

# Modelo de gestión ambiental integral para la actividad minero-metalúrgica en yacimientos sulfurosos de Santa Lucía, Pinar del Río

## Integrated environmental management model for mining-metallurgical activity in sulphurous deposits of Santa Lucía, Pinar del Río

Damaris Gallardo-Martínez<sup>1\*</sup>, Noel Bruguera-Amarán<sup>2</sup>, José A. Díaz-Duque<sup>3</sup>, José Francisco Lastra-Rivera<sup>4</sup>, José Alberto Pons-Herrera<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Delegación Territorial del CITMA, Pinar del Río, Cuba.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales, Pinar del Río, Cuba.

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica de La Habana *José Antonio Echeverría*, La Habana, Cuba.

<sup>4</sup>Universidad de Pinar del Río *Hermanos Saiz Montes de Oca*, Pinar del Río, Cuba.

<sup>5</sup>Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

\*Autor para la correspondencia: [regulatoria@citmapri.gob.cu](mailto:regulatoria@citmapri.gob.cu)

---

### Resumen

La presente investigación se centró en el diseño de un modelo de gestión ambiental integral con enfoque ecosistémico, destinado a la industria minero-metalúrgica en Santa Lucía, municipio de Minas de Matahambre, Pinar del Río. Como instrumentos se emplearon la evaluación de impacto ambiental y la evaluación ambiental estratégica, esta última aplicada por primera vez al sector minero-metalúrgico en el país. La matriz causa-efecto permitió identificar 37 impactos ambientales asociados a los tres ecosistemas más afectados en la región (montañoso, de agua dulce y el manglar), para los cuales se elaboraron medidas de mitigación, seguimiento y control. Se diseñó y calculó el índice general de impactos negativos para orientar a los decisores en las empresas. Se establecen nuevos indicadores para evaluar la gestión ambiental.

**Palabras clave:** impacto ambiental; evaluación ambiental estratégica; minería; metalurgia; menas polimetálicas.

### **Abstract**

This research focused on designing a comprehensive environmental management model with a systemic approach, aimed at the mining-metallurgical industry in Santa Lucia, Minas de Matahambre municipality, Pinar del Río. Environmental impact assessment and the strategic environmental assessment were used as instruments. The cause-effect matrix allowed to identify 37 environmental impacts associated with the three most affected ecosystems in the region (mountainous, mangrove and drinking water), for which monitoring, mitigation and control measures were developed. General index of negative impacts was designed and calculated to guide decision makers in companies and new indicators were established to assess environmental management.

**Keywords:** environmental impact; strategic environmental assessment; mining; metallurgy; polymetallic ores.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

El sector minero se considera el mayor contaminante de los ecosistemas acuíferos, donde pueden encontrarse cargas adicionales de elementos potencialmente tóxicos (EPT): cobre, zinc, plomo, cadmio, plata, arsénico y manganeso, que evidencian la contaminación (Salvadó 2009). Asimismo, la actividad minero-metalúrgica es generadora de impactos ambientales negativos, los que se agudizan por el inadecuado manejo de estos procesos desde la concepción de los proyectos (Chaviano, Cervantes y Pierre 2011). Por ello, en las regiones mineras la aplicación de políticas ambientales es determinante para mitigar los problemas de esta índole provocados a los ecosistemas (García 2012).

Una vía para prevenir, contrarrestar y mitigar los efectos de los impactos negativos en el desarrollo minero lo constituyen las evaluaciones ambientales como herramientas de gestión; estas tienen por objetivo verificar el cumplimiento de las normativas y parámetros ambientales vigentes y dar a conocer el estado de los componentes del entorno, posibilitando la planificación de las acciones para mantener o mejorar las características del medio ambiente (Oyarzún 2008).

En Cuba, la implementación de evaluaciones ambientales inició en la década del 90 del pasado siglo. Sus metodologías y procedimientos aún están en fase

de desarrollo, lo que implica aceptar que es una temática en construcción y de permanente aprendizaje (Ramos 2016).

Los procesos de evaluación de impacto ambiental (EIA) son reconocidos y utilizados para proyectos, obras y otras actividades; el desarrollo minero-metalúrgico no se concibe en la actualidad sin realizar previamente estos procedimientos. En la EIA se establecen las medidas para mitigar los impactos ambientales negativos que se prevén ocasionar con la ejecución de los proyectos (Cañete *et al.* 2011). La inadecuada adopción de las medidas correctoras, el insuficiente apoyo de las políticas y la incorrecta ejecución de los procesos, inciden en el deterioro ambiental de los ecosistemas asociados a los proyectos (Alonso *et al.* 2010).

Por su parte, la evaluación ambiental estratégica (EAE) constituye otro valioso instrumento que incorpora la dimensión ambiental al proceso de planificación para mejorar su efectividad. Esta evaluación se orienta a la decisión y tiene como prioridad evaluar los riesgos en las políticas, programas o planes que se conciban. Para su correcta aplicación es necesario el desarrollo de modelos y métodos de inserción coherentes. Este instrumento es utilizado internacionalmente en la rama minero-metalúrgica, sin embargo, en Cuba no ha tenido la requerida aplicación.

En el proceso inversionista para la producción de concentrados de plomo y zinc del proyecto Castellanos-Santa Lucía no se aplicó la EAE. El marco regulatorio y legal vigente en el país (Ley 81 de Medio Ambiente 1997) no condiciona el uso de este instrumento (Gallardo *et al.* 2017).

La actividad minero-metalúrgica en Santa Lucía se inició en 1961 con la planta de producción de ácido sulfúrico, a partir de la pirita, de la empresa Sulfometales. La explotación del yacimiento Santa Lucía secundó a la del yacimiento Julio A. Mella, una vez cerrado este último (Amalfi 2015). En la década del 1990 se creó la empresa Oro Castellanos, que en el año 1994 inició sus operaciones para obtener oro y plata. Esta entidad explotó las reservas de los dos yacimientos sulfurados, pero los impactos ambientales negativos provocados por la explotación no se han logrado mitigar e inciden en los problemas ambientales existentes hoy en la región (Inversiones GAMMA 2013).

No fue hasta después de 1995 que los proyectos minero-metalúrgicos se sometieron a evaluaciones de impacto ambiental. Derivado de estas prácticas actualmente existen pasivos ambientales que afectan los ecosistemas.

Para implementar un modelo de desarrollo sostenible como es aspiración del país, debe garantizarse la interrelación en las dimensiones socioeconómicas

y ambientales, con los efectos que pueda provocar la actividad y las vías para la potenciación o mitigación de estos (Gallardo, Amalfi y Bruguera 2015). Las premisas para el diseño del modelo de gestión integral deben concebirse en las estrategias del desarrollo territorial; la población, las autoridades del territorio y las empresas vinculadas a la actividad han de estar sensibilizadas para llevar a cabo su implementación.

Este trabajo de investigación tuvo el objetivo de desarrollar un modelo de gestión ambiental integral con enfoque ecosistémico para la recuperación de los impactos negativos de la actividad minero-metalúrgica, asociada a los yacimientos sulfurados en Santa Lucía. Para ello se partió de la evaluación de los impactos ambientales provocados por la actividad minero-metalúrgica relacionada con este tipo de yacimientos en la región.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se emplearon métodos empíricos, teóricos y particulares. Los primeros, para el estudio de línea base y la identificación de los impactos ambientales. La observación se utilizó para obtener la información primaria del área de estudio y las referencias disponibles de trabajos anteriores descritos en estos procesos y por otros autores.

Las entrevistas y las encuestas se realizaron para obtener datos históricos, el estado del medio ambiente y los principales impactos socioeconómicos generados.

Dentro de los métodos teóricos: el análisis y síntesis, la deducción-inducción, el hipotético-deductivo, el sistémico y la modelación, permitieron comprender los impactos de la actividad minero-metalúrgica en los yacimientos sulfurados.

En la etapa de diagnóstico se consideraron resultados de otras investigaciones (Alfonso *et al.* 1995; CESIGMA 2007; Madrazo 2008; Cañete *et al.* 2011), así como los de evaluaciones realizadas por las empresas concesionarias de los yacimientos estudiados.

En el proceso de evaluación de impacto ambiental se empleó la matriz causa-efecto, basada en la matriz de Leopold, la cual fue creada para evaluar los impactos asociados a los procesos mineros (Leopold 1971). En los últimos años, esta matriz se ha enriquecido con el método de ponderación descrito a partir de los criterios estandarizados para la valoración de los impactos ambientales establecidos por Conesa-Fernández y demás colaboradores (1995). Se utilizó la valoración multicriterio por el Método Delphi (De la Maza 2007).

En Cuba se utiliza esta matriz conjugada para establecer relaciones causa-efecto de acuerdo con las características particulares de la región donde se aplique (Gallardo, Amalfi y Bruguera 2015), la que permitió determinar los impactos y las variables a evaluar en la región, así como su incidencia en los ecosistemas. Se analizaron todos los procesos desarrollados, tanto la explotación minera de los yacimientos sulfurosos, como la actividad metalúrgica y su efecto en los ecosistemas.

Para la evaluación de impactos en la matriz causa-efecto se identificaron las acciones del proyecto por etapas; 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, utilizados por Leknes (2001). En la matriz causa-efecto se tuvieron en cuenta los impactos identificados, las variables evaluadas, las etapas y las acciones desarrolladas para el proyecto de recuperación de la región, el resultado de la valoración según su importancia y el grado de recuperabilidad de los impactos.

Con los proyectos de recuperación, elaborados por la empresa Geominera Pinar del Río, de los yacimientos Santa Lucía y Castellanos, las licencias ambientales, las medidas del plan de manejo de desechos peligrosos para la UEB Liquidadora Sulfometales, los procesos de EIA de la UEB Producciones Industriales y la valoración de las encuestas realizadas (CITMA 2011), se elaboraron las medidas de mitigación, seguimiento y control.

Para determinar el índice general de impacto negativo ( $I_{GN}$ ) se consideraron los resultados de las matrices de valoración, para facilitar la gestión de los decisores. Se relacionaron cuantitativamente las variables, los impactos y las acciones que se realizan en cada etapa del proyecto. Este índice considera los impactos y su recuperabilidad como se muestra. Se relacionan el índice de impacto ambiental con el socioeconómico, expresados mediante la ecuación (1):

$$I_{GN} = I_A + I_{SE} \quad (1)$$

Donde:

$I_{GN}$ —Índice general de impactos negativos;  $I_A$ —Índice de impacto ambiental;  $I_{SE}$ —Índice de impacto socioeconómico.

El índice de impacto ambiental ( $I_A$ ) se calcula realizando la sumatoria del valor de la importancia del impacto para cada variable, dado por la ecuación (2):

$$I_A = \sum (I_v + I_{GG} + I_S + I_H + I_F + I_P + I_{At}) \quad (2)$$

Donde:

$I_A$ –Índice de impacto ambiental;  $I_V$ –Impacto en la vegetación;  $I_{GG}$ –Impacto en geología y geomorfología;  $I_S$ –Impacto en suelos;  $I_H$ –Impacto en hidrogeología superficial y subterránea;  $I_F$ –Impacto en fauna;  $I_P$ –Impacto en paisaje;  $I_{At}$ –Impacto en atmósfera.

El índice de impacto socioeconómico ( $I_{SE}$ ) se cuantifica como el valor de acuerdo con la importancia del impacto socioeconómico, representado en la matriz de valoración, dado por la ecuación (3):

$$I_{SE} = I_{ISE} \quad (3)$$

Donde:

$I_{SE}$ –Índice de impacto socioeconómico;  $I_{ISE}$ –Impacto socioeconómico.

Utilizando los criterios similares de valoración según la matriz, se relacionó la recuperabilidad de estos impactos a través de la ecuación (4):

$$I_{GN} = I_R + I_{irr} \quad (4)$$

Donde:

$I_{GN}$ –Índice general de impacto negativo;  $I_R$ –Índice de recuperabilidad;  $I_{irr}$ –Índice de impactos irrecuperables.

Para calcular el índice de recuperabilidad ( $I_R$ ), se relacionaron las posibilidades de la mitigación inmediata y a mediano plazo de los impactos, mediante la ecuación (5):

$$I_R = \Sigma (I_m + I_{in} + I_{mp}) \quad (5)$$

Donde:

$I_R$ –Índice de recuperabilidad;  $I_m$ –Impactos mitigables;  $I_{in}$ –Impactos de recuperación inmediata;  $I_{mp}$ –Impactos de recuperación a mediano plazo.

En el caso de los impactos irrecuperables ( $I_{irr}$ ), se considera que:

$$I_{irr} = I_{Iirr} \quad (6)$$

Donde:

$I_{irr}$ –Índice de impactos irrecuperables;  $I_{Iirr}$ –Impactos irrecuperables.

El procedimiento para el cálculo del índice consta de los siguientes pasos: La confección de las matrices de valoración atendiendo a los impactos y su recuperabilidad. Se calcula el índice de impacto ambiental y socioeconómico por las ecuaciones (2) y (3). Con la ecuación (1) se calcula el índice general

de impacto negativo. Para relacionarlo con la recuperabilidad se determinan los índices según la posibilidad de mitigación, mediante las ecuaciones (5) y (6), y se desarrolla la ecuación (4).

Para el diseño del modelo de gestión ambiental integral se aplicaron los métodos particulares de la evaluación ambiental a nivel internacional, tales como la EIA y la EAE. Se asegura la integración de los componentes social, económico y ambiental en la recuperación de los ecosistemas y la mejora de la calidad de vida de la población. Se revelaron las etapas principales de su desenvolvimiento y las conexiones históricas fundamentales de esta actividad en la region.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En Santa Lucía el destape de los yacimientos polimetálicos sulfurosos favorece la ocurrencia de procesos químicos y bioquímicos que generan drenajes ácidos. De la evaluación integral ambiental realizada desde el enfoque ecosistémico se definen como los principales problemas ambientales los siguientes: la contaminación por metales pesados en las aguas superficiales, la zona costera y los suelos; la contaminación atmosférica en la producción metalúrgica; la deforestación; la degradación de los suelos; entre otros. Los ecosistemas afectados directamente son el montañoso, el agua dulce y el manglar (Figuras 1, 2 y 3).



Figura 1. Explotación de la cantera de Santa Lucía altera el ecosistema montañoso.



Figura 2. Drenajes ácidos con escorrentías hacia el ecosistema de agua dulce.



Figura 3. Residuales con metales pesados de las cenizas de pirita tostada en el ecosistema manglar.

Se comprobó que los pasivos ambientales generados inciden en las afectaciones ambientales que se registran en los análisis de los ecosistemas, como se muestra en la Figura 4.

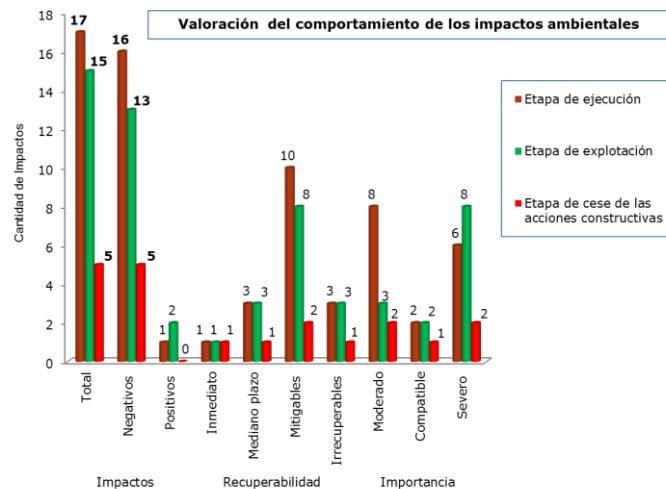


Figura 4. Valoración del comportamiento de los impactos según cantidad, importancia y grado de recuperabilidad.



Se evidencia la incidencia negativa de los proyectos desarrollados en las condiciones medioambientales de la región de estudio, donde las características sulfurosas de los yacimientos, los inventarios de pasivos ambientales que persisten y la baja recuperación de las áreas afectadas en los procesos de cierre son las causas fundamentales del deterioro ambiental del territorio.

Al decir de Romero, Armienta y González (2007) y Martorell (2010) en los procesos minero-metalúrgicos se generan desechos peligrosos y pasivos que en su interacción con el medio propician alteraciones a los ecosistemas. La figura anterior refleja los impactos generados, la clasificación según su importancia y el grado de recuperabilidad. Se reportan 37 impactos ambientales, desglosados para cada una de las etapas, los que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Impactos ambientales que se producen por cada etapa del proyecto

<b>Impactos ambientales por cada etapa del proyecto</b>		
<b>Etapa de ejecución</b>	<b>Etapa de explotación</b>	<b>Etapa de cese</b>
<b>1.</b> Pérdida de la cobertura vegetal por el desbroce, el destape de la mena	<b>18.</b> Alteración de estabilidad estructural del macizo por perforación y voladuras	<b>33.</b> Afectación a los pobladores por la reducción de la oferta de empleo
<b>2.</b> Alteración del macizo rocoso por el desbroce	<b>19.</b> Compactación de suelos en áreas de procesamiento mineral	<b>34.</b> Abandono de equipos, partes e instalaciones tecnológicas
<b>3.</b> Afectaciones a la flora y la fauna autóctona	<b>20.</b> Incremento de contaminación sonora por voladuras y actividad tecnológica	<b>35.</b> Creación de depósitos de escombros y pasivos ambientales mineros
<b>4.</b> Incremento de los procesos erosivos por el destape del área	<b>21.</b> Contaminación atmosférica por las emisiones de gases y polvo	<b>36.</b> Contaminación de agua y suelo por los procesos de oxidación de sulfuros
<b>5.</b> Cambios morfológicos del lugar por los movimientos de tierra	<b>22.</b> Alteraciones al hábitat de la fauna	<b>37.</b> Depresión socioeconómica y de la calidad de vida de la población local
<b>6.</b> Creación de taludes artificiales por los cortes realizados al relieve	<b>23.</b> Contaminación de los suelos por la oxidación de sulfuros	
<b>7.</b> Compactación de los suelos por la maquinaria	<b>24.</b> Contaminación de las aguas superficiales y suelos por vertidos de residuos peligrosos	
<b>8.</b> Contaminación atmosférica por emisiones de gases y polvo	<b>25.</b> Acidificación y contaminación de las aguas	
<b>9.</b> Contaminación sonora por movimiento de máquinas y construcción de infraestructura		
<b>10.</b> Contaminación de las aguas superficiales y suelos residuales líquidos		

- |   |   |
|---|---|
| <p><b>11.</b> Acidificación y contaminación de las aguas por procesos DAM</p> <p><b>12.</b> Modificación del escurrimiento superficial</p> <p><b>13.</b> Contaminación de los suelos por oxidación de sulfuros</p> <p><b>14.</b> Contaminación atmosférica por dispersión eólica, originada por el movimiento de partículas</p> <p><b>15.</b> Modificación del paisaje</p> <p><b>16.</b> Generación de nuevas fuentes de empleo</p> <p><b>17.</b> Alteraciones en el modo de vida de los pobladores</p> | <p><b>26.</b> Incremento de los procesos erosivos por la extracción de mineral</p> <p><b>27.</b> Incremento en los cambios morfológicos del relieve</p> <p><b>28.</b> Modificación de escurrimiento superficial por escombreras</p> <p><b>29.</b> Contaminación atmosférica por autocombustión de piritas</p> <p><b>30.</b> Generación de desechos peligrosos</p> <p><b>31.</b> Mejoras de la transportación local</p> <p><b>32.</b> Obtención de nuevos productos con beneficios al país</p> |
|---|---|

Mediante la matriz causa-efecto se identificaron y evaluaron los impactos y las variables ambientales en los yacimientos Santa Lucía, Castellanos, la UEB Producciones Industriales y la UEB Liquidadora Sulfometales; asimismo se evaluó su incidencia en los ecosistemas que se encuentran asociados. La Tabla 2 reporta la matriz de identificación de impactos que relaciona las variables ambientales de acuerdo con las acciones a desarrollar y las etapas del proyecto.

Tabla 2. Matriz de identificación de impactos

Variables ambientales	ACCIONES DE LOS PROYECTOS												
	Etapa de ejecución							Etapa de explotación					Etapa de cese
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
Vegetación	1,3	1,3	1,3	3	---	---	---	---	---	---	---	35	
Geología y Geomorfología	4,5,6	2	2, 4, 5,6	---	---	5	18, 27	18,19, 27	---	---	---	---	

ACCIONES DE LOS PROYECTOS												
Variables ambientales	Etapa de ejecución							Etapa de explotación				Etapa de cese
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Suelo	1,4, 5,6, 7	1,2, 4,7	1,2,6, 7	4, 7	10,1 1, 13	---	---	19,23, 24, 26,30	19	---	23,2 4	36, 34, 35
Hidrogeología superficial y subterránea	4,5, 6,7, 12	2, 10,1 2	2,4,5, 10,12	---	10 11	10	18, 24	18,24, 25,26, 28, 30	24	---	24,2 5, 30	34, 35, 36
Fauna	1,3, 9	1,3	1,3	3, 9	---	---	22	22	---	---	22	35
Paisaje	1,3, 4,5, 6,7, 15	1, 15	1,5, 15	---	---	15	---	26, 28	---	---	---	34, 35
Atmósfera	8, 9	---	8, 9	8, 9	8,14	8, 9	20, 21	20,21, 29	20, 21, 29	---	21	---
Medio socio-económico	5,6, 16, 17	16, 17	12, 16, 17	16 17	10, 11	16 17	18	18,24, 25,28, 30,31, 32	20,2 1,29	31,3 2	30,2 4,25	33,34 35,36 37

La Figura 5 muestra el comportamiento de las variables ambientales según la valoración cuantitativa de los impactos, destacándose que las más afectadas son: el medio socioeconómico, el suelo y la hidrogeología superficial y subterránea. En los procesos de desarrollo minero-metalúrgico es vital realizar acciones de prevención que disminuyan estos impactos, así se contribuye a disminuir los gastos en la recuperación de las áreas dañadas. De la valoración cuantitativa de los impactos, teniendo en cuenta su importancia por las acciones de los proyectos minero-metalúrgicos y su relación con las variables evaluadas, se confirma que la inadecuada

recuperación de las áreas durante largos períodos, agudizan los impactos ambientales identificados en la región de estudio.

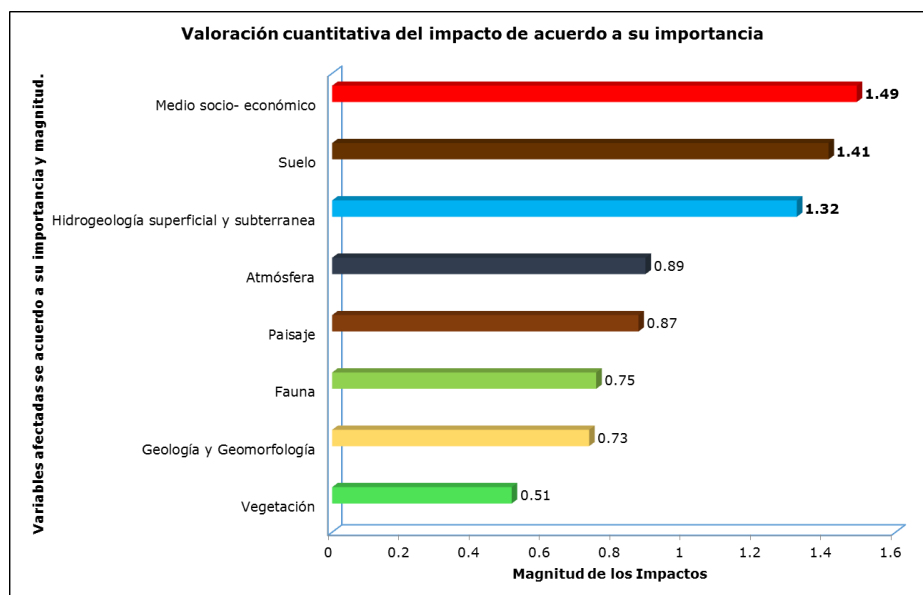


Figura 5. Valoración de las variables de acuerdo con la importancia de los impactos ambientales.

Se constata que los pasivos ambientales en los yacimientos sulfurosos favorecen los procesos físico-químicos y biológicos, que contribuyen a la contaminación de los ecosistemas estudiados.

### 3.1. Evaluación de la contaminación por metales pesados

Los resultados de los análisis químicos reflejan el quimismo característico de las menas polimetálicas en contenidos de Pb, Zn y Ba. Además, muestran la composición química típica de los sedimentos formados durante la intensa contaminación ácida existente, asociada a los yacimientos y a los pasivos ambientales, tal como se reporta en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los análisis químicos de elementos contaminantes en aguas de río y drenajes líquidos (escorrentías)

Muestra	Concentración de los elementos (mg/l)				
	Zn	Pb	Ba	Fe	S(total)
M-1A	6,0	64,9	<0,2	14,7	15,3
M-2A	5,6	58,9	<0,2	13,9	11,0
M-3A	81	62,3	<0,2	14,1	15,7
M-4A	110	22,1	<0,2	5,0	8,5
M-5A	<1,8	<0,4	<0,2	6,4	480

M-6A	<1,7	<0,4	<0,2	5,2	60
M-7A	<2,1	<0,4	<0,2	1,8	970
M-8A	<1,8	<0,4	<0,2	8,8	940
M-9A	<1,7	<0,4	<0,2	4,6	85
M-10A	<2,1	<0,4	<0,2	4,6	1,4
NC:27/12	<5,0	<1,0	<1,0	<5,0	< 5,0
NC:521/07	<10,0	<0,2	<2,0	<10,0	<10,0

Este comportamiento revela el incumplimiento de las normas: NC: 27/2012: Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado-Especificaciones y la NC: 521/2017: Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas, en valores de pH y concentraciones Fe, S<sub>(total)</sub> y Zn, respectivamente. En cuanto a las concentraciones de Zn, Pb y Fe fuera de los límites en aguas de río, en drenajes líquidos y el manglar, las más contaminadas son: cantera del yacimiento Santa Lucía, la salida del socavón y los alrededores de la Planta Sulfometales.

### 3.2. Índice general de impacto negativo

De especial relevancia para los tomadores de decisiones; se emplea como un instrumento necesario para utilizar con efectividad el financiamiento requerido en estos procesos. Facilita el diseño de las medidas de mitigación, seguimiento y control para la región de estudio. El índice general de impacto negativo se determina teniendo en cuenta los impactos y su recuperabilidad, así como lo formulado en las ecuaciones (1) y (2) y la Tabla 4.

Tabla 4. Relación entre los criterios de valoración de impactos con las variables ambientales

Variables ambientales	Criterios de valoración de impactos	Recuperable de inmediato	Recuperable a mediano plazo	Mitigable	Irrecuperable
Vegetación	507	0	0	247	260
Geología y Geomorfología	734	0	0	594	140
Suelo	1 409	0	96	1 252	61
Hidrogeología superficial y subterránea	1 323	21	200	1 041	61
Fauna	747	48	0	439	260
Paisaje	870	21	0	784	65

Atmósfera	886	189	0	0	697
Medio socio-económico	1 486	83	569	648	186
Total	7 962	362	865	5 005	1 730

A partir de la ecuación (1), el  $I_{GN}$  es:

$$I_{GN} = 6,476 + 1,486 = \mathbf{7,962}$$

Atendiendo a la ecuación (2), se tiene que:

$$I_{GN} = 6, 232 + 1,730 = \mathbf{7,962}$$

Con este resultado se obtiene una valoración cuantitativa en cuanto a los impactos que inciden en cada variable ambiental, con las acciones que lo provocan y las etapas donde se desarrollan estos. EL  $I_{GN}$  tiene gran importancia para el diseño de medidas de mitigación para proyectos que se encuentren en alguna de las etapas del desarrollo minero-metalúrgico. Permite a los especialistas y tecnólogos encargados de la conservación ambiental accionar en la mitigación de estos impactos.

### **3.3. Diseño de medidas de mitigación, seguimiento y control de los impactos negativos**

Para el diseño de las medidas de mitigación se analizaron las incidencias reportadas sobre los impactos identificados y evaluados en los ecosistemas.

#### **3.3.1. Ecosistema montañoso**

Se encuentra muy afectado por los pasivos mineros que originan gran parte de los impactos negativos identificados, como son: las canteras, las escombreras, las colas de los procesos desarrollados y los índices de deforestación y contaminación.

Las principales medidas a tener en cuenta de acuerdo con los impactos identificados son: confeccionar el esquema de reforestación de las áreas afectadas con capa vegetal y uso de especies xerofíticas resistentes a la sequía, como *Pinus tropicalis*, *Pinus caribaea*, *Quercus oleoides ssp. sagraeana* (Encinos), Yaba, y Ocuje del Pinar. Reforestar las escombreras y colas con pasto forrajero, evitar la dispersión de partículas. Retaludamiento para la disminución de las pendientes evitando su inestabilidad y los procesos erosivos. Impermeabilizar los depósitos de barita con arcilla. Sellar el socavón en la mina del yacimiento Santa Lucía mediante la voladura de las rocas estériles y utilizar neutralizantes. Tratar por vía química las aguas residuales.

Para el seguimiento, es menester establecer red de monitoreo y velar el comportamiento de las medidas aplicadas mediante expediciones que permitan evaluar la diversidad biológica, abundancia de especies y registro del estado del ecosistema.

### **3.3.2. Cuencas hidrográficas**

Se encuentran contaminadas debido a los procesos erosivos y los drenajes ácidos de los yacimientos, con altos índices metales pesados. Las principales medidas de recuperación se orientan a minimizar la contaminación en las áreas de los yacimientos que no afecten las aguas terrestres. Se deben emplear técnicas de fitorremediación con especies hiperacumuladoras de metales pesados y facilitar la descontaminación como con *Brassicaceae* (*Cruciferae*), descritas por Baker, Mcgrath y Reeves (2000); Contreras, Valencia y De La Fuente (2016). Se debe controlar el pH y las concentraciones de metales pesados. Reforestar las franjas hidrorreguladoras de los ríos y sus afluentes con especies autóctonas.

Para el seguimiento y control de las cuencas es necesario realizar muestreos de metales pesados y pH en diferentes puntos de los ríos, escurrimientos superficiales y la presa, para evaluar influencia del nuevo proceso inversionista.

### **3.3.3. Ecosistema manglar**

Es el más afectado de la región, por el grado de contaminación que presenta y el intercambio con pasivos ambientales que complejizan su situación. Las medidas a tomar son: construir un muro de contención que impida el intercambio entre las cenizas de pirita tostada y el agua de mar. Eliminar las escorias de plomo que se encuentran dispuestas inadecuadamente en la zona del manglar, para que no faciliten su contaminación. Reconstruir la presa de colas para las aguas residuales producto del proceso industrial y escorrentías de la pirita tostada y su neutralización. Comercializar el azufre brillante que se encuentra en los patios de la instalación. Impermeabilizar los depósitos de pirita tostada. Evacuar las torres que contienen desechos peligrosos. Instalar filtros en el proceso industrial para la obtención de plomo. Impermeabilizar las áreas de la planta procesadora de chatarra. Reforestar la zona del manglar.

### **3.4. Diseño de indicadores de gestión**

Partiendo del diseño de los modelos de presión, estado y respuesta (Tabla 5), según tipo, naturaleza y fase del proceso de gestión, se establecieron los indicadores para la actividad minero-metalúrgica, divididos en tres grupos:

- económicos, con tres indicadores y cinco criterios de medidas;
- sociales, con cuatro indicadores y 16 criterios de medidas;
- ambientales, con siete indicadores y 18 criterios de medida.

Su implementación permite evaluar la gestión de los recursos en relación a los tres componentes, tanto en términos de acciones realizadas, como de productos y transformaciones obtenidas.

La implementación de los indicadores elaborados permite evaluar la gestión de los recursos naturales en relación a las dimensiones económica, ambiental y social en función del desarrollo de la actividad, tanto en términos de acciones realizadas, como de productos y transformaciones obtenidas. El diseño de estos indicadores (Tabla 5) le permitió a la entidad EMINCAR S.A. su aplicación desde la etapa inicial de la inversión, el que constituye un paso favorable para el desarrollo del sistema integral de gestión ambiental empresarial.

Tabla 5. Indicadores y parámetros de gestión empresarial

Tipo de indicador	Parámetros de medida
<b>Indicadores económicos</b>	
1. Indicador de gestión económica	Producción anual vendida Ventas netas anuales Ayudas financieras de distintas Administraciones
2. Indicador de investigación y desarrollo	Inversión en I+D
3. Indicador de consumibles	Gastos asociados a extracción y tratamiento de recursos
<b>Indicadores sociales</b>	
1. Indicador de comunicación con la comunidad local	Valor monetario de las contribuciones en forma de donaciones de la empresa a la comunidad Índice de respuesta social Actividades de la empresa que promueven la implicación de la comunidad Inversiones en infraestructuras públicas



---

	Gastos en el ámbito local
	Servicios en el ámbito local
	Empleo total directo
	Empleo total indirecto
2. Indicador de empleo	Índice de estabilidad en el empleo
	Mano de obra local
	Formación anual de capital humano
3. Indicador de formación	Inversión en formación
	Índice de frecuencia
4. Indicador de seguridad y salud de los trabajadores	Índice de incidencia
	Índice de gravedad
	Duración media de las bajas

---

### **Indicadores ambientales**

---

1. Indicador de protección ambiental	Gasto total en protección ambiental
2. Indicador de eficiencia energética en la producción	Consumo directo de energía en el proceso productivo
	Consumo de energía procedente de fuentes renovables
	Consumo neto de agua primaria
3. Indicador de demanda de agua	Consumo de agua reciclada
	Recirculación en los circuitos de agua del proceso
	Superficie afectada por la actividad minera
4. Indicador de demanda de suelo	Volumen afectado por la actividad minera
	Superficie total restaurada a final de año
5. Indicador de uso de sustancias peligrosas	Sustancias muy tóxicas y tóxicas para el ser humano y los organismos vivos utilizados en el proceso productivo

	Sustancias nocivas para el ser humano y/o que pueden provocar a largo plazo efectos negativos para el medio ambiente utilizados en el proceso productivo
	Residuos mineros inertes vertidos en escombreras
	Residuos mineros no peligrosos no inertes vertidos
	Residuos mineros peligrosos vertidos en escombreras
6. Indicador de residuos	Productos intermedios en acopio temporal
	Residuos mineros reutilizados y/o reciclados y/o valorizados y/o empleados en la recuperación
	Residuos industriales generados en el proceso productivo
7. Indicador de incidentes medioambientales	Incidentes medioambientales documentados

### 3.5. Diseño del modelo de gestión ambiental con enfoque ecosistémico

Para el diseño del modelo se tuvieron en cuenta dos debilidades que tienen los sistemas de evaluación ambiental (SEA) en el país. Al no aplicar como instrumento de gestión la EAE para la actividad minero-metalúrgica y no utilizar de manera efectiva la participación ciudadana. El modelo es el resultado de la articulación de las dimensiones sociales, ambientales y económicas con los instrumentos de gestión, para desarrollar procesos ambientalmente seguros, como se representa en la Figura 6.

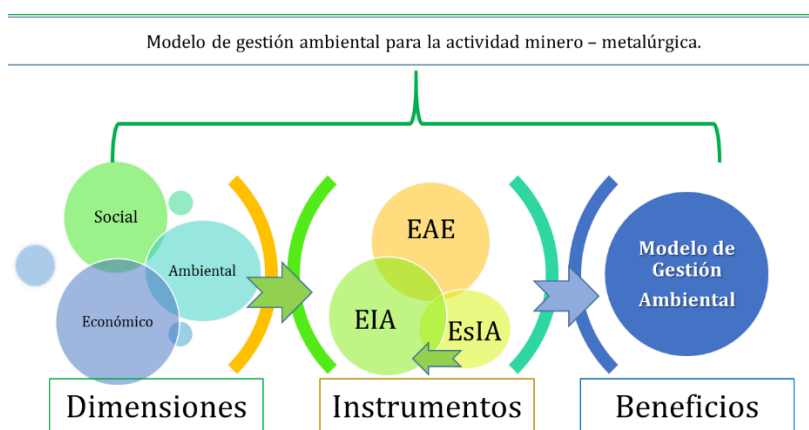


Figura 6. Modelo de Gestión Ambiental con enfoque ecosistémico para la actividad minero metalúrgica (Gallardo *et al.* 2017).

La EAE concibe la recolección de datos sobre la base de temas claves identificados durante el alcance, la evaluación de oportunidades y riesgos de varios escenarios; las recomendaciones en forma de notas de instrucción para las políticas, planes y programas; además, la evaluación de las partes claves afectadas. El desarrollo de un plan de seguimiento y el reporte de la EAE se muestra en la Figura 7. La EIA se realiza de acuerdo con la guía establecida por las autoridades regulatorias nacionales (CICA 2009).

El modelo de EIA diseñado pronostica los impactos en las etapas de planificación e inicio del proyecto. Incorpora los planes de mitigación, de reducción de desastres y la implementación de las medidas de seguimiento y control, para que la gestión de los responsables de las inversiones sea viable ambiental y socioeconómicamente, como se representa en la Figura 8

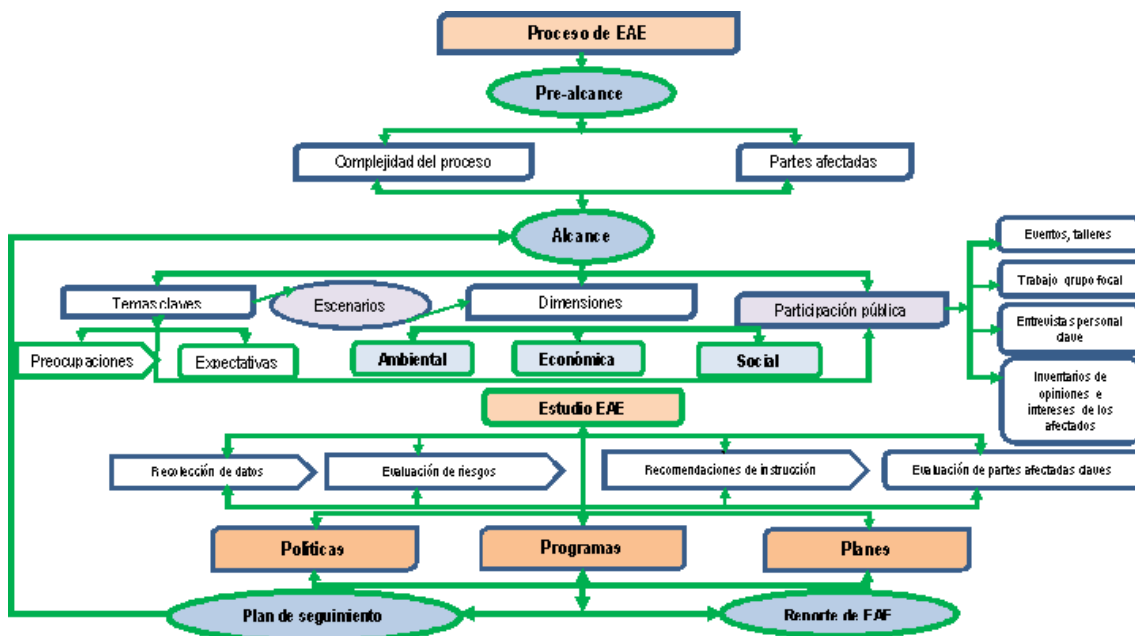


Figura 7. Modelo para el proceso de EAE en la actividad minero-metalúrgica (Gallardo *et al.* 2017).



Figura 8. Modelo para el proceso de EIA en la actividad minero-metalúrgica (Gallardo *et al.* 2017)

#### 4. CONCLUSIONES

- La evaluación ambiental integral realizada para la actividad minero-metalúrgica identifica 34 de 37 impactos ambientales negativos. De las ocho variables ambientales evaluadas, el medio socioeconómico, el suelo y la hidrogeología superficial y subterránea son las más afectadas, incidiendo negativamente en los ecosistemas montañosos, de agua dulce y el manglar.
- Existe alta contaminación por metales pesados (Fe, Pb y Zn) en las aguas superficiales y el manglar, como resultado del drenaje ácido y los procesos de oxidación de los sulfuros, con efecto acumulativo en los ecosistemas expuestos.
- El modelo de gestión ambiental integral propuesto para la actividad minero-metalúrgica contempla la evaluación ambiental de la región, el empleo del índice general de impacto negativo, los indicadores ambientales y los instrumentos de gestión, en especial, la evaluación ambiental estratégica con un enfoque ecosistémico que facilita la toma de decisiones, la prevención y mitigación de los impactos ambientales.
- La evaluación ambiental diseña 30 medidas de mitigación y 13 de seguimiento y control para los ecosistemas afectados, las cuales están

incorporadas en los planes de recuperación de las empresas vinculadas a la actividad minero-metalúrgica en Santa Lucía.

## 5. REFERENCIAS

- Alfonso, E.; Vera, A.; Pacheco, P. y Figueredo, M. 1995: Informe técnico de caracterización y tratamiento de efluentes sólidos y líquidos generados por el complejo Oro Castellanos y cantera Santa Lucía. Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM). 22 p.
- Alonso, J. A.; Pinto, A.; Cabrera, I.; Cozzi, G.; Gallardo, D. y Valdivia, G. 2010: Informe de proyecto: Principales asociaciones mineralógicas de elementos contaminantes presentes en residuales de la industria minero-metalúrgica. Ministerio de Energía y Minas – Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. 92 p.
- Amalfi, R. 2015: Entrevista realizada al ingeniero principal de la UEB Producciones Industriales, empresa GEOMINERA, delegado a la Asamblea Provincial del Poder Popular. Minas de Matahambre, 26 de octubre.
- Baker, A. J.; Mcgrath, S. P. y Reeves, R. D. 2000: Metal hyper accumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. En: Terry, N. y Buñuel's. (eds). *G. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. FL, USA: Lewis Publishers. pp. 85-107. ISBN: 1-56670-450-2
- Cañete, C.; Jornada, A. S.; Marmos, J. 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 de Minería. IV Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana, 4-8 de julio.
- Centro de Control Inspección Ambiental (CICA). 2009: Guías para la realización de las solicitudes de Licencia Ambiental y los Estudios de Impacto Ambiental. La Habana. 90 p.
- Chaviano, A.; Cervantes, Y. y Pierre, A. 2011: Algunas consideraciones de rehabilitación minera en la minería del níquel: municipio de Moa, Cuba. *Revista Desarrollo Local Sostenible*, 4(10): 12. Consulta: 15/02/2018. Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/delos/10>.
- Compañía Especializada en Soluciones Integrales, Geográficas y Medio Ambientales (CESIGMA, S.A). 2007: Informe técnico sobre el alcance de los estudios de impacto ambiental y factibilidad territorial del proyecto de explotación minero-metalúrgico de polimetálicos. Castellanos, Santa Lucía, Pinar del Río. 107 p.
- Conesa-Fernández, V.; Ros-Garro, V.; Conesa-Ripoll, V. y Conesa-Ripoll, L. A. 1995: *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Mundi-prensa. 390 p.
- Contreras, L. A.; Valencia, C. M. y De La Fuente, N. M. 2016: Estudio de absorción, acumulación y potencial para la remediación de suelo

- contaminado por plomo usando *Ambrosia Ambrosioides*. *Revista de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1): 244-250.
- De la Maza, C. L. 2007: Evaluación de impactos ambientales. *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*. Editorial Universitaria. Santiago de Chile, p. 579-609.
- Gallardo, D.; Amalfi, R. y Bruguera, N. 2015: Evaluación económica ambiental para la actividad minero-metalúrgica. Caso de estudio empresa GEOMINERA Occidente, UEB de Producciones Industriales. En: VIII Congreso de Gestión Ambiental. X Convención sobre Medio Ambiente y Desarrollo. La Habana, 6-10 de julio.
- Gallardo, D.; Bruguera, N.; Díaz, J. A. y Lastra, J. F. 2017: Modelo de gestión ambiental para la recuperación de los ecosistemas asociados a la actividad minero-metalúrgica en el campo mineral Santa Lucía Castellanos. En: VII Congreso Cubano de Minería. VII Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana, 3-7 abril.
- García, M. 2012: *Guía metodológica para la evaluación ambiental de áreas degradadas en minas abandonadas. Contribución a su recuperación para la sostenibilidad local*. Inédito. La Habana: Oficina Nacional de Recursos Naturales. 60 p.
- Inversiones Gamma S.A. (GAMMA). 2013: Actualización del estudio de impacto ambiental (EsIA) del proyecto de explotación minero-metalúrgico de plomo y zinc Castellanos, Santa Lucía, Pinar del Río. La Habana. 286 p.
- Leknes, E. 2001: The roles of EIA in the decision-making process. *Environmental Impact Assessment Review*, 21(4): 309-334.
- Leopold, L. B. 1971: *A procedure for evaluating environmental impact*. Washington, D.C.: Geological Survey Circular 645. 132 p.
- Ley 81 del Medio Ambiente. 1997: *Gaceta Oficial de la República de Cuba*. La Habana.
- Madrado, F. 2008: *Plan de acción para mitigar los impactos ambientales de la actividad minera en Santa Lucía*. Tesis de maestría. Universidad de Pinar del Río. 100 p.
- Martorell, N. 2010: Estrategia sobre evaluación de los pasivos ambientales mineros en Cuba. Oficina Nacional de Recursos Minerales. 10 p.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). 2011: Estrategia Nacional de Medio Ambiente de la República de Cuba 2011-2015. [CD-ROM]. La Habana. 21 p.
- Norma Cubana NC 27: 2012: Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado: Especificaciones. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.

- Norma Cubana NC 521: 2007: Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especificaciones. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Oyarzún, J. 2008: Evaluación de Impactos Ambientales. 114 p. Consulta: 17/03/2018. Disponible en: [https://www.aulados.net/Temas\\_ambientales/EIA/EIA\\_Jorge\\_Oyarzun.pdf](https://www.aulados.net/Temas_ambientales/EIA/EIA_Jorge_Oyarzun.pdf)
- Ramos, A. 2016: Entrevista a experto del Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA CITMA. Pinar del Río. 23 de enero.
- Romero, F. M.; Armienta, M. A. y González, G. 2007: The solid-phase control on the mobility on potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. *Geochim. Cosmochim.*, 68: 969-983.
- Salvadó, V. 2009: Caracterización de pasivos mineros y evaluación del riesgo ambiental asociado a la movilidad y biodisponibilidad de los metales. III Congreso Cubano de Minería. III Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana, 16-20 de marzo.

Recibido: 07/02/2019

Aceptado: 11/09/2019