

Modelo cartográfico integrado del inventario de los pasivos ambientales en la región minera de Santa Lucía, Cuba

Integrated cartographic model of the inventory of environmental liabilities in the mining region of Santa Lucía, Cuba

Noel Caridad Bruguera Amarán¹, José Antonio Díaz Duque^{2,*}, José Ricardo Álvarez Santander³, Robert Ramírez Hernández⁴, Rebeca Hernández Díaz⁴, Damaris Gallardo Martínez⁵

¹Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA. Km 2 ½ Carretera Luís Lazo, Pinar del Río, Cuba.

²Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. Calle 114 # 11901, e/ Ciclo Vía y Rotonda CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba.

³Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente CITMA. Línea # 8. Vedado, La Habana, Cuba.

⁴Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”. Martí # 270, Pinar del Río, Cuba.

⁵Delegación Territorial CITMA. Colón, # 106, e/ Maceo y Virtudes, Pinar del Río, Cuba.

* Autor de correspondencia: jaduque@civil.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 3 marzo 2023 **Aceptado:** 3 abril 2023 **Publicado:** 6 abril 2023

Resumen

Los inventarios de pasivos ambientales en regiones mineras de Cuba no han sido abordados por Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la estimación de posibles impactos negativos. El trabajo está dirigido a desarrollar un Modelo Cartográfico Integrado (MCI) de los Pasivos Ambientales (PA) en la región minera de Santa Lucía de acuerdo con su distribución espacial y características generales para evaluar sus afectaciones sobre los componentes del medio ambiente. Se tienen en cuenta la clasificación y los nuevos referentes teóricos de los PA para la región objeto de estudio. Se emplea el método geológico de itinerarios irregulares en tres subregiones del área de estudio para el levantamiento cartográfico y el SIG de los pasivos a partir de una plataforma de infraestructura de datos espaciales con soporte en ArcGIS. Se emplearon los métodos teóricos, como el análisis histórico-lógico y el enfoque sistémico. Como métodos empíricos, se empleó el análisis documental. Se reporta un inventario de 62 PA, desglosados en 16 pasivos mineros, 31 químicos, siete sanitarios, cinco tecnológicos y tres agroforestales. El Modelo Cartográfico Integrado desarrollado garantiza la correlación con la geología, la red hidrográfica, la tectónica y los ecosistemas expuestos a los elementos potencialmente tóxicos (EPT).

Palabras clave: ecosistemas, evaluación ambiental, modelo cartográfico, pasivo ambiental, Santa Lucía

Abstract

The inventories of environmental liabilities in mining regions of Cuba have not been addressed by Geographic Information Systems (GIS) for the estimation of possible negative impacts. The work is aimed at developing an Integrated Cartographic Model (MCI) of Environmental Liabilities (EL) in the mining region of Santa Lucía according to its spatial distribution and general characteristics to evaluate its effects on the components of the environment. The classification and the new theoretical references of the PAs for the region under study are considered. The geological method

of irregular itineraries is used in three subregions of the study area for the mapping and GIS of the liabilities from a spatial data infrastructure platform supported by ArcGIS. Theoretical methods were used, such as historical-logical analysis and the systemic approach. As empirical methods, documentary analysis was used. An inventory of 62 ELs is reported, broken down into 16 mining liabilities, 31 chemicals, seven sanitary, five technological, and three agroforestry. The Integrated Cartographic Model developed guarantees the correlation with the geology, the hydrographic network, the tectonics and the ecosystems exposed to potentially toxic elements (PTE).

Keywords: ecosystems, environmental assessment, cartographic model, environmental liability, Santa Lucia

1. Introducción

En las regiones mineras, la naturaleza de los sectores económicos y el desarrollo de las políticas ambientales que se aplican son determinantes para la mitigación y remediación de los problemas ambientales provocados a los diferentes ecosistemas expuestos. Los cambios en los ecosistemas naturales, producto de las actividades mineras, agro-forestales, sanitarias y químicas, han provocado la fragmentación del paisaje y el deterioro de los recursos naturales, a nivel de poblaciones y de procesos ecológicos [1, 2]. La generación y disposición de altos volúmenes de residuos por diversas actividades humanas propician la fragmentación de los ecosistemas. Estos pasivos ambientales, requieren acciones de manejo integrales para minimizar sus riesgos [3].

En la región de América Latina y el Caribe como regularidad, las autoridades empresariales y gubernamentales de Argentina, Chile, Bolivia, Colombia y Perú, asumen los pasivos ambientales, como el conjunto de variaciones negativas ocasionadas por la acción antrópica, en las condiciones naturales, que afectan el equilibrio de los ecosistemas y el buen vivir de las comunidades [4-6]. En el Perú, se reportan soluciones tecnológicas, denominada Método de Remediación de Reprocesamiento del Relave, que involucra el tratamiento integral de detoxificación de contaminantes en relaves metalúrgicos por las técnicas de flotación diferencial y la concentración gravimétrica (TCG), que permite el manejo integral de relaves de naturaleza oxidada y sulfurada por la implementación de las técnicas de remediación de relaves empleando agentes remediantes [7].

Todo proceso de explotación de un recurso natural deja unos impactos ambientales en el suelo, la flora, la fauna, etc., que deben ser resarcidos, en caso de que esto no se dé, se crea un pasivo ambiental. Para no llegar a esos puntos es importante contar con una legislación adecuada y organismos de control activo, como se analiza en el caso de Chingaza, ciudad de Bogotá [8]. En el análisis de los megaproyectos mineros en México, asumen como pasivo ambiental, los sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. Asimismo, los pasivos ambientales vienen a ser los daños no compensados producidos por una determinada empresa al medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida [9-14].

Cuba es uno de los países que no reconoce en sus normas legales vigentes el tratamiento regulatorio y de gestión a los pasivos ambientales. Existen varios territorios afectados por la actividad minero-metalúrgica, entre los que resalta Santa Lucía en la provincia Pinar del Río por la explotación de los yacimientos polimetálicos en los que no se han ejecutado acciones efectivas de rehabilitación sobre los impactos generados, los que tipifican como pasivos ambientales [1, 2, 13, 14].

En el estudio de los PA en la región de Santa Lucía no se evalúan los impactos de otras actividades socioeconómicas generadoras de peligros tecnológicos y sanitarios, lo que restringe el alcance de la investigación. Se analiza, únicamente el ecosistema acuático y en especial, el lotico (río Santa Lucía) en esta región con graves afectaciones ambientales [14].

La empresa Geominera [14] realizó una evaluación de impactos para la recuperación ambiental del yacimiento Santa Lucía en la que propuso medidas de mitigación para el área de explotación, sin tener en cuenta la interacción con los ecosistemas y los PA, derivados de la actividad metalúrgica. Por su parte, Milián [15] diseñó un procedimiento para la rehabilitación minero ambiental de los yacimientos polimetálicos en Pinar del Río, en el que aplicó el método de escenarios comparados para proponer medidas de mitigación de los impactos. Las propuestas no contemplan un enfoque ecosistémico y el objeto de análisis son solo pasivos ambientales de la minería.

El abordaje de los PA, independientemente de la fuente, de su naturaleza y la magnitud de sus impactos, exige de herramientas que contribuyan a la caracterización y gestión de sus riesgos de manera efectiva [3]. El empleo de herramientas basadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con plataformas de infraestructura de datos espaciales (IDE), contribuye a desarrollar análisis integrales de estos pasivos a nivel de tecnólogos y tomadores de decisiones, así como a proyectar y estimar el alcance de sus impactos sobre los ecosistemas receptores.

Un SIG, es una herramienta capaz de combinar información gráfica y alfanumérica para obtener referencias derivadas sobre el espacio. La finalidad amplia de un SIG, entonces, fue la de combinar las bases de datos (BD) gráficas (cartografía digital con la localización de cada entidad) con las BD alfanuméricas (atributos textuales y numéricos medidos en cada unidad espacial) para representarlos dentro de un sistema de coordenadas geográficas y realizar un tratamiento espacial de los datos a fin de obtener información significativa.

Los SIG permiten integrar operaciones involucradas en el manejo geográfico de la cartografía como consultas, integración y análisis de datos. Se garantiza el rigor y la precisión de los datos base, ya que el SIG es el encargado de canalizar la utilización de estos por parte de todos los usuarios. En la región minera de Santa Lucía, los estudios precedentes acerca de los inventarios de PA, no han realizado un abordaje de los PA acumulados mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis espacial integral de los datos generados, lo que limita su gestión. De ahí, que los autores lo identificaran como el problema científico para la investigación. Por tanto, el objetivo de la investigación consistió en desarrollar un Modelo Cartográfico Integrado (MCI) de los Pasivos Ambientales (PA) en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía de acuerdo con su distribución espacial y características generales.

2. Materiales y Métodos

En la investigación se emplea la metodología desarrollada por la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos para el manejo de los PA. Es determinante, crear una base de datos que permita analizar la dispersión espacial y los niveles de riesgo de cada pasivo ambiental.

La investigación bibliográfica se basó en el análisis de investigaciones desarrolladas y reportadas anteriormente sobre los inventarios de PA en regiones minero-metalúrgicas y en particular para la actividad minera de yacimientos polimetálicos con las características del área de estudio (tipo SEDEX). Se emplearon métodos teóricos, como el análisis histórico-lógico, el enfoque sistémico, el hipotético-deductivo y el análisis-síntesis.

La observación permitió el registro del comportamiento de los PA en la región de estudio, la ubicación y delimitación de los puntos y polígonos de los diferentes tipos de pasivos, así como los mapas y las imágenes satelitales.

El área de estudio se encuentra ubicada en los límites de la zona estructuro-facial de Guaniguanico la cual presenta una compleja evolución geológica. Las secuencias estratigráficas que forman el territorio investigado están caracterizadas por sedimentos terrígenos y carbonatados que abarcan un amplio rango de edades, desde el Jurásico Inferior hasta acumulaciones actuales [14].

Para asegurar la máxima precisión en la representación de los elementos biogeonaturales de la región se efectuó una superposición de la imagen satelital sobre la hoja cartográfica de Santa Lucía. La plataforma SAS Planet empleada fue la versión 200606, proyección Mercator en WGS 1984 y EPSG: 3395, para la UTM zona 17N.

Se dividió la zona de estudio en subregiones, con el objetivo de lograr abarcar la mayor cantidad de áreas posibles en la realización del levantamiento cartográfico de los PA, a través de tres cuadrantes que permitió ubicar por regiones geográficas los distintos itinerarios. Partiendo de la aplicación del método geológico de itinerarios irregulares se trazaron los recorridos para el levantamiento cartográfico de los PA de la región, como se muestra en la Figura 1.

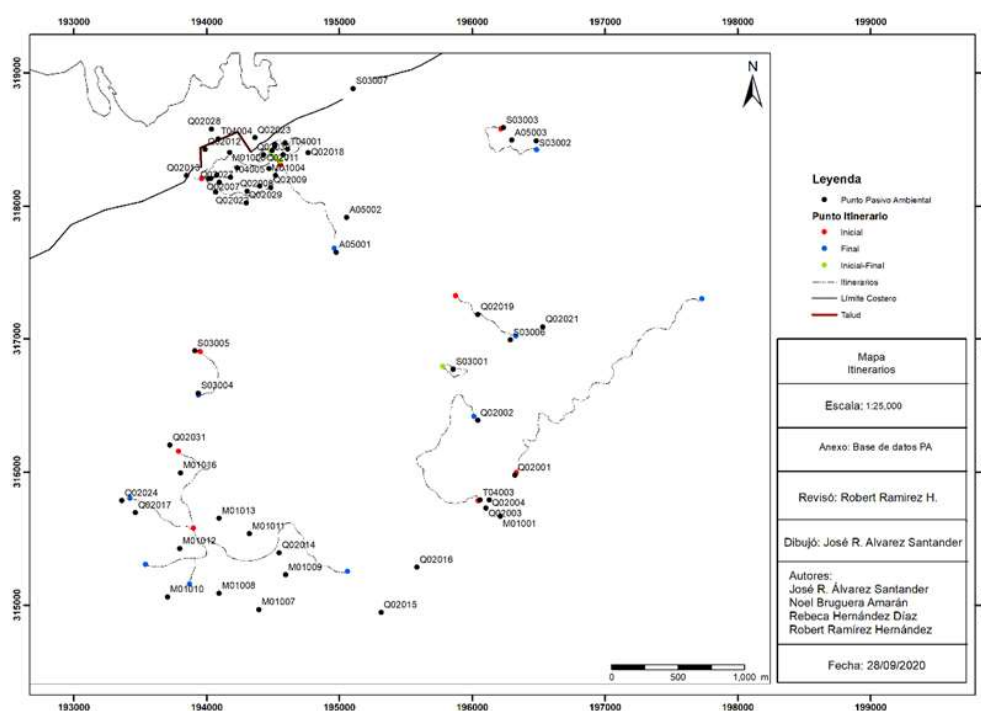


Fig.1 Mapa de representación del método geológico de itinerarios irregulares en el levantamiento cartográfico de los PA en la región de Santa Lucía

Se emplearon tres GPS para el levantamiento cartográfico de los pasivos ambientales con el propósito de lograr la máxima representatividad y correspondencia de las coordenadas tomadas. Sus características técnicas, se describen a continuación.

Tabla 1. Dispositivos empleados en la investigación para el levantamiento cartográfico

Marca del GPS	Modelo	Sistema de Coordenadas
Garmin	GPSmap 78s	NAD 1927 Cuba Norte
Garmin	GPS	NAD 1927 Cuba Norte
IPhone	GPS IPhone 10.0	NAD 1927 Cuba Norte
Brújula nativa de móvil	Versión 13.0	---

Se emplearon tableros con formularios para el registro de las características y ubicación de cada uno de los PA como establece la metodología ASGMI. La conformación de la Base de Datos se desarrolló predeterminando 18 campos, según los propósitos y alcance del SIG concebido. Las herramientas utilizadas para el procesamiento y confección de los modelos cartográficos en el trabajo investigativo estuvieron apoyadas por ArcMap con los cuales se llevaron a cabo las fases metodológicas típicas de un proyecto de SIG. Para la confección de los mapas se trabajó sobre la base del Modelo Digital del Terreno (MDT) para la región de Santa Lucía disponible a escala 1:25000 que permitió la representación cartográfica con más exactitud.

A partir de la cartografía de cada uno de los PA de la región de Santa Lucía se integran todos los mapas en un modelo cartográfico integral, mediante una expresión matemática que concibe la sumatoria de los mapas de cada tipo de PA y de los componentes geológicos y geoespaciales de la región, como se expone a continuación en la ecuación (1):

$$M_{IPA} = \sum (M_{ET} + M_{RH} + M_S + M_{PAM} + M_{PAQ} + M_{PAT} + M_{PAS} + M_{PAA}) \quad (1)$$

Leyenda:

M_{IPA} : Mapa integral de pasivos ambientales, M_{ET} : Mapa esquema tectónico, M_{RH} : Mapa de red hidrográfica, M_S : Mapa de subregiones, M_{PAM} : Mapa de pasivos mineros, M_{PAQ} : Mapa de pasivos químicos, M_{PAT} : Mapa de pasivos tecnológicos, M_{PAS} : Mapa de pasivos sanitarios, M_{PAA} : Mapa de pasivos agroforestales.

Para el desarrollo del modelo cartográfico de la región, se emplea el método de superposición cartográfica, aplicado por vez primera para el análisis de los PA de esta zona.

3. Resultados y Discusión

Durante décadas, la región de Santa Lucía ha estado sometida, principalmente, al desarrollo intenso de la actividad minero-metalúrgica, forestal, turística, portuaria y agropecuaria, lo que ha propiciado su deterioro ambiental. Las acciones de rehabilitación proyectadas no se han ejecutado con efectividad. Estos procesos han agudizado, con el paso del tiempo, las afectaciones socio-ambientales de la región. El uso de los SIG y las fichas técnicas para cada PA permite un mejor manejo de la información asociada a las tipologías y características de los pasivos ambientales.

De este análisis se infiere que el abordaje de los pasivos ambientales no debe orientarse solo desde el impacto de la minería sobre el medio ambiente, sino que deben considerarse todo tipo de fuentes generadoras de modificaciones a las condiciones naturales originales de las áreas donde se desarrollan esas actividades. Para ello, se asume el criterio reportado [1] sobre las fuentes generadoras de PA. Por lo que este novedoso enfoque, considera todo tipo de actividad socioeconómica que afecta al estado ambiental previo o dispone inadecuadamente sus residuos.

En el trabajo se emplea la clasificación general de los pasivos ambientales, reportados por estos autores, para los tres grupos: Grupo- I, según los factores antrópicos que los generan (minero, químico, sanitario, tecnológico y agroforestal), Grupo-II de acuerdo a los componentes que denotan su peligrosidad y magnitud (inorgánico, ácido-base, orgánico, biológico y lignocelulósico) y Grupo-III por la respuesta a la acción de remediación que se establece (perpetuo, persistente, difuso, buffer y correctivo), lo que facilitó el inventario y la organización del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Como resultado de la actualización del inventario de pasivos ambientales en el área objeto de estudio Santa Lucía se registra un total de 62 PA, asociados a los principales sectores y actividades que se ejecutan en la región. De acuerdo con los tres grupos de clasificación de los pasivos ambientales [1], se desglosan acorde a la Figura 2 de la siguiente forma:

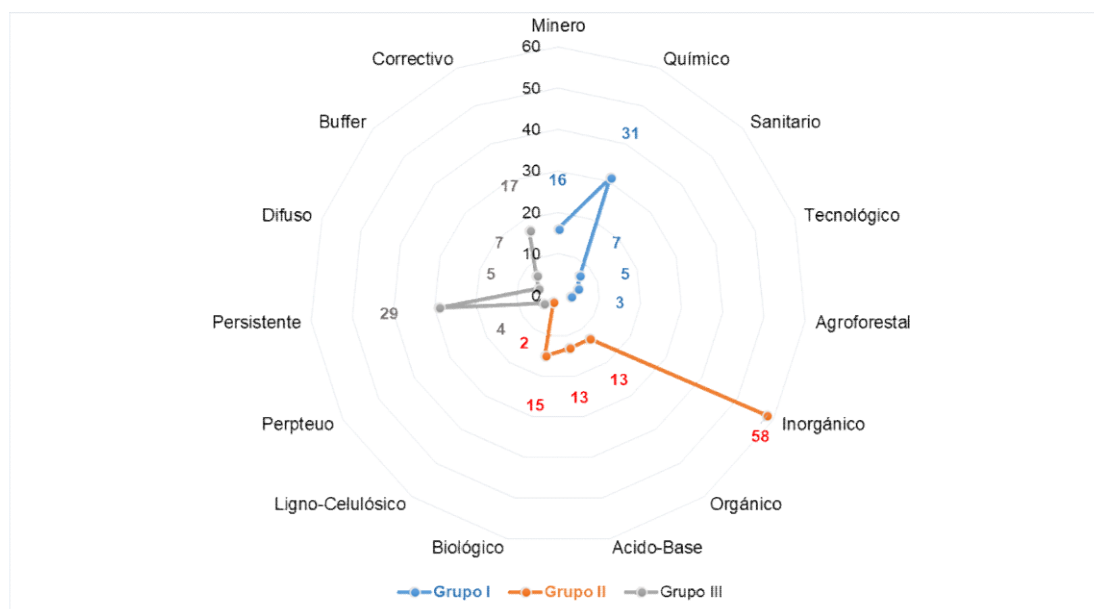


Fig.2 Inventario de pasivos ambientales según los tres grupos de clasificación para la región de Santa Lucía [1]

Se comprueba que el 76% son pasivos ambientales químicos (PAQ) y mineros (PAM), lo cual se corresponde con las características socio-económicas y la evolución histórica de esa región. Además, el 11% son sanitarios (PAS), el 8% son de naturaleza tecnológica (PAT) y el 5% agroforestal. Asimismo, el 94% de los pasivos ambientales, tienen una naturaleza inorgánica de los EPT que los caracterizan y el 53% de los PA mantiene una respuesta perpetua o persistente a la tecnología de rehabilitación o restauración que se ejecute.

Del levantamiento cartográfico del inventario de los PA en Santa Lucía, se desarrolló un total de 22 representaciones cartográficas según los tipos de pasivos y los elementos biogeoambientales de interés para el SIG. Se integró la información geográficamente referenciada, permitiendo analizar la información espacial, editar los datos y presentar los resultados de todas las operaciones geoespaciales realizadas.

En el mapa de la Figura 3 se muestra la correlación espacial, entre los 62 PA del inventario y el tipo de componente químico que lo caracteriza: inorgánico, orgánico, biológico, ácido-base y lignocelulósico, mediante superposición geográfica.

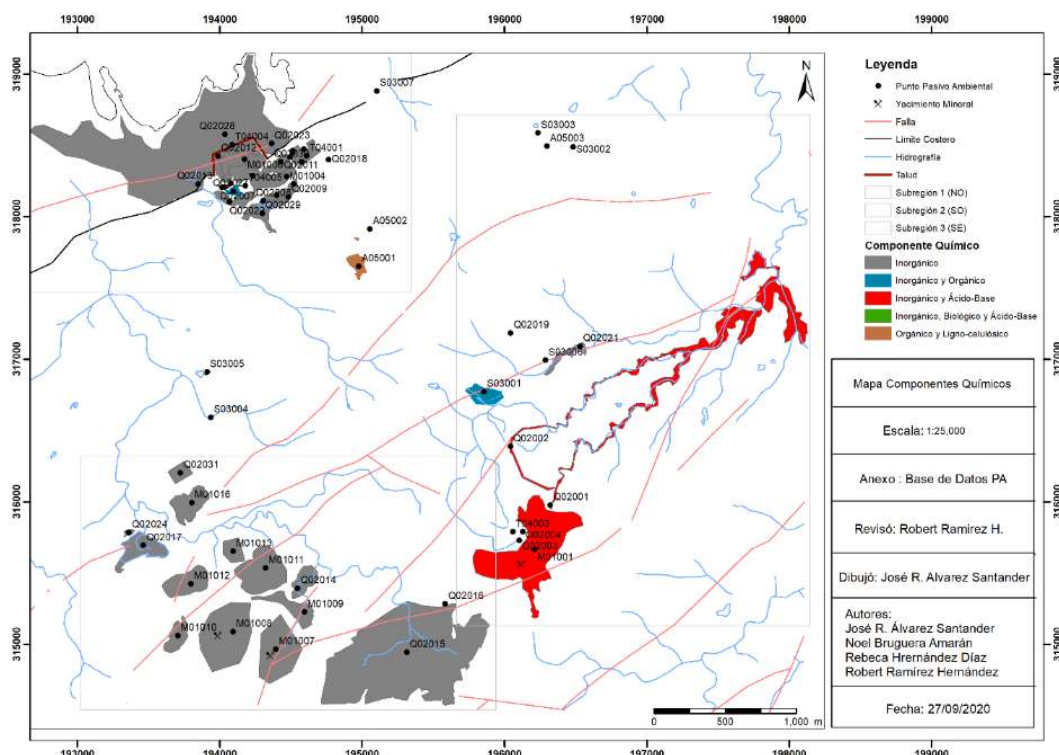


Fig.3 Mapa de correlación geoespacial con los componentes químicos activos de los PA del inventario

Como se aprecia, prevalecen los PA de composición inorgánica y ácido-base de acuerdo con la clasificación del Grupo-II, lo que se corresponde con lo abordado, donde el 94% de los pasivos ambientales del inventario, tienen una naturaleza inorgánica de los EPT que los caracterizan, por constituir PAM y PAQ, condicionados por la actividad minero-metalúrgica desarrollada en la región.

En la Figura 4 se representa la correlación geoespacial del inventario con la magnitud del riesgo que caracteriza cada tipo PA. Se constata que resulta notable el nivel de riesgo alto y muy alto que caracteriza a los PA identificados en las tres subregiones, condicionados por los peligros tecnológicos y las vulnerabilidades que distinguen a los pasivos de naturaleza química y minera.

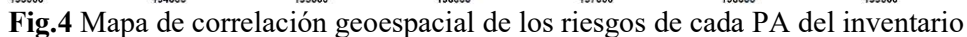


Fig.5 Drenaje ácido de la mina Santa Lucía en sus dos vertientes de la escorrentía

Teniendo en cuenta el alcance del SIG diseñado en la investigación, en el que se definen posibles soluciones alternativas de medidas de remediación para la rehabilitación de los PA que ofrecen respuestas correctivas, difusas, buffer o persistentes a las tecnologías de remediación más apropiadas, se muestra en el mapa de la Figura 6, esa correlación geoespacial.

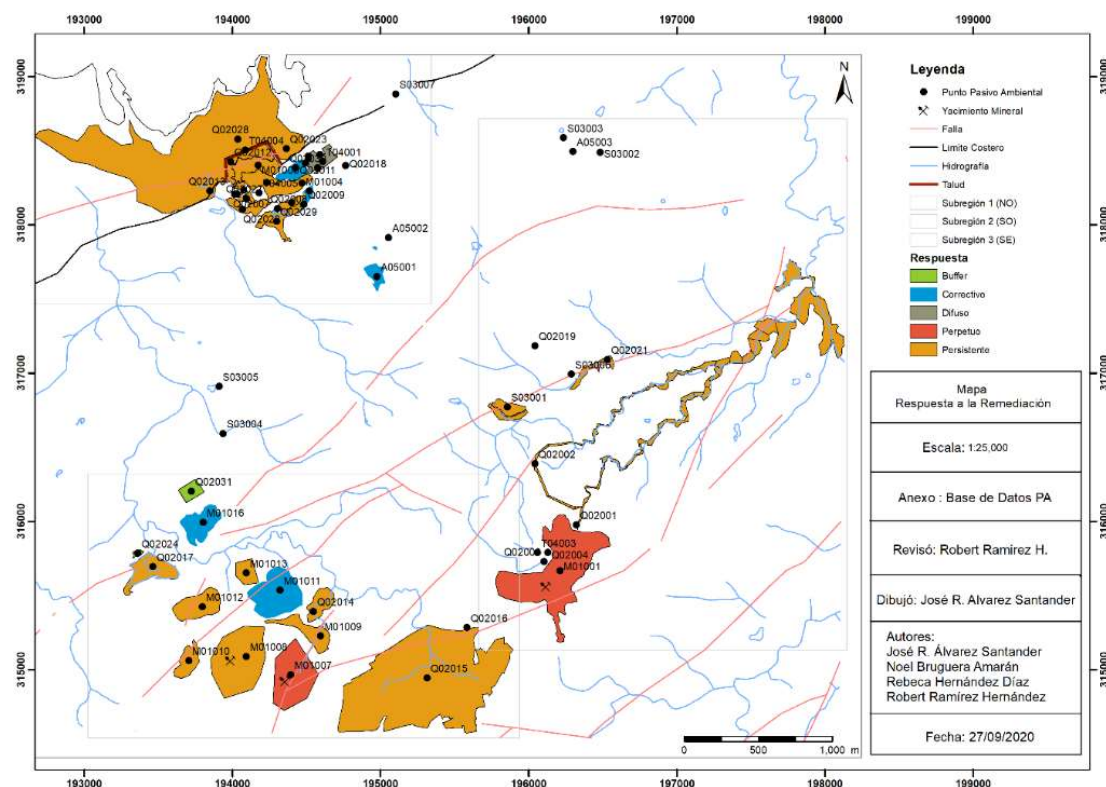


Fig.6 Mapa de correlación geoespacial de la respuesta a la acción de remediación de los PA del inventario

Según la superposición de capas para cada variable cartografiada, se constata que la correlación de los tipos de PA con la respuesta a la acción de remediación definida, resulta evidente que prevalecen los pasivos con respuestas, perpetua (PAP) y persistente (PAPS), lo cual es característico de la huella generada de procesos de extracción minera como recurso no renovable y de los procesos tecnológicos asociados. Los DAM superficiales de la región son de gran importancia en la interpretación de la relación hidrografía con el PA.

Los patrones identificados de densidad de tipos de pasivos y la frecuencia, pueden ser utilizados como criterio en la dinámica que presentan estas dos variables ambientales. En cuanto a la correlación del inventario de PA con las unidades geológicas representadas en la región de Santa Lucía, se expone en el mapa de la Figura 7.

Como se aprecia, el mayor número de PA del inventario de tipo PAQ y PAM, se concentran sobre la formación Esperanza y Santa Teresa para la subregión NO que se desarrollan sobre la unidad geológica Castellano. Asimismo, se constata que el mayor número de representaciones de los PA coincide sobre los depósitos aluviales y los palustres, correspondiendo con los ecosistemas acuáticos y mixtos (humedales costeros e interiores) más frágiles, lo que facilita un mayor grado de dispersión de los elementos contaminantes de estos PAQ y PAM en estas zonas.

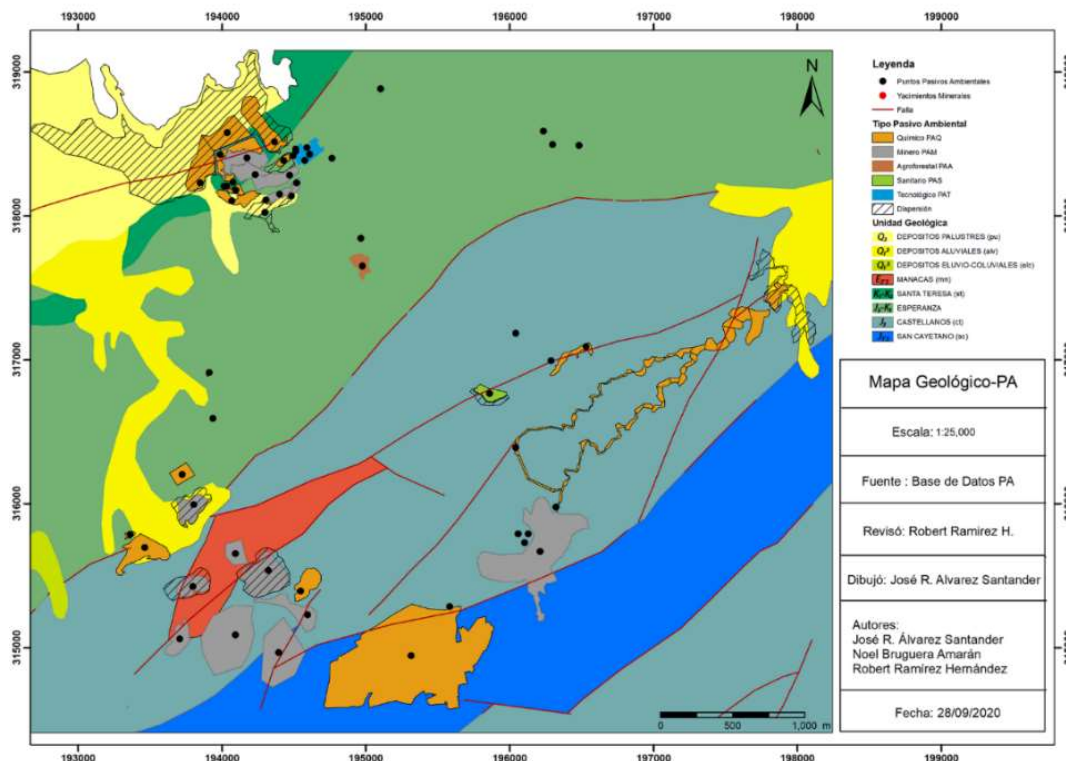


Fig.7 Mapa de correlación geoespacial de los PA con las unidades geológicas representadas en Santa Lucía

Con la finalidad de revelar la distribución espacial de los PA, recogidos en una sola hoja cartográfica, así como, definir las potencialidades dispersantes de los agentes contaminantes y de los riesgos sobre los distintos componentes del medio ambiente en que interactúan se arriba al modelo cartográfico para la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, como se muestra en la Figura 8.

El Modelo Cartográfico Integrado de los PA, se expone mediante 15 mapas, con la integración y ponderación lograda de las capas de las unidades lito-estratigráficas, de fallas, la red hidrográfica y los ecosistemas. A partir del procesamiento previo de los análisis multicriterio en función de los atributos de cada pasivo ambiental y el modelo cartográfico, se logra un análisis espacial satisfactorio.

Se constata que la distribución espacial de los 62 PA identificados en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía manifiesta una apreciable heterogeneidad en su escala representativa en cuanto a puntos y polígonos, en toda la geografía de la zona. Además, coinciden las subregiones con mayor densidad de PA con la representación del ecosistema acuático, tanto del marino (subregión NO), como de la densidad de la red dulceacuícola superficial de la región (subregión SE y SO), que se encuentran representadas las cuencas río Santa Lucía y Nombre de Dios.

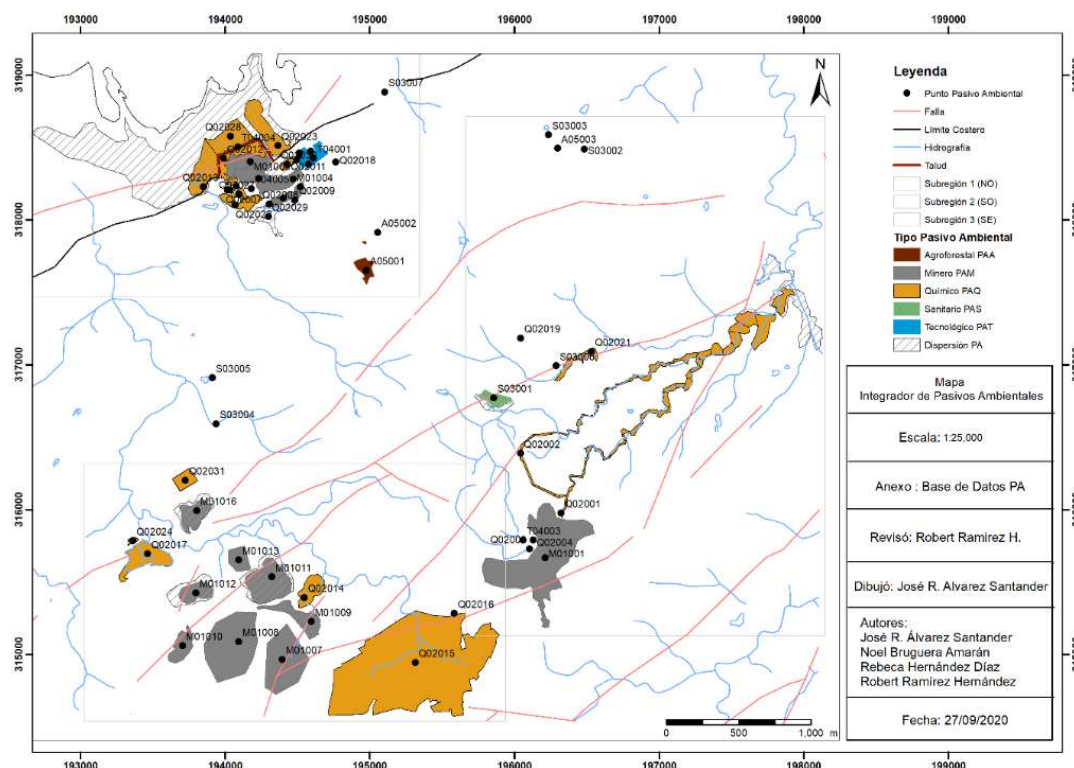


Fig.8 Modelo Cartográfico Integrado (MCI) de los PA de la región minero-metalúrgica de Santa Lucía

El MCI, constituye una herramienta geocartográfica y de gestión sin precedentes para la región objeto de estudio, con la cual se crean condiciones perspectivas para desarrollar estudios sobre la gestión de riesgos provocados por los pasivos ambientales según su naturaleza, así como para modelar y estimar los grados de dispersión de los elementos contaminantes generados por cada pasivo.

Permite la descripción geoespacial de los PA y los impactos negativos generados en los ecosistemas representados. Contribuye a establecer un punto de partida sin precedentes en el abordaje de las problemáticas ambientales que se generan en regiones de vocación minero-metalúrgica, para asegurar una gestión ambiental con enfoque integrado, eco-sistémico, precautorio y de sostenibilidad.

Las soluciones ingeniero-ambientales que se determinen para la remediación y rehabilitación de la región de estudio por las entidades responsables, disponen de una herramienta basada en la integración de los sistemas de datos espaciales, de la representación cartográfica, la superposición de imágenes satelitales y de modelos de elevación digital en sinergia con los componentes geológicos y geo-ambientales de la región y por consiguiente, facilita el desarrollo de soluciones efectivas.

4. Conclusiones

Las herramientas y modelos informáticos empleados en la investigación permitieron la actualización del inventario de pasivos ambientales en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, con un registro de 62 PA y la obtención de un SIG que corrobora los análisis precedentes sobre las fuentes generadoras de contaminación ambiental en la zona objeto. Se obtiene por primera

vez un Modelo Cartográfico Integrado (MCI) sobre el inventario de los pasivos ambientales de la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, por la superposición cartográfica y la correlación entre las variables geología, tectónica, red hidrográfica y ecosistemas con los atributos definidos para los Pasivos Ambientales.

Referencias

1. Bruguera-Amarán, N., Gallardo-Martínez, D., Díaz-Duque, J.A. *Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba*. 2020. Avances. **22**(3): p. 469-490.
2. Bruguera-Amarán, N., Gallardo-Martínez, D., Díaz-Duque, J.A. *Impacto de los pasivos ambientales en la red hidrográfica de la región minera de Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba*. 2022. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. **XLIII** (1): p. 63-78.
3. Cuentas-Alvarado, M., Velázquez-Visa, O., Arizaca-Avalos, A., Huisa-Mamani, F. *Evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros en la comunidad de Condoraque-Puno*. 2019. Medio Ambiente Minero y Minería. **4**(2): p. 42-57.
4. Jensen K., Birche. M. *La recuperación de pasivos ambientales desde el proyecto de paisaje: el parador ecológico*. 2018. Geograficando. **14**(2). <https://doi.org/10.24215/2346898Xe044>
5. Arango, M., Olaya, Y. *Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia*. 2012. Revista Gestión y Ambiente. **158**(3): p. 125-133.
6. Aduvire, O. *Drenaje Acido de Mina. Generación y tratamiento*. 2006. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Instituto Geológico y Minero de España. 140p.
7. Flores, S., Núñez, P., Zegarra, E., Flores, J. *Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de Cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible*. 2019. Revista del instituto de investigación FIGMMG-UNMSM. **22**(44). p. 85-93. <http://dx.doi.org/10.15381/iigeo.v22i44.17289>
8. Sánchez-Barbón, A.G., Barajas-Tarazona, J.S. *Pasivos ambientales del sistema Chingaza: un análisis desde los actores y la normatividad*. 2021. Reflexión Política. **23**(47): p. 28-40. <https://doi.org/10.29375/01240781.3970>
9. López, L.M., López, M.L., Medina, G. *La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica*. Entramado, 2017. **13**(1): p. 78-91. <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>.
10. García, C. A., García, M.C., Agudelo, C.F. *Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C.* 2014. **18**(42): p. 90-102. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a07>
11. Jiménez, C., Huante, P., Rincón, E. *Restauración de Minas Superficiales en México*. Informe de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2006. México, 10 p.
12. Russi, D., Martínez Alier, J. *Los pasivos ambientales*. Revista de Ciencias Sociales. 2002. **15**: p.123-131.
13. Gallardo-Martínez, D., Bruguera-Amarán, N., Díaz-Duque, J. A., Cabrera-Díaz, I. *Impacto provocado por la minería en la zona de Santa Lucía, evaluación físico-química*. Revista Minería y Geología. 2015. **31**(4): p. 100-120.
14. Gallardo-Martínez, D. *Modelo de gestión ambiental integral para el desarrollo de la actividad minero-metalúrgica asociada a los yacimientos sulfurados en Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba*. Tesis de Doctorado, 2018. Universidad de Pinar del Río, Cuba. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25751.04002>
15. Milián, E. *Procedimiento para la rehabilitación minera ambiental para los yacimientos polimetálicos de Pinar del Río*. Tesis de doctorado, 2015. Universidad de Moa, Cuba.

16. Buzai, G. D. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Evolución teórico-metodológica hacia campos emergentes*. Revista Geográfica de América Central. Número Especial XIII EGAL. I Semestre. 2012: p. 15-67.
17. ASGMI (Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos). *Pasivos Ambientales Mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas*. Barquisimeto. 2010. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21454.08002>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Noel Caridad Bruguera Amarán. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4084-2803>

Investigación, coordinación y participación en las campañas de levantamiento cartográfico y evaluación in situ de los pasivos ambientales (PA) del área objeto de estudio. Coordinó la organización y procesamiento de los datos generados. Asimismo, en la clasificación y caracterización de los tipos de PA.

José Antonio Díaz Duque. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0032-4681>

Brindó las bases para el marco teórico de la investigación. Incidió en la clasificación y definición de los pasivos ambientales, así como en el análisis y establecimiento de los campos e indicadores de la base de datos que soporta el SIG del inventario de los PA. Aportó referentes determinantes para la caracterización hidrogeológica de la zona.

José Ricardo Álvarez Santander. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6170-6873>

Participó en el levantamiento cartográfico e inventario de los pasivos ambientales generados en la región de estudio. Coordinó el diseño y validación de los mapas que soportan el SIG para los PA. Participó en el proceso de caracterización geológica y actualización de la red hidrográfica de la región de Santa Lucía.

Rebeca Hernández Díaz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9088-4046>

Incidió en la validación científica de la caracterización de los impactos de los PA sobre la red hidrográfica de la región. Participó en la concepción del nuevo mapa de la red hidrográfica y del SIG para el inventario de los PA en Santa Lucía, Minas de Matahambre. Validó la caracterización hidrogeológica de la zona.

Robert Ramírez Hernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0224-0011>

Participó en las acciones ejecutadas para el levantamiento cartográfico del inventario de los PA en el área objeto de estudio. Coordinó la organización y procesamiento de los datos generados y el diseño de los mapas del inventario de los PA y aplicación de herramientas computacionales para el desarrollo del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Damaris Gallardo Martínez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9063>

Intervino de manera directa en el inventario de los pasivos ambientales generados en la región de estudio mediante el levantamiento cartográfico y diseño de los itinerarios irregulares. Coordinó el proceso de toma de muestras para la caracterización físico-química de los drenajes ácidos de minas (DAM) y su impacto sobre la red hidrográfica de la región.