variables. Se tuvo en cuenta los análisis cuantitativos y cualitativos de la región. Se realizó la descripción de las acciones relevantes de la actividad minero-metalúrgica según las etapas de prospección, explotación y abandono–cierre de los proyectos desarrollados. La identificación de los impactos ambientales producidos sobre cada una de las variables ambientales impactadas permitió establecer las medidas de mitigación y monitoreo para los impactos identificados. (Gallardo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Situación medioambiental actual de la región

El desarrollo minero - metalúrgico en la región facilitó condiciones socioeconómicas y ambientales para el estudio de problemas relacionados con la temática. No se ha logrado la recuperación de las áreas explotadas donde existen afloramientos de mineralización sulfurosa, los cuales bajo la acción de los agentes meteorizantes provocan la movilización de elementos contaminantes hacia las aguas, el suelo, la vegetación y el medio circundante, impactando negativamente en los ecosistemas. Las medidas dictadas no contienen un enfoque sistémico que permita minimizar los efectos negativos. No se han desarrollado estudios que evalúen los impactos a partir de la correlación de estas variables ambientales y los proyectos minero-metalúrgicos ejecutados. Existen pasivos minero-metalúrgicos que facilitan la contaminación por dispersión eólica, de las aguas terrestres que a su vez vinculan a ecosistemas frágiles como la zona costera, empeorando la situación ambiental que presenta la región de estudio. (Gallardo *et al.*, 2013).

Análisis químicos de elementos mayoritarios y trazas

Del análisis de las muestras se derivan resultados que evidencian la contaminación ambiental de la región por metales pesados como lo confirman estudios de Cañete *et al.* (2011); Delgado *et al.* (2011), para este tipo de yacimientos. En la **Tabla 2**, se muestran los resultados de los análisis químicos de las muestras de rocas y sedimentos analizadas en la región. Se realizó el cálculo de esta composición química como óxidos, teniéndose en cuenta la bibliografía especializada que ratifica esta variante como una de las alternativas para determinar las fases en los análisis. Se marcan en color rojo valores de los elementos con concentraciones más significativas.

Tabla 2. Resultados de los análisis químicos de elementos mayoritarios en Yacimientos Santa Lucía, Castellanos y Planta Sulfometales.

Muestra	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% FeO	% MnO	% PbO ₂	% ZnO	% BaO	% K ₂ O	% Na ₂ O	% Fe ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% PPI (SO ₃ +H ₂ O ⁺)
M-1	30.3	0.32	15.57	0.19	6.32	2.10	2.42	1.02	0.23	0.56	0.25	0.35	40.16
M-2	42.4	0.56	6.59	0.05	1.56	0.28	4.07	2.75	0.20	8.13	1.21	0.30	32.26
M-3	54.4	0.66	2.99	0.04	0.86	0.27	8.04	1.94	0.24	14.45	0.23	0.30	15.46
M-4	N.D	0.08	20.69	0.16	0.06	5.01	N.D	0.15	0.16	N.D	0.01	0.13	74.18
M-5	76.0	0.49	1.36	0.02	0.07	0.50	5.01	1.70	0.20	5.48	0.10	0.20	8.02
M-6	67.5	0.64	1.02	0.02	0.26	0.31	6.56	2.60	0.12	13.21	0.07	0.25	7.62
M-7	65.4	2.08	1.60	0.03	0.32	0.03	7.40	3.40	0.15	8.11	0.05	0.30	10.45
M-8	24.2	0.04	1.02	0.04	10.09	0.23	8.35	0.20	0.29	42.59	0.08	0.40	13.25
M-9	3.50	0.01	0.58	0.01	1.04	0.34	5.26	0.47	10.1	30.94	0.20	0.26	46.58
M-10	71.2	0.41	1.72	0.02	0.03	0.04	3.65	0.34	3.40	3.63	4.26	1.48	9.94
M-11	71.8	0.88	1.89	0.01	0.55	0.10	1.46	1.62	0.54	11.72	0.24	0.38	8.70
M-12	85.6	0.84	0.70	0.01	0.18	0.05	1.53	1.02	0.46	4.23	0.30	0.49	3.85
M-13	58.4	3.83	0.78	4.97	0.12	0.13	0.98	1.56	0.32	15.75	0.06	0.54	12.88
M-14	5.09	1.02	2.53	0.17	3.65	6.36	4.65	1.30	2.15	49.90	1.12	1.32	20.83

De la tabla anterior, se infiere el quimismo característico que reflejan las menas piritopolimetalicas de Pb, Zn y Ba de Santa Lucía y Castellanos en la roca primaria (M1). El resto de las muestras, representan la composición química típica de los sedimentos formados durante la intensa contaminación por drenaje ácido existente, que corrobora los resultados de Alfonso *et al.* (1995). Se evidencia en las muestras analizadas cercanas a la mena primaria la disminución de los contenidos de Fe²⁺(FeO), lo cual indica la ocurrencia de procesos de drenaje ácido de mina a partir de la reacción de lixiviación del sulfuro de hierro (II); piritita (FeS₂).

Del análisis de la composición elemental de la muestra M-4 (sales a la salida del socavón), se constata como se eleva el contenido de FeO y alcanza un valor máximo del 20,69%. Similar comportamiento se obtiene del óxido de cinc, ZnO (5,01%) mostrando un valor anómalo, que al compararlo con la muestra M-1 resultó ser elevado. Se incrementa la pérdida por ignición (PPI) de los componentes volátiles fundamentales: SO₃; H₂O⁺, indicando la posible formación (*in situ*) de una nueva fase.

El comportamiento del plomo en las muestras de Santa Lucía (M-2, M-3, M-5, M-6, M-7), corrobora la tendencia a la disminución de sus contenidos al compararlo con la roca primaria (M-1), con similar comportamiento de los elementos Fe y Zn, lo que infiere la ocurrencia de intensos procesos DAM.

En la muestra de las cenizas de la planta de Sulfometales (M14), el quimismo anómalo de los elementos contaminantes Pb, Zn y Ba, confirman el resultado reportado por Figueredo *et al.* (1998).

En cuanto al bario, se reportaron altos contenidos en los sedimentos en las muestras analizadas, provocados por procesos físico-mecánicos de arrastre de la mineral barita desde la mena primaria hasta el río Santa Lucía. Este mineral, es insoluble en agua ($k_{ps} = 1,08 \cdot 10^{-10}$; 25°C), lo que justifica la presencia del mismo en estos sedimentos. Este resultado confirma los resultados de Cañete *et al.* (2009). **La Tabla 3**, refleja los resultados de los análisis químicos de elementos contaminantes en aguas de río y drenajes líquidos de acuerdo a las muestras tomadas en los diferentes puntos.

Tabla 3. Composición química de elementos contaminantes en aguas de río y drenajes líquidos (escorrentías) muestras identificadas en la **Tabla 1**.

Muestra	Concentración del elemento (mg/L)								
	Zn	Pb	Ba	Fe	S (total)	Mn	Ni	Mo	Sr
M-1A	6,060	64,98	< 0.2	14,700	15,300	420	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-2A	5,660	58,96	< 0.2	13,900	11,060	220	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-3A	81	62,38	< 0.2	14,120	15,760	450	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-4A	110	22,14	< 0.2	5,030	8,550	360	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-5A	< 1.8	< 0.4	< 0.2	6,40	480	0.27	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-6A	< 1.7	< 0.4	< 0.2	5,23	60	< 0.3	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-7A	< 2.1	< 0.4	< 0.2	1,83	970	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-8A	< 1.8	< 0.4	< 0.2	8,80	940	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-9A	< 1.7	< 0.4	< 0.2	4,60	85	0.30	< 0.2	< 0.2	< 0.2
M-10A	< 2.1	< 0.4	< 0.2	4,60	1.4	0.23	< 0.2	< 0.2	< 0.2

En la tabla se muestran concentraciones elevadas de Fe, Zn y Pb en varias muestras. Los resultados elevados de azufre total evidencia la ocurrencia de los procesos de lixiviación ácida de los sulfuros en las menas primarias: pirita, galena y esfalerita. Los resultados corroboran la apreciable contaminación ambiental de la región de estudio. Las concentraciones se

encuentran por encima de los límites permisibles de la NC: 27/1012 Vertimientos de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones.

En la **Tabla 4**, se presentan los resultados de las determinaciones de pH para las soluciones acuosas obtenidas en los sedimentos analizados según la Norma ASTM D-1293, correspondiente.

Tabla 4. Valores de pH y conductividad eléctrica en las soluciones acuosas de las fases sólidas (sedimentos) de las muestras descritas en la **Tabla 1**.

Muestras	pH	Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$
M-1	3,0	11,7
M-2	2,9	5,6
M-3	3,3	2,2
M-4	2,9	29,7
M- 5	3,2	3,3
M- 7	3,1	1,6
M- 8	7,2	1,4
M-9	3,5	26,5
M-10	7,1	11,5

Los bajos valores de pH evidencian la presencia de iones H_3O^+ y S^{2-} en las soluciones de los sedimentos, disueltos dentro de la matriz del sólido, los que al combinarse en solución acuosa y en presencia de aire reaccionan y dan lugar a la formación de ácido sulfúrico. Esto facilita la ocurrencia de los procesos DAM. Mediante las reacciones de oxidación-reducción de los sulfuros primarios a pH bajos, como la oxidación de la pirita con formación de sulfato de hierro (II) (FeSO_4) e hidróxido de hierro (II), y la oxidación del sulfato de hierro (II) a hierro (III), catalizados por *Acidithiobacillus Ferrooxidans* y la reacción del sulfato de hierro (II), propician estos procesos, según Zamora (2006).

Evaluación de microorganismos en el agua residual de la mina Santa Lucía

Para comprobar la presencia de microorganismos acidófilos en el agua de la mina Santa Lucía, se aisló la bacteria autótrofa, aerobia, quimiolitotrófica, mesófila y acidófila *Acidithiobacillus ferrooxidans* anteriormente conocida como *Thiobacillus ferrooxidans*, identificada en la investigación como AFSL1-09 con una concentración celular en estas aguas de 10^5 cel/ml. El crecimiento de los microorganismos se siguió por el análisis del contenido

de ión Fe^{3+} presentes en el medio de cultivo. Esta prueba permitió corroborar la ocurrencia de los procesos DAM en la mina de Santa Lucía y la incidencia de los microorganismos sobre la mineral pirita por ser la fase más sensible a la acción de los agentes microbiológicos. Para demostrar la acción biolixiviadora del microorganismo, se realizó la prueba de adaptación del microorganismo en contacto con un concentrado de flotación del yacimiento cubano arsenopirítico de La Demajagua. Con la prueba se corrobora la ocurrencia de los procesos DAM en la mina de Santa Lucía y el papel catalizador de los microorganismos acidófilos sobre los yacimientos sulfurosos piríticos de la región.

Evaluación de la Difracción de rayos-X Empleada

Mediante la difracción por rayos X de las muestras sólidas, se lograron identificar las principales fases mineralógicas existentes, lo que permitió evaluar la contaminación ambiental fundamentalmente por metales pesados que hoy presenta la región. En las **Figuras 1 y 2**, se exponen los difractogramas de la Muestra-4 que corresponde a las sales de color verde-amarillentas a la salida del socavón en Santa Lucía. La Muestra-9 corresponde al sedimento del manglar detrás de la planta Sulfometales.

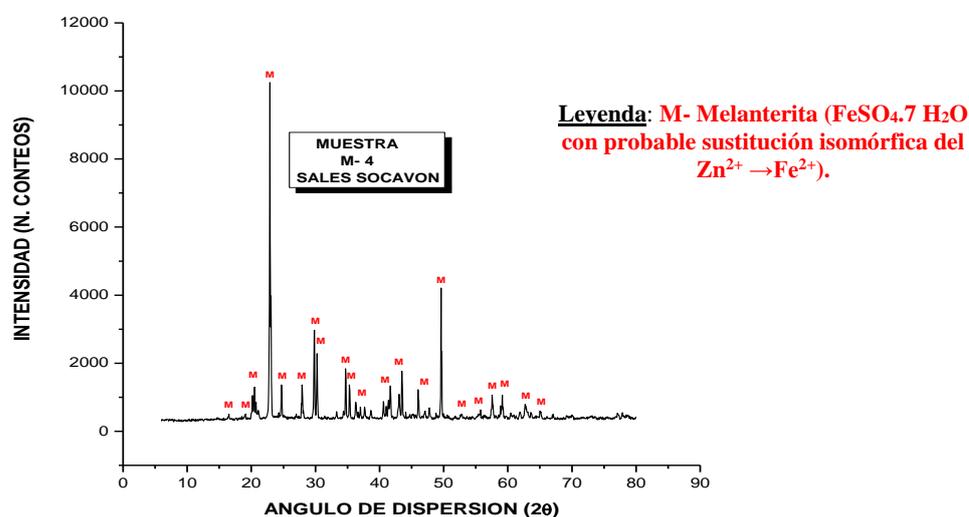


Figura 1. Difractograma de la Muestra M-4.

Como se observa en la **Figura 2**, prevalece la melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) esta fase que se forma *in situ* y por enriquecimiento secundario a expensas de la pirita sobre los entibados de madera con que se construyen en los socavones de las minas sulfurosas polimetálicas ricas en

pirita. Las aguas ácidas de las escorrentías en las menas primarias se infiltran hasta el socavón e interactúan con dichos entibados, donde existen además las condiciones físico-químicas adecuadas para la posterior precipitación de esta oxisal, lo que confirma lo reportado para este proceso en la literatura especializada (Manual de Mineralogía de Dana 1984). Estas sales se consideran una fuente importante de contaminación en el entorno ambiental de la región de estudio.

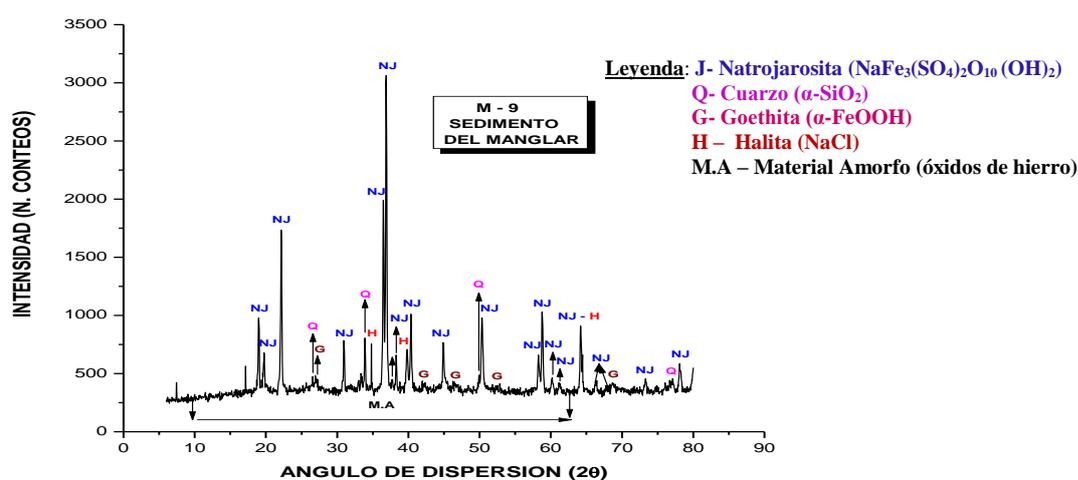


Figura 2. Difractograma de la Muestra M-9

El difractograma de la **Figura 2**, muestra el comportamiento mineralógico de los sedimentos del manglar que se encuentran por detrás de la planta de Sulfometales. La fase fundamental que se identificó fue la natrojarosita, que se forma a expensas de la especie plumbojarosita que contienen las cenizas de sulfometales. Estas se trasladan por los deslaves provocados por las lluvias, dispersión eólica y arrastre mecánico hacia el manglar. Además, la acción del aerosol marino que contiene iones Na^+ y Cl^- , la presencia agresiva de la sal, NaCl (halita) y material amorfo (tipo sulfatos de hierro) que facilitan la destrucción del manglar y del ecosistema costero.

Análisis de los resultados de la Microscopía Óptica realizada

Los análisis de microscopía óptica muestran resultados novedosos para la interpretación de los procesos de lixiviación producto de las aguas ácidas y demás agentes exógenos apreciablemente alterados, como la pirita, que se describen en las **Figuras 3 y 4**.



Figura 3. Microfotografía con agregado de pirita, esfalerita - barita.



Figura 4. Microfotografía sobre la alteración en nódulos y agujas.

En las imágenes anteriores se aprecia, la capa superficial del cuerpo mineral que se encuentra en estadio de transformación producto de la fuerte lixiviación que ha sido objeto en un largo periodo de tiempo para las muestras M-1 y M-2. Esto se acentúa en la muestra M-2 que teniendo relativamente la misma posición presenta una modificación mineral más fuerte llegando a transformarse gran cantidad de los agregados de pirita en nódulos radiales con agujas de color blanco y gran parte de la roca en óxidos de hierro, como se muestra en la **Figura 5.**

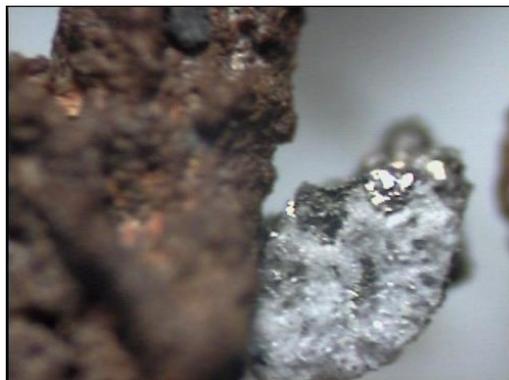


Figura 5. Microfotografía para la muestra M-2 con agregados aciculares de color blanco.

Para la Muestra M-4, es completamente atípica de la formación Santa Lucía ya que como se explica con anterioridad, se forma de la interacción de la pirita con la madera que se encuentra en las galerías, como se muestra en la microfotografía de la **Figura 6.**



Figura 6. Microfotografía para la muestra M.4 del mineral Melanterita depositado a la salida del socavón.

En la **Figura 7** se exponen muestras de Natrojarosita ($\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), reportadas por vez primera por la investigación como producto de la contaminación ambiental en la zona objeto de estudio, principalmente en sedimentos del manglar el cual representa el mineral más contaminante para la región, reportados según el Difractograma de la **Figura 4**, para la muestra M-9.



Figura 7. Mineral Natrojarosita en muestras de sedimentos en zona de manglar.

Secuencia del proceso del Drenaje Acido de Mina (DAM) por MEB-EDAX

Del análisis de Microscopía Electrónica de Barrido con Espectrometría Dispersiva en Energía (MEB-EDAX) se analizó la secuencia de reacciones que transcurren durante los procesos DAM asociados a los minerales sulfurosos. Se obtienen varias microfotografías, al dividir el análisis en dos partes: una individual respecto a las transformaciones que experimentaron los cristales de la pirita (morfología cúbica) y otra que se propone reconocer las posibles fases

oxidadas de los sulfuros primarios y sus productos de oxidación a sulfatos. Estos resultados constituyen un aporte novedoso para la investigación. Los resultados químicos de la técnica de análisis, reportan el incremento de los contenidos de CO₂ orgánico que se asocian a las bacterias *ferrooxidans*, el ZnO, SO₃, Al₂O₃ y la disminución del tenor de Fe₂O₃, respectivamente, como se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Resultados de los análisis semicuantitativos EDAX de los cristales de pirita.

Partícula	%SiO ₂	%SO ₃	%Fe ₂ O ₃	%ZnO	%CO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	Total
Pirita no alterada	53,80	30,93	15,27	100
Pirita alterada	29,66	42,31	12,01	1,53	4,40	8,75	0,32	1,02	100

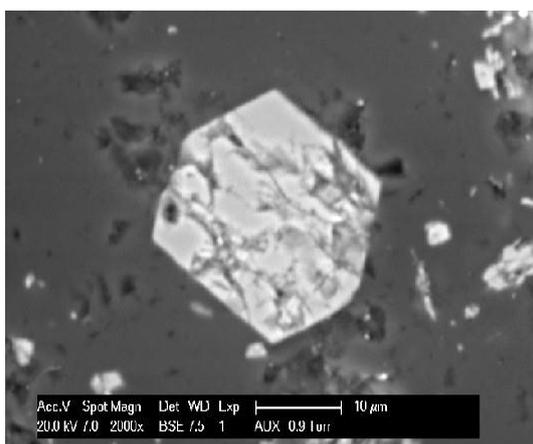


Figura 8. Microfotografía de la Pirita no alterada.

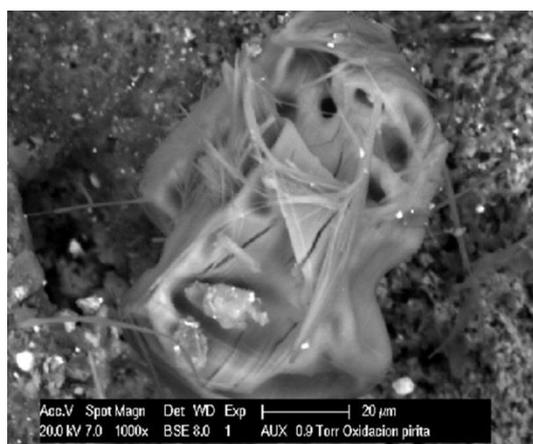


Figura 9. Microfotografía MEB del proceso final de oxidación de la Pirita.

En la microfotografía de la **Figura 8**, se muestra un cristal de pirita que presenta el típico hábito cúbico y que no sufrió ningún proceso de alteración. En la **Figura 9**, se observa un cristal individual de pirita donde es evidente que ocurrió el proceso de alteración DAM con oxidación en presencia de microorganismos acidófilos, el cual se encuentra deformado en su morfología cúbica. Se observa en su interior agujas muy finas que muestran su transformación a sulfatos de Fe (III).

Del análisis cuantitativo de las muestras en el área de estudio se evidencian procesos de contaminación por metales pesados de las aguas superficiales y suelos. Los procesos

producidos como el drenaje ácido de minas, están condicionados por la inadecuada recuperación de las áreas explotadas y la presencia de pasivos ambientales que agudizan la contaminación. Se constata la formación de fases mineralógicas nuevas en la zona costera producto de la interacción de pasivos ambientales con el agua de mar, como la *Natrojarosita*.

Identificación de Impactos Ambientales

A través de la matriz de Leopold se describen los impactos ambientales evaluados, donde se relacionan las acciones acometidas en las diferentes etapas del proyecto y su incidencia en cada indicador ambiental. De los 37 impactos ambientales identificados en la investigación, tres son de carácter positivo y 34 negativos.

La **Figura 10**, se muestra la clasificación de los impactos ambientales negativos según la importancia, lo que evidencia la necesidad de instrumentar medidas de mitigación. La totalidad de los impactos identificados clasifican como severos.

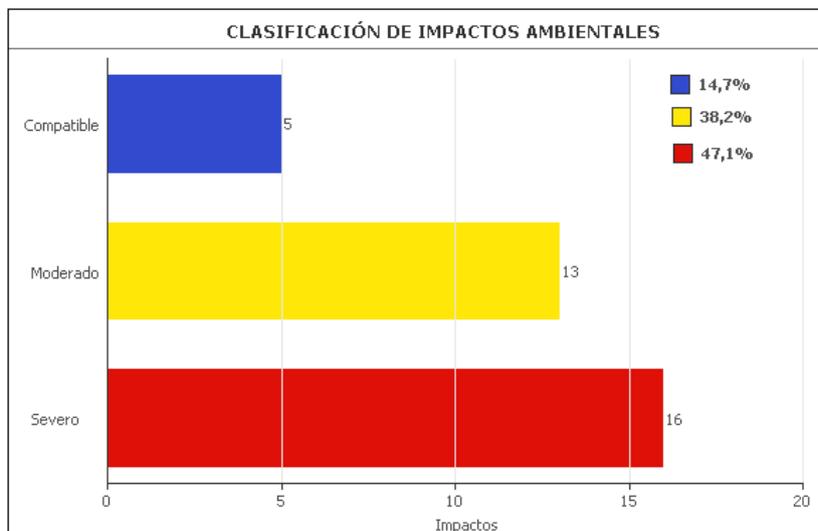


Figura 10. Clasificación de acuerdo a su importancia.

La matriz de evaluación impactos ambientales negativos permite identificar las variables más afectadas como se muestra en la **Figura 11**.

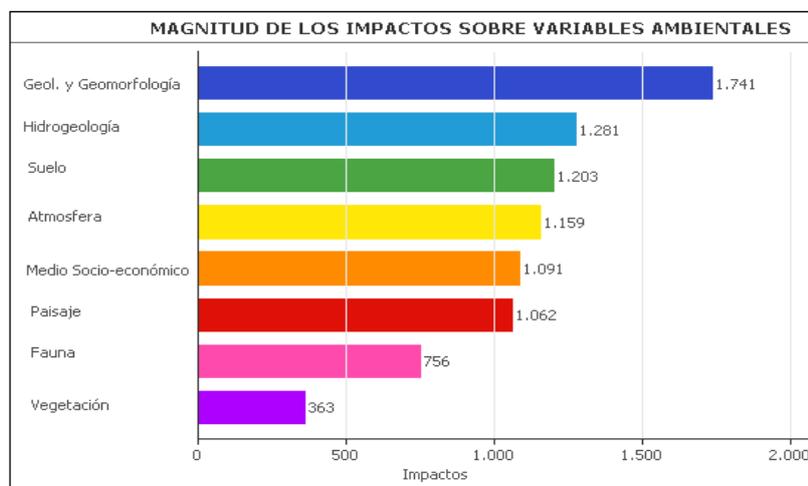


Figura 11. Magnitud de los Impactos Ambientales en las variables analizadas.

En la Figura anterior, se representa la relación de las variables ambientales estudiadas con la magnitud del impacto originado.

Medidas de Mitigación

Al realizar la evaluación impactos ambientales por la actividad minera metalúrgica en la región, se proponen las medidas de mitigación y monitoreo de los impactos negativos. Se dividen en medidas para la reforestación de las áreas afectadas con las especies autóctonas y resistentes a estas condiciones ambientales. Se proponen medidas tecnológicas para el acondicionamiento de las áreas, tales como los procesos de retaludamiento y conformación de la presa de colas, canalización de las aguas residuales, impermeabilización de los pasivos ambientales y del sellado del socavón en Santa Lucía. En la investigación, se determinó como agente neutralizante más efectivo el óxido de calcio (cal viva), por su reactividad para la remoción de los metales en los efluentes del DAM de Santa Lucía, Castellanos y la planta de Sulfometales.

Medidas de monitoreo

Las principales medidas de monitoreo propuestas en la investigación se relacionan con el monitoreo anual de las aguas residuales producto de las escorrentías y los cuerpos de aguas superficiales ríos Santa Lucía y Palma. El monitoreo de los suelos asociados a la región de

estudio y las evaluaciones de los índices de supervivencias de las áreas reforestadas, así como, realizar monitoreos de contaminantes atmosféricos.

CONCLUSIONES

Se corrobora mediante la combinación de técnicas analíticas modernas los intensos procesos drenaje ácidos de minas, que confirman el severo deterioro ambiental actual y progresivo de la región objeto de estudio.

Se reporta por vez primera la identificación de dos fases mineralógicas que facilitan la contaminación de la región, la oxisal Melanterita y la Nnatrojarosita.

Se confirma la incidencia de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* anteriormente conocida como *Thiobacillus ferrooxidans* identificada como: AFSL1-09 en el proceso de generación de aguas ácidas de la mina de Santa Lucía.

Se identificaron los principales impactos ambientales de acuerdo a su magnitud y su importancia los cuales permitieron establecer integralmente las medidas de mitigación y monitoreo.

Las medidas de mitigación y monitoreo como resultado de la investigación implementadas en el proyecto de recuperación de la región permiten mitigar y monitorear los impactos ambientales negativos generados a lo largo de los años por la explotación irracional de los recursos naturales en los ecosistemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso-Olmo E. *et al.* 1995: Caracterización y tratamiento de efluentes sólidos y líquidos generados por el Complejo "Oro Castellanos" y "Santa Lucía"; Informe Técnico, CIPIMM.
- Alonso, J.A; Cabrera, I.; Pinto, A.; Cozzi, G.; Delgado, B.; Gallardo, D.; Valdivia, G.; Casanova, A.; Díaz, A.; Díaz, N.; Águila, A.; Canel, L.; Trueba, R. y Rodríguez, J.C. 2011: Principales asociaciones mineralógicas de elementos potencialmente tóxicos y geodisponibles en el pasivo minero Santa Lucía. En: IV Congreso cubano de Minería 2011, Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales [CDROM] ISBN 978-959-7117-30-8.

- Cañete, C. *et al.* 2009. Estudio de la degradación ambiental de la minería en la región de Santa Lucía en el Occidente de Cuba. Memorias del evento GEOCIENCIAS 2009, 3^{ra} Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Cuba, ISBN 978-959-7117-19-3.
- Cañete, C.; Krebs, A.; Marmoz, L.; Ponce, N.; Milián, E. y Barrios, E. 2011. Riesgos ambientales provocados por el pasivo ambiental de Santa Lucía, Pinar del Río. En: IV Congreso cubano de minería "GEOCIENCIAS 2011", Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales [CD-ROM] ISBN 978-959-7117-30-8.
- Delgado, B.; Lubian, M.; Cortés, N. y Milián, E. 2011. Metodología para inventariar pasivos mineros ambientales en la zona Santa Lucía. En: IV Congreso cubano de minería "GEOCIENCIAS 2011", Cierres de Minas y Pasivos Mineros Ambientales. CD ROM-ISBN 978-959-7117-30-8.
- Delgado B. *et al.* 2009. Identificación de pasivos ambientales mineros y remediación ambiental del Drenaje Acido de la Mina Santa Lucía. Informe de Investigación, Primera Etapa, Proyecto 62020, CIPIMM, MINBAS.
- Figueredo, M. 1998. Caracterización y tratamiento de los desechos sólidos y líquidos de la planta de sulfometales. Medidas de mitigación ambiental, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química, ISPJAE.
- Gallardo, D. 2009. *Impacto Ambiental de la actividad geólogo-minera: Caso de estudio, el yacimiento "Santa Lucía"*, Pinar del Río, III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 16-20 de Marzo, La Habana, Cuba Memorias del evento GEOCIENCIAS 2009, 3^{ra} Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Cuba, ISBN 978-959-7117-19-3.
- Gallardo, D.; "Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río". *Revista Avances*, 2013, vol. XV, núm. 1, pp. 94-108.
- Henning, K.H. y Stöör, M. 1986. Electron Micrographs (TEM, SEM) of clays and clay minerals, Akademie- Verlag, Berlin, 350 p.
- Karavaiko G.I.; Kuznetsov S.I.; Golomzik A.I. 1972. Role of microorganism in leaching of metals from ores, Nauka, Moscow, 248p.
- Lawrence, R. W, Wang, Y. 1997. Determination of neutralization potential acid rock drainage *in* Proceedings from the Fourth International Conference On Acid Rock Drainage, May 31-June 6, 1997, Vancouver BC.: Vancouver BC American Society of Surface Mining and Reclamation, vol 1: 15-30
- Manual de Mineralogía de Dana. 1984, 3^{ra} edición, Editorial Reverté, S.A, pag.345.
- Norma ASTM D-1293. Determinación del valor de pH en aguas y sedimentos.
- Norma Cubana NC- 27/2012. Vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones.
- Salvadó, V. 2009. Caracterización de Pasivos Mineros y evaluación del riesgo ambiental asociado a la movilidad y biodisponibilidad de los metales. Memorias del evento GEOCIENCIAS 2009, 3^{ra} Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Cuba, ISBN 978-959-7117-19-3.
- Silverman, M.P, Lundgren D.C. 1959. *J Bacteriol.*, 77,642.

- Schwartz, H. 1965. *Werkst. Korros.*, 16, 93-103, 208-212, (en) *Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica*, parte 1. Mapas de Iberoamérica de Corrosividad Atmosférica, Proyecto MICAT, XV.1/CYTED, (1998).
- Schwartz, H. 1972. *Werkst. Korros.*, 23, 648 (en) *Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica*, parte 1. Mapas de Iberoamérica de Corrosividad Atmosférica, Proyecto MICAT, XV.1/CYTED, (1998).
- Zamora, G. 2006. Tratamiento físico-químico de Drenajes Ácidos de Mina: Manejo Ambiental de lodos de alta densidad-estabilidad-disposición final o aplicaciones en Tecnologías Limpias en las Industrias Extractivas Minero-Metalúrgica y Petrolera; Jornadas Iberoamericanas CFCE, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.