

Impacto provocado por la minería en la zona de Santa Lucía: evaluación físico-química

Damaris Gallardo-Martínez
Noel Bruguera-Amarán
José Antonio Díaz-Duque
Ileana Cabrera-Díaz

Resumen

En el trabajo se presenta la evaluación de los impactos ambientales provocados por la actividad minera en el campo mineral Santa Lucía-Castellanos, ubicado al noroeste de la provincia de Pinar del Río, Cuba. Para la identificación y evaluación de los impactos se utilizó la matriz causa-efecto, matriz de Leopold, que permitió establecer las medidas de mitigación, seguimiento y control de los impactos negativos generados por esta actividad en la región. Se reportan por vez primera las fases minerales melanterita y natrojarosita, que facilitan el proceso de contaminación y se logra el aislamiento de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, la cual posibilita la contaminación en los ecosistemas asociados por el efecto de drenaje ácido de minas.

Palabras clave: contaminación; metales pesados; evaluación de impactos ambientales; explotación minera; menas polimetálicas.

Environmental impacts assessment from mining operations in Santa Lucia: physic chemical evaluation

Abstract

An environmental assessment was conducted to evaluate the environmental impacts caused by the mining activity carried out in the Santa Lucia-Castellanos ore body located to the northeast of Pinar del Rio, Cuba. The Leopold cause-effect matrix was used to identify and evaluate the impacts, which allowed identifying the action items required to mitigate, follow-up and control the negative impacts caused by this activity on the region. Melanterite and natrojarosite phases are reported for the first time, which contributes to the process of contamination. It was possible to isolate the *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria, which contributes to the contamination of the associated ecosystem because of the acid drainage from the mines.

Keywords: contamination; heavy metals; environmental impact assessment; mining operations; poly-metal ore bodies.

1. INTRODUCCIÓN

La región de Santa Lucía, Pinar del Río, ha sido durante años objeto de una explotación minera intensiva que ha ocasionado consecuencias negativas al medio ambiente. Las labores mineras han generado contaminación por metales pesados debido al arrastre de sedimentos ricos en estos metales que originan el drenaje ácido de pasivos ambientales mineros, contaminando las aguas superficiales y el litoral (Cañete 2009).

En las áreas explotadas donde existen afloramientos de mineralización sulfurosa, los agentes meteorizantes provocan la movilización de contaminantes hacia las aguas, el suelo, la vegetación y el medio circundante, en general, impactando negativamente en los ecosistemas.

No obstante a la adopción de algunas medidas de mitigación de impactos, estas no han tenido un enfoque sistémico que permita hacer mínimos los efectos negativos. Tampoco se han llevado a cabo estudios para evaluar los impactos a partir de la correlación de las 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 2009).

Por tal motivo se hace necesario realizar la evaluación geoambiental de los impactos negativos provocados por elementos contaminantes de la actividad minero-metalúrgica en Santa Lucía, para realizar un diseño efectivo de las medidas de mitigación y monitoreo para la recuperación de la región.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante el método geológico de itinerarios irregulares se eligieron 14 puntos de muestreo, teniendo en cuenta para la selección la extensión de la contaminación in situ en cada zona de interés y la experiencia de muestreo. En la Tabla 1 se describen las muestras tomadas.

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

CÓDIGO	Descripción de las muestras
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 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 socavón
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 (<i>in situ</i>)
M-10	Sedimentos del muelle detrás de la planta de sulfometales
M-10A	Muestra de agua del propio río Santa Lucía tomada <i>in situ</i>
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 estéril proveniente del yacimiento 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 muestero de las pilas en la planta de sulfometales

Se evaluó la peligrosidad del proceso de drenaje ácido de minas (DAM) dada las características de las menas y los residuos asociados a pasivos ambientales mineros ubicados en la región y que constituyen una fuente importante de contaminación por metales pesados. Este proceso permitió conocer, según los resultados analizados, el grado de afectación de cada variable ambiental estudiada.

Todas las muestras sólidas (sedimentos y minerales) se secaron hasta temperatura ambiente y se molieron por debajo de los 0,074 mm para efectuar los análisis químicos y mineralógicos.

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.

Se emplearon varias técnicas de análisis cuantitativos para la evaluación de los impactos negativos de la actividad minero-metalúrgica en la región.

2.1. Análisis químico y mineralógico

Los análisis químicos de elementos mayoritarios y trazas se realizaron empleando los métodos de disolución ácida y fusión con metaborato de litio. 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.

2.2. Difracción de rayos-X (DRX)

Se obtuvieron 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. Se obtuvo la composición mineralógica típica de las menas, así como la composición de los residuos sólidos, sales y sedimentos, con presencia del sulfuro primario (pirita).

2.3. Microscopía electrónica de barrido con espectrometría dispersiva en energía

Las microestructuras de las muestras se observaron 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 (EDAX). 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.

2.4. 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 Meteoric Water Mobility Procedure (MWMP, siglas en inglés) (Nevada Mining Association 1996).

2.5. Prueba estática estándar de conteo ácido-base

Este procedimiento permitió obtener la capacidad de neutralización de la muestra determinando el ácido consumido durante la digestión con un exceso de este.

2.6. 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: 27:2009.

La neutralización/precipitación con cal (como CaO o Ca(OH)₂) se realizó por el procedimiento analítico descrito por Pesci, Oliver & Wichlacz (1989), Lawrence & Wang (1997) y Price, Morin & Hutt (1997). 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.

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

En los yacimientos sulfurados 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. Se reportan Thiobacillus, Acidithiobacillus y Leptospirillum como microorganismos presentes en los sedimentos de los diques de colas y

escombreras, los cuales utilizan la energía que se libera de la oxidación del hierro para su metabolismo. Estas bacterias tienen preferencia por los sulfuros que contienen hierro (Fe^{2+}), como la pirita. Su oxidación es acelerada por la actividad microbiana, lo que incrementa la producción de drenaje ácido de minas (Nordstrom & Alpers 1999; Dold & Fontboté 2001 y Nordstrom 2003).

Para comprobar la presencia de microorganismos en las muestras de agua del drenaje de la mina Santa Lucía se realizó el aislamiento de microorganismos acidófilos. Se utilizó el medio 9K utilizado por Karavaiko, Kuznesov & 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.

2.8. Metodología de evaluación de impacto ambiental

Se utilizó la matriz de Leopold (1971). 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 de explotación 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.

2.9. Identificación y evaluación de los impactos ambientales

La metodología utilizada permitió identificar y evaluar los impactos ambientales generados sobre cada una de las variables en los yacimientos Santa Lucía, Castellanos y la planta de sulfometales. 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 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis químicos de elementos mayoritarios y trazas

Los resultados evidenciaron la contaminación ambiental por metales pesados de la región, como lo reportan estudios de Cañete (2011) y Delgado y colaboradores (2011), para este tipo de yacimientos.

La Tabla 2 muestra los resultados de los análisis químicos de rocas y sedimentos en la región. Con el objetivo de facilitar el cálculo mineralógico y determinar los elementos que tienen las fases mineralógicas de las muestras 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. Composición química de elementos mayoritarios en yacimiento Santa Lucía, Castellanos y planta de sulfometales (%)

Mtra	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	30,31	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	42,46	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	54,48	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	ND	0,08	20,69	0,16	0,06	5,01	ND	0,15	0,16	ND	0,01	0,13	74,18
M-5	76,01	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	67,53	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	65,45	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	24,25	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	71,23	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	71,85	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	85,67	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	58,42	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 piritó-polimetálicas 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, que corrobora los resultados de Alonso et al. (2011). Se evidencia en las muestras analizadas cercanas a la mena

primaria la disminución de los contenidos de Fe^{2+} (FeO), lo cual indica la ocurrencia de procesos de drenaje ácido de minas a partir de la reacción de lixiviación del sulfuro de hierro (II), pirita (FeS).

Del análisis de la composición elemental de la muestra M-4 (sales a la salida del socavón) se constata cómo 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: SO_3 ; H_2O , 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 (1998).

En cuanto al bario (Ba) se reportaron altos contenidos en los sedimentos en las muestras analizadas, provocados por procesos físico-mecánicos de arrastre del 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; todo ello confirma los resultados de Cañete (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.

En la Tabla 3 aparecen concentraciones elevadas de Fe, Zn y Pb en varias muestras. Los resultados elevados de azufre total evidencian 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: 27:2009.

Tabla 3. Composición química de elementos contaminantes en aguas de río y drenajes líquidos (escorrentías)

Muestra	Concentración del elemento (mg/l)								
	Zn	Pb	Ba	Fe	S (total)	Mn	Ni	Mo	Sr
M-1A	6,06	64,98	< 0,2	14,70	15,30	420	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-2A	5,66	58,96	< 0,2	13,90	11,06	220	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-3A	81,00	62,38	< 0,2	14,12	15,76	450	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-4A	110,00	22,14	< 0,2	5,03	8,55	360	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-5A	< 1,8	< 0,4	< 0,2	6,40	480,00	0,27	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-6A	< 1,7	< 0,4	< 0,2	5,23	60,00	< 0,3	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-7A	< 2,1	< 0,4	< 0,2	1,83	970,00	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-8A	< 1,8	< 0,4	< 0,2	8,80	940,00	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
M-9A	< 1,7	< 0,4	< 0,2	4,60	85,00	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 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)

Muestras	pH	Conductividad, $\mu\text{S/cm}$
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 (Zamora 2006).

3.2. 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 Santa Lucía y la incidencia de los microorganismos sobre el mineral piritita 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. Como resultado de este proceso se obtuvo la curva de oxidación del hierro (Figura 1) como medida indirecta del crecimiento bacteriano.

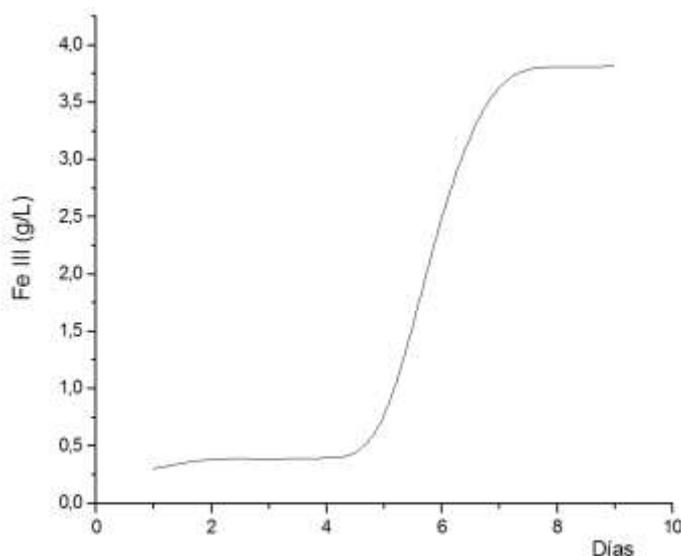


Figura 1. Curva de bio-oxidación del Fe^{2+} .

En el comportamiento, durante los primeros días correspondientes a la fase de latencia en la curva de crecimiento bacteriano, no hay variación del contenido de Fe^{2+} . Las cepas bacterianas se adaptan al medio circundante. El contenido de hierro oxidado crece rápidamente y refleja la fase de crecimiento exponencial en la cual las células aumentan de

tamaño, su resistencia al medio externo y su número aumenta en progresión geométrica y junto con ellas el contenido de Fe^{3+} en los licores. La concentración de Fe^{3+} alcanza valores cercanos a los 4 g/L.

3.3. Evaluación de las muestras por Difracción de rayos-X.

Mediante la difracción por rayos X de las muestras sólidas se identificaron las principales fases mineralógicas existentes, lo que permitió evaluar la contaminación ambiental fundamentalmente por metales pesados que hoy presenta la región. En las Figuras 2 y 3 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 de sulfometales.

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 (Dana 1984). Estas sales se consideran una fuente importante de contaminación en el entorno ambiental de la región de estudio.

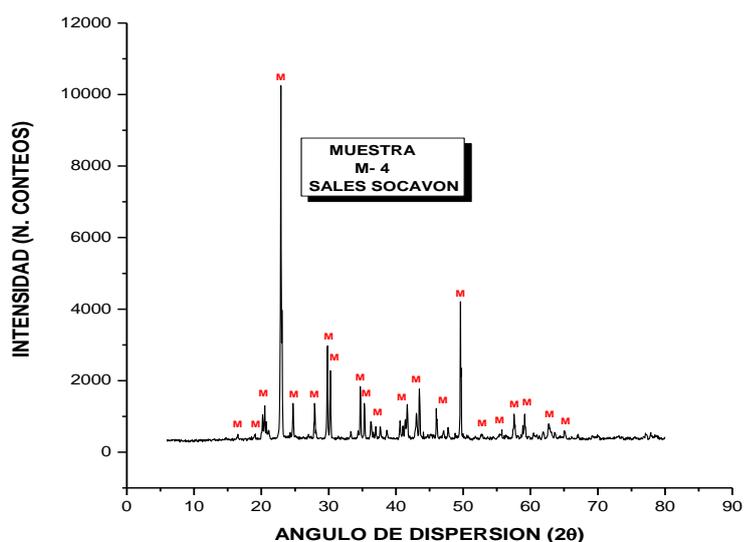
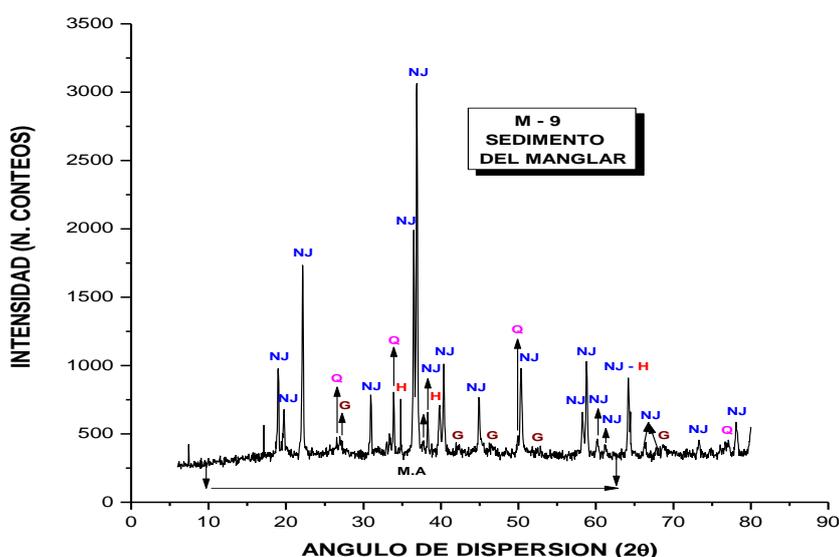


Figura 2. Difractograma de la muestra M-4.

El difractograma de la Figura 3 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, por 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.



Leyenda: NJ- Natrojarosita ($\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

Q- Cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$)

G- Goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$)

H - Halita (NaCl)

M.A - Material amorfo (óxidos de hierro)

Figura 3. Difractograma de la muestra M-9.

3.4. Análisis de los resultados de la microscopía óptica

Los análisis de microscopía óptica mostraron 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 siguientes.



Figura 4. Microfotografía con agregado de pirita, esfalerita-barita

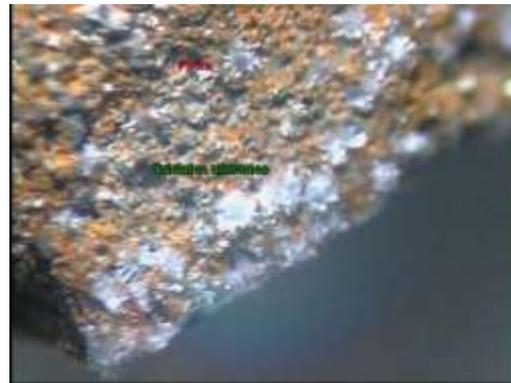


Figura 5. Microfotografía sobre la alteración en nódulos y agujas

En las imágenes anteriores se aprecia la capa superficial del cuerpo mineral que se encuentra en estadio de transformación debido a una fuerte lixiviación por 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 6.



Figura 6. Microfotografía para la muestra M-2 con agregados aciculares de color blanco.

La muestra M-4 es completamente atípica de la formación Santa Lucía ya que, como se ha explicado, se forma de la interacción de la pirita con la madera que se encuentra en las galerías, como se muestra en la microfotografía siguiente.



Figura 7. Microfotografía para la muestra M-4 del mineral melanterita depositado a la salida del socavón.

En la Figura 8 se exponen muestras de natrojarosita ($\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), reportadas por vez primera como un producto de la contaminación ambiental en la zona objeto de estudio, principalmente en los sedimentos del manglar el cual representa el mineral más contaminante para la región, revelado por el difractograma de la Figura 3, para la muestra M-9.



Figura 8. Mineral natrojarosita en muestras de sedimentos en zona de manglar.

3.5. Secuencia DAM por MEB-EDAX

Del resultado de MEB-EDAX 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 reportan el incremento de los contenidos de CO₂ orgánico que se asocian a las bacterias ferrooxidans, el ZnO, SO₃, Al₂O₃ y la disminución del 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	53,8	30,93	15,27	---	---	---	---	---	100
Pirita alterada	29,66	42,31	12,01	1,53	4,4	8,75	0,32	1,02	100

En la microfotografía de la Figura 9 se muestra un cristal de pirita que presenta el típico hábito cúbico y que no sufrió ningún proceso de alteración. En la Figura 10 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 advierte en su interior agujas muy finas que muestran su transformación a sulfatos de Fe (III)

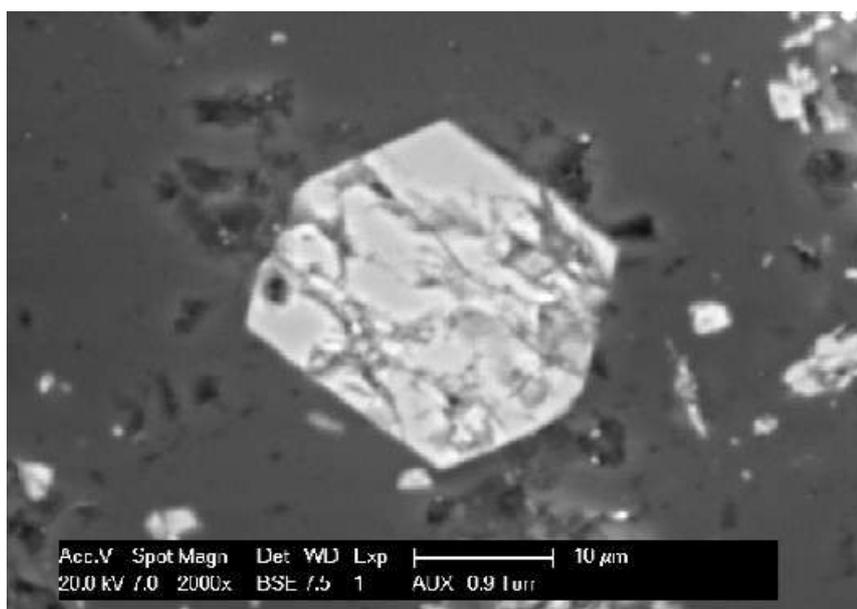


Figura 9. Microfotografía de la pirita no alterada.

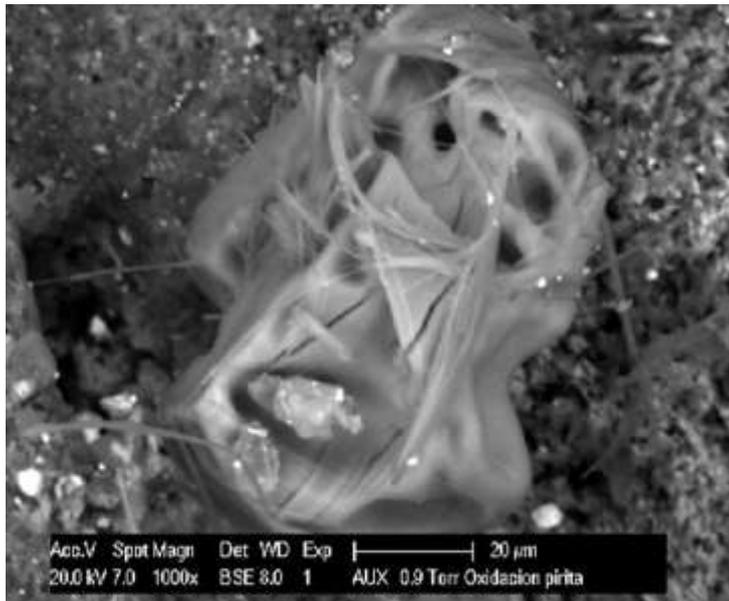


Figura 10. Microfotografía MEB del proceso final de oxidación de la pirita.

Del análisis cuantitativo de las muestras se evidencian procesos de contaminación de las aguas superficiales y suelos por metales pesados. Procesos como el drenaje ácido de minas están condicionados por la inadecuada recuperación de las áreas explotadas y por la presencia de pasivos ambientales que agudizan la contaminación. Se constata la formación de fases mineralógicas nuevas (natrojarosita) en la zona costera producto de la interacción de pasivos ambientales con el agua de mar.

3.6. 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 11 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.

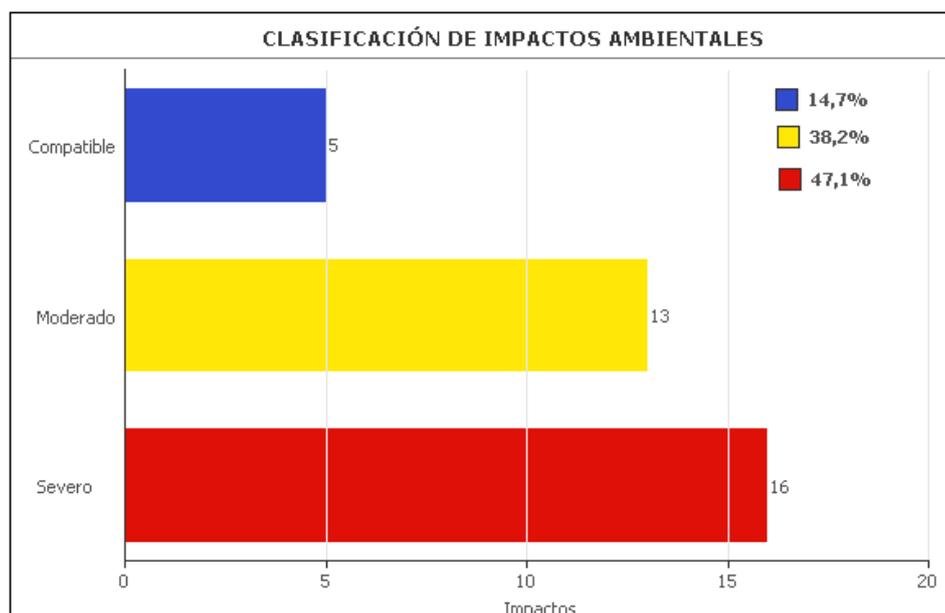


Figura 11. Clasificación de acuerdo a su importancia.

La matriz de evaluación de impactos ambientales negativos permite identificar las variables más afectadas (Figura 12).

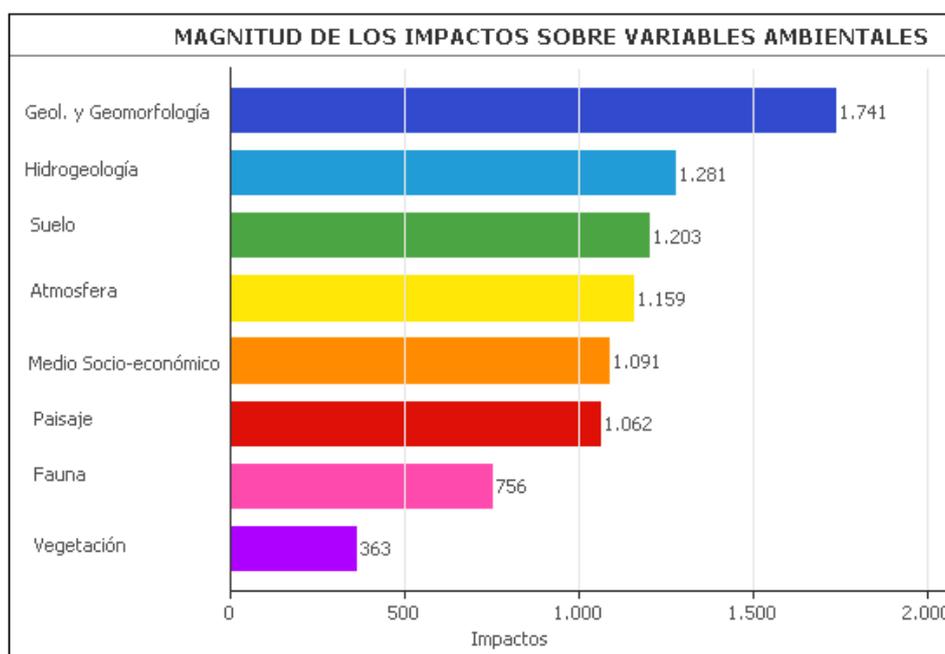


Figura 12. Magnitud de los impactos ambientales en las variables analizadas.

3.7. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación propuestas se dividieron en medidas para la reforestación de las áreas afectadas con las especies autóctonas y las resistentes a estas condiciones ambientales. Como medidas tecnológicas para el acondicionamiento de las áreas se proponen los procesos de

retaludamiento y conformación de la presa de colas, canalización de las aguas residuales, impermeabilización de pasivos ambientales y sellado del socavón en Santa Lucía.

Se propone 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.

3.8. Medidas de monitoreo

Las principales medidas de monitoreo propuestas se relacionan con el monitoreo anual de las aguas residuales producto de las escorrentías y los cuerpos de aguas superficiales de los 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.

4. CONCLUSIONES

- Se corrobora, mediante la combinación de técnicas analíticas modernas, la ocurrencia de intensos procesos de drenaje ácido de minas que confirman el severo deterioro ambiental, actual y progresivo de la región.
- Se reportan, por vez primera, dos fases mineralógicas que facilitan la contaminación de la región, la oxisal melanterita y la natrojarosita.
- En las aguas ácidas de la mina Santa Lucía se aisló la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, anteriormente conocida como *Thiobacillus ferrooxidans*, identificada como AFSL1-09, con una concentración celular de 1,105 cel/L en las mismas.
- 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.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) y Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), quienes colaboraron con la investigación mediante el financiamiento de acciones, la realización de ensayos y análisis así como con la contribución de su colectivo de trabajo para el desarrollo de la investigación.

6. REFERENCIAS

ALONSO, J.; CABRERA, I.; PINTO, A.; COZZI, G.; DELGADO, B.; GALLARDO, D. & ÁGUILA, A. 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. 2009: Estudio de la degradación ambiental de la minería en la región de Santa Lucía en el Occidente de Cuba. En: 3ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2009 (Memorias). Cuba. ISBN 978-959-7117-19-3.
- CAÑETE, C. 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.
- DANA, J. 1984: *Manual de mineralogía*. 3ra edición. Reverté S. A., p. 345.
- DELGADO, B.; LUBIAN, M.; CORTÉS, N. & MILIÁN, E. 2011: Metodología para inventariar pasivos mineros ambientales en la zona de 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.
- DOLD, B. & FONTBOTÉ, L. 2001: Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration* 74(1): 3-55.
- ESPIÑOZA, G. 2007: *Gestión y fundamentos de la evaluación de impacto ambiental*. Banco Interamericano de Desarrollo-BID. Centro de Estudios para el Desarrollo (CED). Chile.
- FIGUEREDO, F. 1998: *Caracterización y tratamiento de los desechos sólidos y líquidos de la planta de sulfometales. Medidas de mitigación ambiental*. Tesis de maestría. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- GALLARDO, D. 2009: Impacto ambiental de la actividad geólogo-minera: Caso de estudio, el yacimiento Santa Lucía, Pinar del Río. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2009 (Memorias). La Habana, Cuba, 16-20 de marzo. ISBN 978-959-7117-19-3.
- GALLARDO, D. 2013: Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río. *Revista Avances* XV(1): 94-108.
- KARAVAIKO, G. I.; KUZNEV, S. I. & GOLOMZYK, A. E. 1972: *Role of microorganism in leaching of metals from ores*. Nauka, Moscow, 248 p.
- 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, Vancouver BC American Society of Surface Mining and Reclamation 1: 15-30.
- LEOPOLD, L. B. 1971: A procedure for evaluating environmental impact 28(2). US Dept. of the Interior.

- NEVADA MINING ASSOCIATION. 1996: Meteoric Water Mobility Procedure (MWMP), standardized Column Percolation Test Procedure, Nevada Mining Association. Reno.
- NORMA ASTM D-1293: Determinación del valor de pH en aguas y sedimentos.
- NORMA CUBANA NC-27/2009: Vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. ONN. La Habana, Cuba
- NORDSTROM, D. K. & ALPERS, C. N. 1999: Geochemistry of Acid Mine Waters. *Reviews in economic geology* 6: 133-160.
- NORDSTROM, D. K. 2003: Effects of Microbiological and Geochemical Interactions in Mine Drainage. *Environmental Aspects of Mine Wastes, Short Course Series* 31: 227-238.
- PESCI, B.; OLIVER, D. J. & WICHLACZ, P. 1989: An electrochemical method of measuring rate of ferrous to ferric iron with oxygen in the presence of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Biotechnology and Bioengineering* 33(4): 428-439.
- PRICE, W. A.; Morin, K. & Hutt, N. 1997: Guidelines for the prediction of acid rock drainage. Part II. In: Proceedings from the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver BC American Society of Surface Mining and Reclamation, May 31-June 6, 449-464 p.
- SALVADÓ, V; 2009: Caracterización de Pasivos Mineros y evaluación del riesgo ambiental asociado a la movilidad y biodisponibilidad de los metales. 3ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2009 (Memorias). Cuba. ISBN 978-959-7117-19-3.
- 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. En: Jornadas Iberoamericanas CFCE. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

Damaris Gallardo-Martínez, dgm@citma.vega.inf.cu

Ingeniera Metalúrgica. Profesora Asistente.
Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Cuba.

Noel Bruguera-Amarán, delegado@citma.vega.inf.cu

Doctor en Ciencias Metalúrgicas. Investigador Auxiliar.
Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Cuba.

José Antonio Díaz-Duque, diazduque@yahoo.com

Doctor en Ciencias Geológicas.
Instituto Técnico Superior José Antonio Echeverría. Cuba.

Ileana Cabrera-Díaz, iliana@cipimm.geominsal.minem.cu

Ingeniera Geóloga. Investigadora Agregada.
CIPIMM. Grupo Empresarial GEOMINSAL. Ministerio de Energía y Minas. Cuba.