

## METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS DE LOS PASIVOS AMBIENTALES CON IMPACTOS A LA BIODIVERSIDAD Y ECOSISTEMAS EN SANTA LUCÍA

## METHODOLOGY FOR RISK ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL LIABILITIES WITH IMPACTS ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEMS IN SANTA LUCIA

Cristhian Morejón Álvarez<sup>1\*</sup>, Eduardo Valle Luis Llano<sup>2</sup>, Dr. C. Noel Caridad Bruguera Amarán<sup>3</sup>, Robert Ramírez Hernández<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA, Pinar del Río, Cuba, CP 20100. <https://orcid.org/0009-0002-9013-8275>

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA, Pinar del Río, Cuba, CP 20100. <https://orcid.org/0009-0009-4891-4753>

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA, Pinar del Río, Cuba, CP 20100. <http://orcid.org/0000-0003-4084-2803>

<sup>4</sup>Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca" UPR. Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Geología, Pinar del Río, Cuba, CP 20100. <https://orcid.org/0000-0002-0224-0011>

\*Autor para la correspondencia (e-mail): [cristhianmorejonforever@gmail.com](mailto:cristhianmorejonforever@gmail.com)  
Recibido para su publicación: 24/09/2023 - Aceptado para su publicación: 21/11/2023

### Resumen

La evaluación de los pasivos ambientales desde la perspectiva y dimensión de riesgos, constituye un imperativo para estimar la magnitud de los impactos y la reversibilidad de estos. Con el objetivo de desarrollar la evaluación de riesgos del inventario de los pasivos ambientales mineros (*PAM*) en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, se desarrolla la valoración de las metodologías existentes para la estimación del riesgo y determinar así la perspectiva de remediación de los impactos generados en la zona. Se tiene en cuenta la Metodología de Evaluación de Riesgos que adoptó Cuba, emitida por la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (*ASGMI*). La conformación de la Base de Datos para la evaluación, se desarrolló predeterminando tres niveles de estimación del riesgo de cada tipo de *PA* (Alto, Medio y Bajo), según los propósitos y alcance de la evaluación desarrollada. Los criterios de clasificación del riesgo están asociados al índice de importancia del *PA*, teniendo cuenta cinco parámetros; así como la severidad del peligro del *PA*. En este último, se tiene en cuenta el Índice de Dispersión Probabilística de los elementos potencialmente tóxicos y cinco factores, para cada *PAM*. La totalidad de los parámetros y factores cuenta con una escala de valorización de su magnitud y significación.

*Palabras clave: magnitud, reversibilidad, región, remediación, estimación.*

### Abstract

The evaluation of environmental liabilities from the risk dimension perspective is an imperative to estimate the magnitude of the impacts and their reversibility. With the objective of developing the risk assessment of the inventory of mining environmental liabilities in the mining metallurgical region of Santa Lucia, the assessment of existing methodologies for the estimation of risk is developed, thus determining the perspective of remediation of the impacts generated in the area. The risk assessment methodology by Cuba issued by the Iberoamerican Association for Geology and Mining Services (*ASGMI*), is taken into account High, medium and low, according to the purposes and scope of the evaluation developed. The risk classification cuteness is associated with the environmental liabilities' importance index, taking into account five parameters; as well as the severity of the danger of the environmental liabilities. In the latter, the Probabilistic Dispersion Index of parameters and factors have a scale of valuation on their magnitude and significance.

*Keywords: magnitude, reversibility, region, remediation, estimation.*

## INTRODUCCIÓN

La actividad minera es altamente destructiva, dado que consiste en la depredación y procesamiento de los recursos metálicos, no metálicos y energéticos que existen en el subsuelo y para llegar a ellos es necesario la modificación irreversible de los distintos ecosistemas y componentes bióticos y bióticos del medio circundante al

recurso en cuestión. En los últimos años ha crecido la presión sobre los gobiernos, instituciones y compañías para crear y aplicar formas menos contaminantes y agresivas para la explotación minera y la rehabilitación de las áreas intervenidas ante las amenazas de colapso ambiental y cambio climático.

La minería y los procesos metalúrgicos asociados, han causado la degradación de los ecosistemas, por ineficientes acciones de recuperación en las áreas explotadas Gallardo (2018).

Una metodología para la evaluación de riesgos tiene el objetivo de ayudar a visualizar los daños ocasionados al ecosistema, cómo se debe actuar para mitigar y corregir los pasivos, permite analizar la probabilidad de ocurrencia de posibles eventos, facilita la gestión efectiva de los impactos generados por la minería y los procesos de apoyo, muestra la distribución espacial o geográfica de las pérdidas estimadas de una o más amenazas, asociadas a los PAM. En el modelo se aprecian distintas variables que permiten lograr un enfoque multisectorial que facilita la toma de decisiones respecto a qué zonas requieren un manejo por su alto grado de degradación, dichas variables son los tipos de ecosistemas, la geología y la red hidrográfica.

El análisis de riesgo establece relaciones del riesgo con la naturaleza del peligro y el grado de susceptibilidad de algún componente del medio ambiente, la sociedad y la economía a ser afectado, es decir el grado de vulnerabilidad o exposición al peligro.

Según, Bruguera, Gallardo y Díaz (2020), sostienen que la definición de pasivo ambiental no se restringe solo a los impactos de la actividad minera, como se reporta en la literatura especializada. Los autores sostienen que el *pasivo ambiental (PA)* es la huella ambiental generada e inducida en la explotación de los bienes naturales o la disposición de elementos con potencial contaminante por la nula remediación de los impactos y el no aprovechamiento de los constituyentes activos en su ciclo de vida, que determinan la generación de un riesgo para los componentes del medio ambiente.

Ramírez (2022) argumenta que, un Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite integrar operaciones involucradas en el manejo geográfico de cartografía, en pos de la realización de inventarios y estimaciones de posibles impactos de los pasivos ambientales y por consiguiente de los riesgos asociados.

En la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, los estudios precedentes acerca de los inventarios y evaluaciones de los pasivos ambientales generados por la actividad minera extractiva (Álvarez, 2020; Bruguera *et al.*, 2022), no han realizado un abordaje integral y desde la perspectiva de riesgos de los PA acumulados mediante el uso de herramientas efectivas, lo que restringe las perspectivas de su gestión. De ahí que resulta determinante para los tomadores de decisiones y concesionarios, disponer de instrumentos de evaluación y estimación de los riesgos de los PA en estas zonas fuertemente degradadas por la minería.

Por todo lo antes expuesto esta investigación tiene como objetivo desarrollar un Modelo de Evaluación de Riesgos de los pasivos ambientales con impactos sobre los ecosistemas en el distrito mineral de Santa Lucía, a partir de la magnitud y su naturaleza, planteando como hipótesis que el Modelo de Evaluación de Riesgos sobre los Pasivos Ambientales (PA) en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, facilitará la gestión efectiva de los impactos generados por la minería y los procesos de apoyo.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Antecedentes

En Cuba, la Política para el perfeccionamiento del Sistema Ambiental reconoce que un pasivo ambiental se materializa en un sitio geográfico contaminado o degradado por la explotación de los recursos naturales o la emisión de residuos, que no fueron recuperados o remediados oportunamente para impedir la dispersión de los contaminantes y continúan causando efectos negativos al ambiente (CITMA, 2018). Esta definición restringe la definición de *PA* a toda actividad socioeconómica que genere la pérdida del estado ambiental previo.

Por su parte, Bruguera *et al.*, (2020) delimitan en sus trabajos investigativos que el abordaje integral con enfoque ecosistémico de cada una de las dimensiones, naturaleza y patrones que poseen los *PA* generados por las más diversas actividades humanas, plantea notorios desafíos a las instituciones científicas y empresarios. Entre las principales actividades socioeconómicas que generan una amplia huella ambiental sobre los ecosistemas, resaltan: la prospección y explotación de los recursos minerales, los procesos metalúrgicos inducidos para su tratamiento, entre otros.

Los *PA* pueden ser eliminados o minimizados a partir de acciones correctoras o preventivas, disminuyendo el peligro de ocurrencia y la vulnerabilidad. La peligrosidad del pasivo generado por la disposición de los residuos de cada tipo de actividad socioeconómica, depende de la naturaleza y densidad de la aureola de difusión que se desarrolla en la dispersión de los componentes del pasivo Bruguera, Gallardo y Díaz, (2020).

En Delgado *et al.*, (2011), establecen una metodología para inventariar pasivos ambientales provocados por la actividad minero-metalúrgica. A diferencia de otros inventarios precedentes de *PAM* para Santa Lucía, se incluyen los pasivos de la actividad metalúrgica en la Planta de procesamiento “Patricio Lumumba”. Así mismo, (Cabrera, 2015), analizan en sus respectivas investigaciones la influencia del pasivo minero sulfometales sobre el drenaje ácido y elementos potencialmente tóxicos en el manglar.

### Condiciones del área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en el área de Santa Lucía, municipio de Las Minas de Matahambre. Las fronteras naturales del territorio se extienden a través de los ríos Santa Lucía y Nombre de Dios, así como la Sierra de los Órganos y el Golfo de Santa Lucía. Dichos límites se encontrarían delimitados por las coordenadas Lambert (NAD 1927 Cuba Norte):

$$X_{\text{mín.}} = 195\ 000 \quad X_{\text{máx.}} = 199\ 000$$

$$Y_{\text{mín.}} = 315\ 000 \quad Y_{\text{máx.}} = 318\ 000$$

### Metodología de los trabajos realizados

Para la evaluación de riesgos de los *PAM*, se tuvo en cuenta los preceptos establecidos por la ASGMI (2010) y adoptadas por el Servicio Geológico de Cuba, la cual establece una escala teórica de riesgos entre bajo, medio y alto. Se adopta la Metodología de evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros, aplicada a la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar en Colombia, desarrollada por García *et al.*, (2014). Esta metodología define un Índice único denominado Importancia del *PAM* y confiere un mayor peso a las variables cualitativas, tales como: Naturaleza

del PAM, Magnitud, Extensión, Periodicidad, Recuperabilidad, Reversibilidad del PAM, entre otras, mediante la correlación matemática, que se muestra a continuación (1):

$$I_{\text{importancia}} = NA_{\text{naturaleza}} * (3MG_{\text{magnitud}} + 2EX_{\text{extensión}} + DR_{\text{duración}} + PE_{\text{periodicidad}} + RC_{\text{recuperabilidad}} + RV_{\text{reversibilidad}} + PO_{\text{período de ocurrencia}} + TD_{\text{tendencia}} + T1_{\text{tipo/relación causa-efecto}}) \quad (1)$$

El Índice de Importancia del PA (1) otorga un puntaje de acuerdo con los factores antes mencionados en la ecuación No. 1. Esta metodología de García y col (2014) permite correlacionar la Vulnerabilidad total (Vt) con el Índice de Importancia del Pasivo Ambiental. Así se determina el grado de importancia del pasivo ambiental sobre el ambiente receptor, para lo cual se consideran una serie de atributos de los pasivos ambientales que se incorporan en la función antes referida.

La segunda parte consiste en la identificación de los parámetros de evaluación del fenómeno y el posterior cálculo de la Importancia del pasivo ambiental (Ii).

### Cálculo de la Vulnerabilidad

La ecuación para calcular la Vulnerabilidad es la siguiente (2):

$$I_{\text{importancia}} = \sum_n^{n+1} (3MG_{\text{magnitud}} + 2EX_{\text{extensión}} + NA_{\text{naturaleza}} + PE_{\text{periodicidad}} + TD_{\text{tendencia}} + T1_{\text{relación_causa/efecto}}) \quad (2)$$

### Cálculo del Peligro

El Peligro P(pam) se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{pam}} = D_{\text{probabilística\_PAM}} + \sum_n^{n+1} \left( \frac{F_{\text{disparador}} + F_{\text{catalizadorpa}} + F_{\text{ionizante}} + F_{\text{ecosistémica}} + F_{\text{respuesta}}}{D_{\text{probPAM/max}}} \right) \quad (3)$$

### Evaluación de riesgos por PAM

Para ello se establecieron relaciones con la naturaleza del peligro y el grado de susceptibilidad de los componentes del medio ambiente, la sociedad y la economía, Ec. (4):

$$R(\text{pam}) = \sum_n^{n+1} (V_T * P_{(\text{pam})}) \quad (4)$$

Donde:

$R_{(\text{pam})}$  – Riesgo por el PAM.

$V_T$  – Vulnerabilidad total de los componentes expuestos a la amenaza del PAM.

$P_{(\text{pam})}$  – Peligrosidad o severidad del peligro del PAM.

## RESULTADOS

Del análisis y evaluación integral del territorio, se definen como los principales problemas ambientales: la contaminación por metales pesados y otros elementos potencialmente tóxicos (EPT) de las aguas superficiales y subterráneas, la zona costera y los suelos, la deforestación provocada por el desmonte de las áreas para el desarrollo extractivo, la degradación de los suelos por los movimientos de tierras inducidos por las actividades económicas

ejecutadas, la fragmentación del paisaje y los ecosistemas mixtos, como los humedales; así como las afectaciones a la diversidad biológica autóctona de la región (Gallardo, 2018).

Para la región de estudio, se reportan como pasivos de esta naturaleza, 14 *PAM*: Cantera abierta del yacimiento Santa Lucía; Depósito-1, Ceniza de Pirita Tostada; Polígono de Depósito-2 Ceniza Pirita Tostada; Polígono de Depósito-3 Ceniza Pirita Tostada; Polígono de Depósito-4 Ceniza Pirita Tostada; Polígono de Depósito-5 Ceniza Pirita Tostada; Frente-1 de explotación yacimiento Castellano/Corta Este; Frente-2 de explotación yacimiento Castellano/Corta Oeste; Escombrera-1 Este yacimiento Castellanos; Escombrera-2 Oeste yacimiento Castellanos; Depósito de capa vegetal (estéril) del destape del yacimiento Castellano; Escombrera del Proceso Oro Castellano; Depósitos de Colas Cianuradas del proceso Oro Castellano.

A partir de esta descripción de los 14 *PA* de naturaleza Minera que se encuentran inventariados en la región de Santa Lucía, se constata que existe una apreciable dispersión de *PAM* en la región, los cuales constituyen una fuente de riesgos para los ecosistemas, la biodiversidad y la población de la zona, por los caudales de contaminación que generan, principalmente metales pesados, aguas ácidas con *EPT* disueltos y desechos peligrosos, como el cianuro.

Estos pasivos ambientales denotan procesos acumulativos, de largo recorrido histórico, que implican daños para el medio ambiente, que tienden a persistir y agravarse, convirtiéndose en crónicos, por no someterse a medidas de solución o rehabilitación definitiva. Se pueden ver afectados: cursos de agua, superficiales y subterráneos, los suelos, el aire, la cubierta vegetal y la fauna, la salud humana, las infraestructuras y el ambiente en general.

En la siguiente Figura no. 1 se representa el inventario de los 14 *PAM* en la región minera de Santa Lucía, relacionados con la hidrogeología y la tectónica del área.

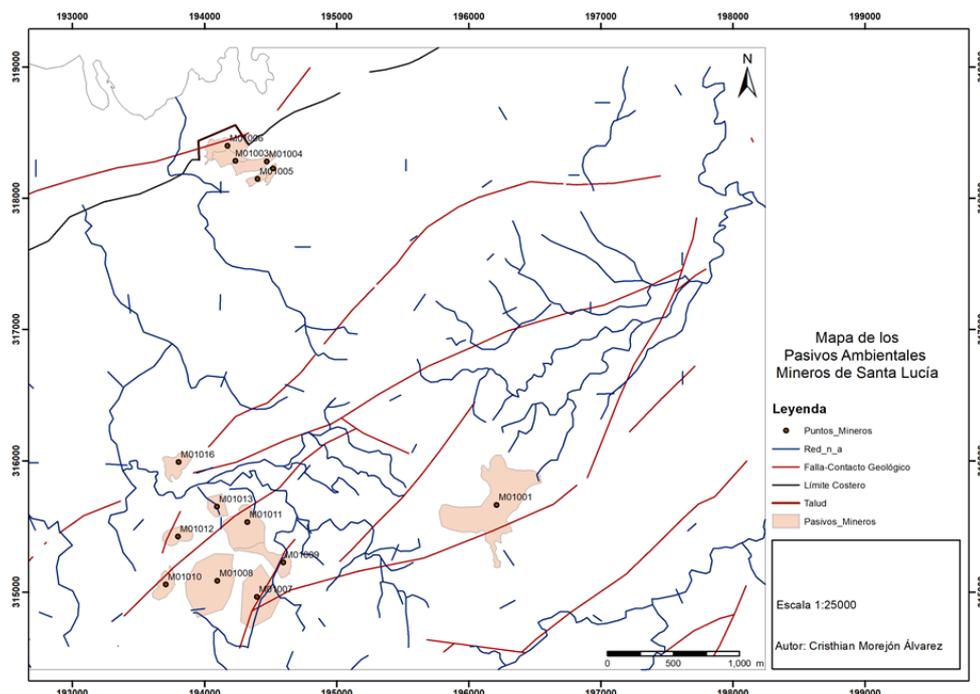


Figura 1. Inventario de los pasivos ambientales mineros (*PAM*) en la región de Santa Lucía.  
Figure 1. Inventory of Mining Environmental Liabilities (*PAM*) in the Saint Lucia Region.

Se corrobora, lo antes expuesto sobre el aporte de contaminantes de estos pasivos a la red hidrográfica de la región, lo que favorece el grado de dispersión de los *EPT* hacia los ecosistemas frágiles, como las cuencas hidrográficas, los humedales interiores, los suelos agrícolas y la zona costera. Lo cual se encuentra en correspondencia con lo planteado por Álvarez (2020) y Bruguera *et al.*, (2022).

La importancia del impacto del *PAM* o el grado de susceptibilidad del componente ante el peligro, se determina por la combinación de los seis criterios de calificación expuestos en la ecuación no. 2. Los valores determinados para cada uno de los 14 *PAM* del inventario de la región de Santa Lucía, se exponen en la Tabla no. 1.

Para cada uno de los 14 *PAM* se establecen valores de cada Factor, teniendo en cuenta la respuesta o grado de susceptibilidad del *PAM* a la acción remediadora, lo cual permite delimitar un grado de importancia determinado para cada pasivo, lo cual condicionará el nivel del riesgo del *PA* correspondiente. Como resultado del análisis de cada factor del Índice de Importancia del *PAM*, se relaciona a continuación los valores de cada  $I_{imp}$  para los *PAM* del inventario:

Tabla 1. Resultados de la evaluación de la Vulnerabilidad o Índice de Importancia de los *PAM* de Santa Lucía.  
 Table 1. Results of the Vulnerability Assessment or Importance Index of the *PAM* of Santa Lucia.

Evaluación de la Vulnerabilidad o Índice de Importancia de los <i>PAM</i> de Santa Lucía		
Código del <i>PAM</i>	Magnitud del índice de Importancia (I(imp))	Clasificación del I(imp)
M01001	50	Alto
M01002	19	Bajo
M01003	42	Alto
M01004	42	Alto
M01005	35	Medio
M01006	45	Alto
M01007	50	Alto
M01008	50	Alto
M01009	45	Alto
M01010	45	Alto
M01011	25	Bajo
M01012	29	Bajo
M01013	38	Medio
M01016	31	Medio

Se constata que, ocho *PAM* poseen un Índice de Importancia Alto, tres *PAM* con I(imp) Medio y tres *PAM* con I(imp) Bajo, como se muestra en la figura No. 2 siguiente:

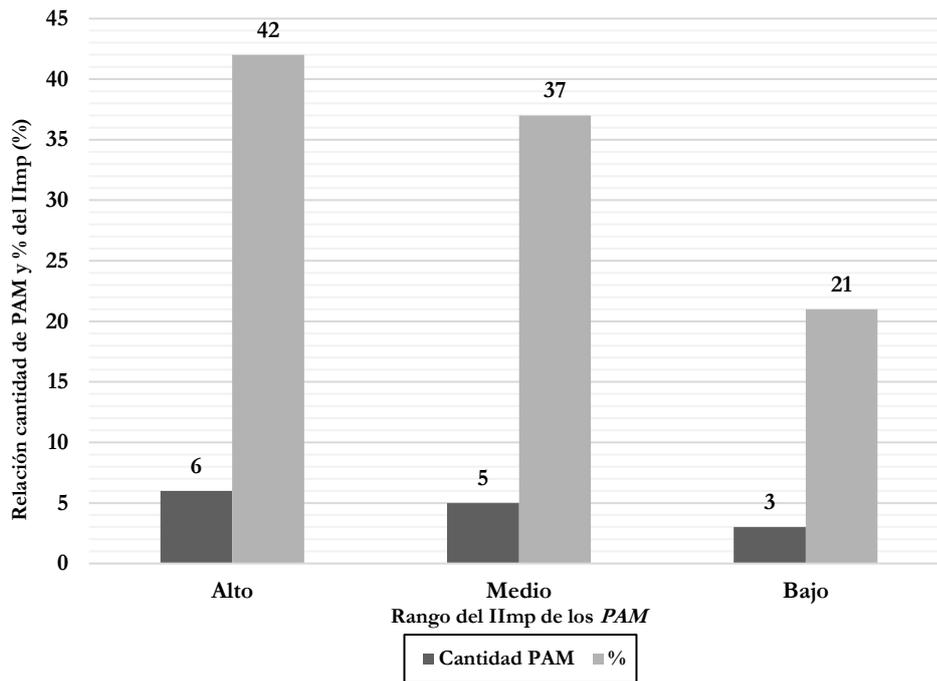


Figura 2. Relación de los niveles de evaluación del Índice de Importancia de los Pasivos Ambientales Mineros (*PAM*).  
 Figure 2. List of the evaluation levels of the Index of Importance of Mining Environmental Liabilities (*PAM*).

En el mapa siguiente se representa la representación cartográfica de los *PAM* en relación a su Índice de Importancia, donde resaltan los 8 *PAM* con Ii alto.

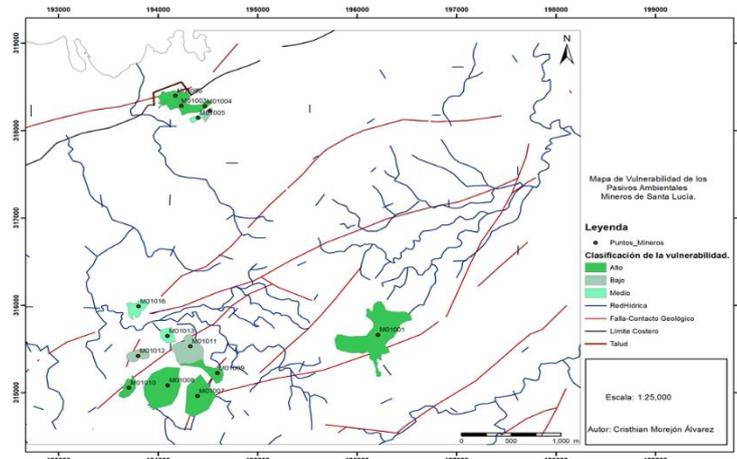


Figura 3. Mapa de evaluación del Índice de Importancia o grado de vulnerabilidad de los Pasivos Ambientales Mineros (*PAM*).

Figure 3 Assessment map of the Importance Index or degree of vulnerability of Mining Environmental Liabilities (*PAM*).

En la siguiente tabla No. 2 se resume el nivel de evaluación del peligro para cada *PAM*:

Tabla 2. Resultados de la evaluación del Peligro ( $P_{pam}$ ) de los *PAM* de Santa Lucía.

Table 2. Results of the Hazard Assessment ( $P_{pam}$ ) of the *PAM* of Santa Lucia.

Evaluación de la Severidad del Peligro ( $P_{pam}$ ) de los <i>PAM</i> de Santa Lucía.		
Nombre	$P_{pam}$	Clasificación del $P_{pam}$
Cantera abierta del yacimiento Santa Lucía abierta del yacimiento Santa Lucía	16.04	Alto
Depósito-1, Ceniza de Pirita Tostada	11.80	Bajo

Depósito-2, Ceniza de Pirita Tostada	17.20	Alto
Depósito-3, Ceniza de Pirita Tostada	17.20	Alto
Depósito 4, Ceniza de Pirita Tostada	15.36	Alto
Depósito 5, Ceniza de Pirita Tostada	17.20	Alto
Frente-1 de explotación yacimiento Castellanos/Corta Este	15.80	Alto
Frente-2 de explotación yacimiento Castellanos/Corta Oeste	15.80	Alto
Escombrera-1 Este yacimiento Castellanos	14.60	Medio
Escombrera-2 Oeste yacimiento Castellanos	14.60	Medio
Depósito de capa vegetal (estéril) del destape del yacimiento Castellanos	10.40	Bajo
Escombrera del Proceso Oro Castellanos	14.60	Medio
Depósitos de Colas Cianuradas del proceso Oro Castellanos	18.00	Alto
Patio de Acopio Mineral Bruto en planta de beneficio de mineral al proceso de flotación	4.92	Bajo

La evaluación de la peligrosidad del PAM en el inventario de Santa Lucía indica la existencia de ocho PAM con peligrosidad alta, tres con clasificación de medio y tres con peligrosidad baja, Figura 4.

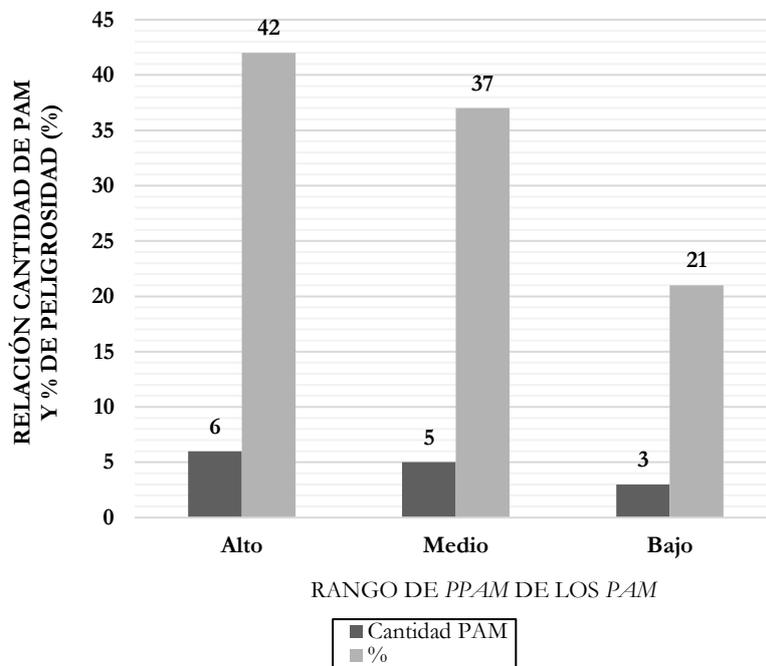


Figura 4. Relación de los niveles de evaluación de la Severidad del Peligro por Pasivos Ambientales Mineros (PAM).  
 Figure 4. Relationship of the Levels of Assessment of the Severity of the Hazard due to Mining Environmental Liabilities (PAM).

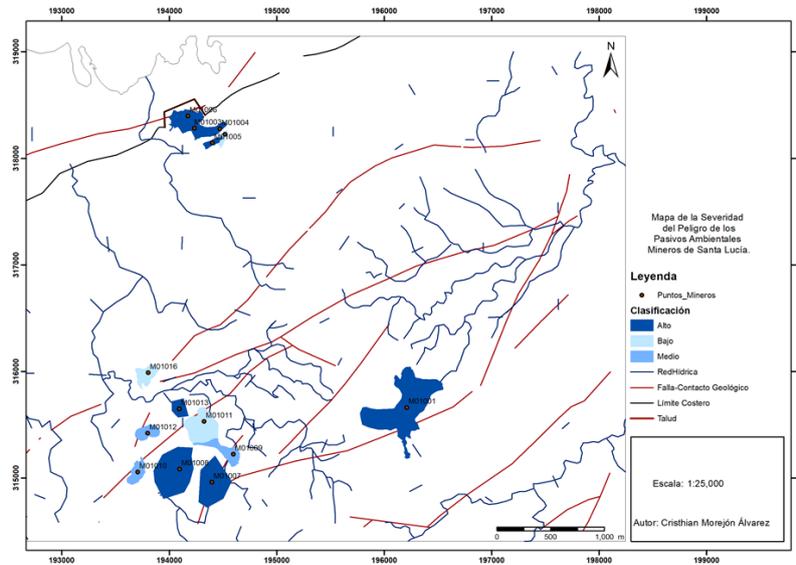


Figura 5. Mapa de evaluación de la Severidad del Peligro  
 Figure 5. Evaluation Map of danger severity.

Los ocho *PAM* con Índice de Peligrosidad Alto, tienen una correlación directa con las principales cuencas y afluentes de la región, en particular en la sub-región SO y NO del área de estudio.

#### Análisis del riesgo por *PAM* en la región de estudio

Con la vulnerabilidad y el peligro se determina el riesgo del *PAM* ( $R_{pam}$ ), teniendo en cuenta la ecuación 4.

Del total de *PAM* registrados en el inventario de la región de estudio el 42% de los pasivos se reporta de Riesgo Alto, es decir 6 *PAM* del inventario.

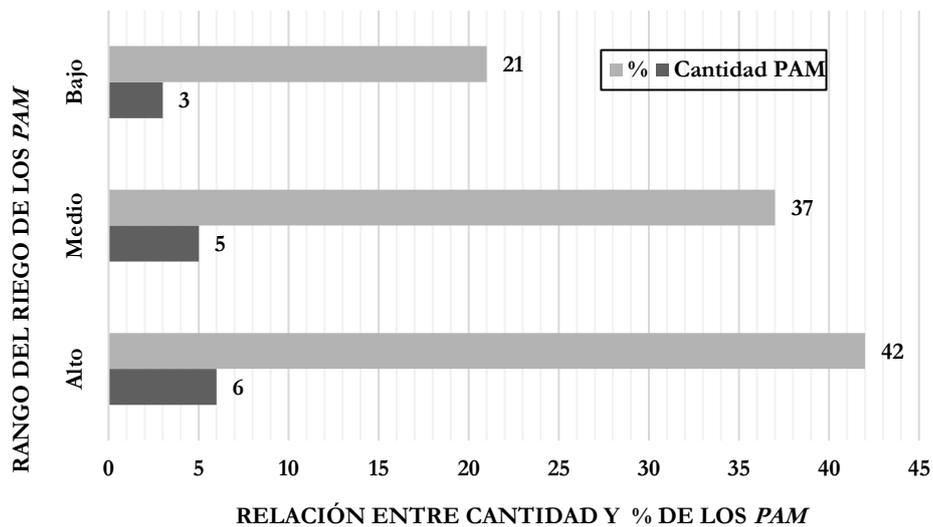


Figura 6. Relación de los niveles (estimación) de Riesgos por Pasivos Ambientales Mineros (*PAM*).  
 Figure 6. List of levels of estimation of the risk of the Mining Environmental Liabilities.

Del total de *PAM* registrados en el inventario de la región de estudio el 42% de los pasivos se reporta de Riesgo Alto, es decir 6 *PAM* del inventario, como se aprecia en la Tabla 3 y las Figuras 6 y 7.

Tabla 3. Resultados de la estimación del riesgo de los *PAM* en Santa Lucía.  
 Table 3. Results of the risk estimation of *PAM* in Santa Lucia.

Estimación del riesgo de los <i>PAM</i> de Santa Lucía		
Código del <i>PAM</i>	Riesgo ( $R_{(pam)}$ )	Clasificación del $R_{(pam)}$
M01001	802.0	Alto
M01002	224.2	Bajo
M01003	722.4	Alto
M01004	722.4	Alto
M01005	537.6	Medio
M01006	774.0	Alto
M01007	790.0	Alto
M01008	790.0	Alto
M01009	657.0	Medio
M01010	657.0	Medio
M01011	259.9	Bajo
M01012	423.4	Medio
M01013	684.0	Medio
M01016	152.5	Bajo

Se observa que el 42% de los *PAM* de la región poseen un riesgo alto, el 37% un riesgo medio y el 21% un riesgo bajo, lo cual se evidencia en el grado de degradación ambiental acumulado en la región, por procesos minero-metalúrgicos actuales y precedentes.

Vale resaltar que, entre los *PAM* con riesgos altos, se encuentran la cantera abierta del yacimiento Santa Lucía, los cuatro depósitos con más de 900 mil toneladas de cenizas de pirita tostada y los dos frentes o cortas de explotación del yacimiento Castellano, con la extracción de concentrados de plomo y zinc. Sin dudas, estos seis *PAM* constituyen la principal fuente de generación de contaminación, de degradación y presión sobre los ecosistemas de la región y, por consiguiente, los de mayor grado de riesgos para los componentes socioeconómicos y naturales del área; considerado el segundo pasivo ambiental de mayor importancia en el país.

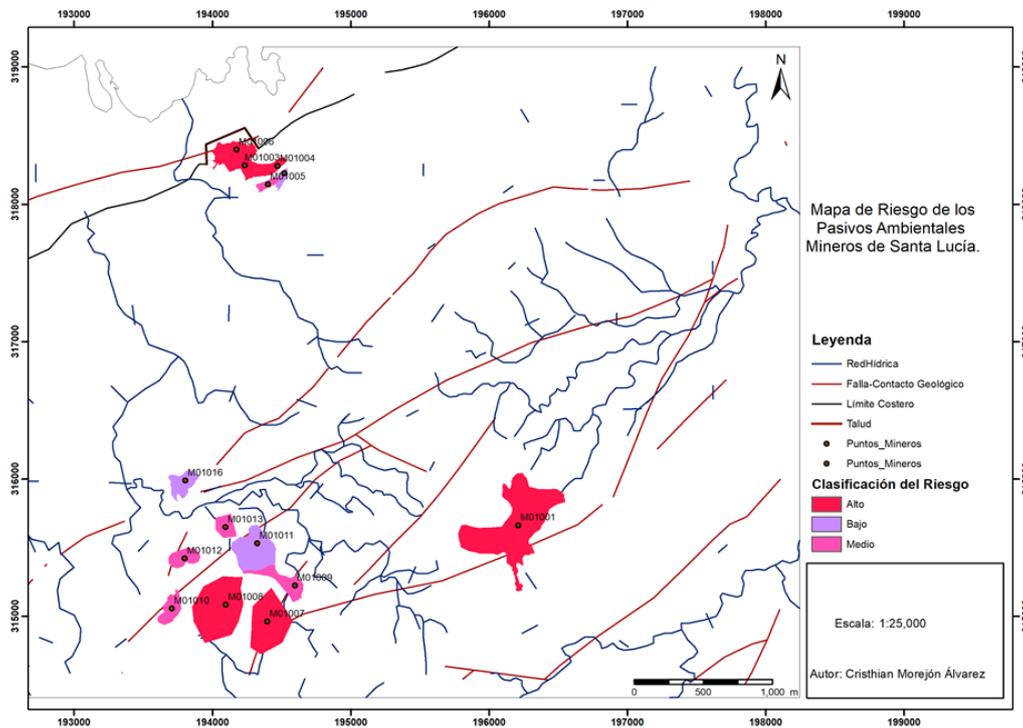


Figura 7. Mapa de estimación del Riesgo de los PAM en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía.  
Figure 7. Map of Risk Estimation of PAM in the Mining and Metallurgical Region of Santa Lucía.

## CONCLUSIONES

Los análisis realizados nos permiten concluir que:

- Del inventario de 14 Pasivos Ambientales Mineros del área de estudio, el 42% de los PAM de la región poseen un Riesgo Alto, el 37% un Riesgo Medio y el 21% un Riesgo Bajo; con lo cual se evidencia el grado de degradación ambiental acumulado en la región, por procesos minero-metalúrgicos actuales y precedentes.
- La prevalencia de mayores niveles de Riesgo Alto en los PAM de la zona, confirman los resultados de los estudios precedentes acerca de la contaminación ambiental de las cuencas hidrográficas superficiales y subterráneas, así como los ecosistemas frágiles acuáticos, marino-costeros y humedales, a partir de las fuentes generadoras de EPT.
- Se logra desarrollar, por primera vez, un Modelo Cartográfico Integrado de Riesgos (MCIR) sobre el inventario de los pasivos ambientales mineros de la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, a partir de la superposición cartográfica indexada y la correlación entre las variables geología, tectónica, red hidrográfica y ecosistemas, con los atributos definidos para los 14 PAM.
- La evaluación y estimación del riesgo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) en el inventario de la región minero-metalúrgica de Santa Lucía se desarrolló a partir del diseño de nuevos criterios metodológicos que tiene en cuenta la Probabilidad del PAM, la Dispersión Probabilística de los EPT y la Vulnerabilidad.

## ÉTICA Y CONFLICTO DE INTERESES

Las personas autores del manuscrito en cuestión, declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay

conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras que se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

## REFERENCIAS

- Amarán, N. C. B., Duque, J. A. D., Díaz, R. H., Hernández, R. R., y Martínez, D. G. (2022). Impacto de los pasivos ambientales en la red hidrográfica de la región minera de Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba. 01, 16.
- ASGMI (Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos). (2010). Conocimiento y percepciones acerca de los pasivos ambientales mineros (PAM) en países miembros de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI). Grupo de Expertos en Pasivos Ambientales Mineros de ASGMI. (20).
- Bruguera, N, D. Gallardo, y J.A. Díaz. (2020). Los pasivos ambientales: El cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba. *Avances*, 22(3). <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/560/1627>.
- CITMA (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente). (2016). Delegación Territorial Pinar del Río. Estrategia Ambiental Territorial. 2016-2019 (p. 19).
- Delgado, B., Lubián, T., Del Río, M., y Millian, E. (2011). Metodología para inventariar pasivos mineros ambientales en la zona Santa Lucía. SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA. IV Congreso cubano de minería. Palacio de Convenciones, 4ta. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra.
- Gallardo, D. (2018). Modelo de gestión ambiental integral para el desarrollo de la actividad minero-metalúrgica asociada a los yacimientos sulfurosos en Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba. [Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas]. Universidad de Pinar del Río.
- Gallardo, D., Bruguera, N., Díaz, J. A., y Cabrera, I. (2015). Impacto provocado por la minería en la zona de Santa Lucía, evaluación físico-química.”. *Revista Minería y Geología*, 31(4).
- García Ubaque, C. A., García Vaca, M. C., y Agudelo Rodríguez, C. F. (2014). Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. *Revista Tecnura*, 18(42), 90. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a07>
- Santander., J. R. Á., Amarán., Dr. C. N. C. B., Díaz., Dra. C. R. H., y Hernández., Dr. C. R. R. (2020). Tesis Diploma PAM-SIG JRicardo UPR 2020.