Impacto de los pasivos ambientales en la red hidrográfica de la región minera de Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba.

NOEL CARIDAD BRUGUERA AMARÁN E-MAIL: noel@ecovida.cu
Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA, Pinar del Río, Cuba

JOSÉ ANTONIO DÍAZ DUQUE E-MAIL: jaduque@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cuba

JOSÉ RICARDO ÁLVAREZ SANTANDER E-MAIL: jralvarez1006@gmail.com
Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente CITMA, Cuba.

REBECA HERNÁNDEZ DÍAZ E-MAIL: rebeca@upr.edu.cu
Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Cuba

ROBERT RAMÍREZ HERNÁNDEZ E-MAIL: robertrh@upr.edu.cu
Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Cuba

DAMARIS GALLARDO MARTÍNEZ E-MAIL: jefe.uma@citmapri.gob.cu
Delegación Territorial CITMA, Pinar del Río, Cuba

RESUMEN

Los pasivos ambientales (PA) generados en las regiones mineras han provocado la fragmentación de los ecosistemas y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. El objetivo de la investigación es desarrollar una evaluación ambiental y cartográfica de los impactos de los pasivos ambientales sobre los ecosistemas y la red hidrográfica de la región de Santa Lucía. Se emplean como herramientas el Sistema de Información Geográfica (SIG) con soporte en ArcGIS y el método geológico de itinerarios irregulares en tres sectores. Se utilizó la observación en las dos campañas de levantamiento cartográfico como método empírico. La evaluación ambiental y cartográfica se realiza para el inventario de 62 PA. La representación cartográfica de los PA permite su correlación con la hidrogeología y los ecosistemas.

PALABRAS CLAVES: contaminación, ecosistemas, modelos cartográficos, pasivos ambientales, red hidrográfica.

Impact of environmental liabilities on the hydrographic network of the mining region of Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba.

ABSTRACT

The environmental liabilities generated in the mining regions have caused the fragmentation of ecosystems and the contamination of surface and groundwater. The objective of the research is to develop an environmental and cartographic assessment of the impacts of environmental liabilities (EL) on the ecosystems and the hydrographic network of the Santa Lucia region. The Geographic Information System (GIS) with support in ArcGIS and the geological method of irregular itineraries in three sectors are used as tools. Observation was used in the two cartographic survey campaigns as an empirical method. The environmental and cartographic evaluation is conducted for the 62 EL inventory. The cartographic representation of the EL allows their correlation with hydrogeology and ecosystems.

KEYWORDS: pollution, ecosystems, cartographic models, environmental liabilities, hydrographic network.

Mayo 2021-RECIBIDO APROBADO Enero 2022

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

01 INTRODUCCIÓN

En las regiones mineras, el origen de los yacimientos, las tecnologías de procesamiento y la naturaleza de los sectores económicos asociados son determinantes para la mitigación y remediación de los problemas ambientales provocados a los diferentes ecosistemas expuestos. Entre las principales actividades socioeconómicas que generan una amplia huella ambiental sobre los ecosistemas resaltan: la prospección y explotación de los recursos minerales y los procesos metalúrgicos inducidos para su tratamiento, con el consiguiente aporte de elementos potencialmente tóxicos (EPT) a los ecosistemas receptores, transportados por drenaje ácido de minas (DAM) a las cuencas superficiales y subterráneas. Estos pasivos, requieren caracterizaciones integrales y acciones de manejo efectivas para minimizar sus riesgos (Bruguera et al. 2020).

El drenaje ácido de minas (DAM), producto de la actividad minera, es una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Estas escorrentías de aguas de alta acidez, generadas en actividades mineras de yacimientos de sulfuros metálicos, causan problemas ambientales por su alto potencial de contaminación para los recursos hídricos. Se caracteriza por sus bajos valores de pH y un alto contenido de sulfatos y metales, nocivos para los ecosistemas (Gallardo et al. 2015). El laboreo minero provoca la devastación de los ecosistemas donde se originan impactos ambientales negativos como la deforestación, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación de las aguas terrestres, marinas y de los suelos, por elementos geodisponibles.

Montenegro (2013) analiza el DAM a través de su categorización y clasificación, según su acidez, alcalinidad y las reacciones que ocurren en su formación. Este drenaje desarrolla una amplia aureola de dispersión o pluma de contaminantes, que aporta una alta carga de metales pesados, constitutivos de PA. En Cuba, Fuentes et al. (2013) evalúan los PA en la cantera abandonada Vizcaya, en donde se efectuó la extracción de caliza para la producción de materiales de la construcción. Estos pasivos constituyen una fuente de contaminación de las aguas subterráneas.

Los yacimientos Santa Lucía y Castellanos, situados en la región de estudio, están constituidos por dos tipos de menas, las pirito-polimetálicas y las barito-polimetálicas. Ellos han sido objeto de una explotación minera intensiva durante años, lo que ha provocado impactos adversos al medio. Las prácticas de mitigación no fueron efectivas, lo que ha producido problemas ambientales que se han ido agudizando con el tiempo. La cantera Santa Lucía aún abierta, sin acciones de rehabilitación positivas, manifiesta eventos de meteorización por la exposición de minerales de características sulfurosas (Milián 2015).

Cañete et al. (2011) analizan únicamente al ecosistema acuático, y en especial el lótico (río Santa Lucía), en una región con graves afectaciones ambientales por pasivos mineros. Alonso et al. (2011) reportan los resultados sobre la mineralogía ambiental de procesos de DAM en el pasivo minero Santa Lucia y su vinculación con elementos geodisponibles (EGD). Gallardo (2018) desarrolla un modelo de gestión ambiental integral con enfoque ecosistémico para los impactos de la actividad minero-metalúrgica en la región de Santa Lucía con enfoque de sostenibilidad. En su trabajo propone acciones para mitigar los impactos generados en las aguas terrestres y marinas, los suelos y en la zona costera. En todas estas investigaciones no se logra una caracterización integral de la problemática de los PA con la hidrogeología de la zona y su expresión cartográfica.

El abordaje de los PA, independientemente de la fuente, de su naturaleza y la magnitud de sus impactos, exige de herramientas que contribuyan al inventario, caracterización y gestión de sus riesgos de manera efectiva. 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 los decisores, así como a proyectar y estimar el alcance de sus impactos sobre los ecosistemas receptores (Álvarez et al. 2020).

Según Olaya (2014), los SIG permiten integrar operaciones involucradas en el manejo geográfico de cartografía como consultas, integración y análisis de datos. Estas herramientas contribuyen a la realización de inventarios y la gestión de sus datos para la obtención de resultados y estimaciones de posibles impactos de los pasivos ambientales. Los SIG gestionan la cartografía necesaria para el manejo integral de las variables cartografiadas y lo hacen de forma centralizada.

Los estudios precedentes acerca de los inventarios de pasivos ambientales, así como del análisis de los impactos de la actividad extractiva y los procesos tecnológicos asociados, en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, no han contemplado un abordaje de los pasivos ambientales acumulados mediante el uso de SIG, para el análisis espacial integral de los datos generados, lo que limita su gestión. El problema de investigación, los inventarios de PA en esta región de naturaleza química y minera, no han sido abordados mediante SIG que correlacionen la caracterización ambiental y cartográfica con la hidrogeología y los ecosistemas de la zona, para asegurar su gestión efectiva. El objetivo del presente trabajo es, en consecuencia, desarrollar una evaluación ambiental y cartográfica de los pasivos ambientales en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía de acuerdo con su distribución espacial y correlacionarlo con la red hidrográfica y los ecosistemas acuáticos de la zona.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL ÁREA

El área de estudio (figura 1) se localiza en el municipio Minas de Matahambre, al noroeste de la provincia de Pinar del Rio (Cuba), los límites naturales del territorio se corresponden con el rio Santa Lucía, el rio Nombre de Dios, con la Sierra de los Órganos y el golfo de Santa Lucía. Se encuentra delimitada por las coordenadas Lambert (NAD 1927 Cuba Norte):

$X_{mín.}$ = 195 000 $X_{máx.}$ = 199 000

$Y_{mín.}$ = 315 000 $Y_{máx.}$ = 318 000

GEOLOGÍA REGIONAL Y DEL ÁREA DE ESTUDIO

El yacimiento Santa Lucía (depósito SEDEX de Pb-Zn) manifiesta una amplia zona de mineralización de este depósito en su corte. Se pueden observar las limolitas, areniscas y esquistos, y en la parte superior la zona de oxidación. Santa Lucía es un yacimiento pirítico. Por su importancia industrial, composición mineralógica y su componente útil, sus menas se dividen en menas primarias y oxidadas. La mena primaria está compuesta por pirita, esfalerita y galena con barita, cuarzo y calcita como minerales ganga (Álvarez et al. 2020).

El yacimiento Castellanos (depósito de *stockwork* de Cu y estratiforme de Pb-Zn), se ubica en el campo mineral Santa Lucía-Castellanos, y está emplazado en las rocas del Miembro Castellanos de la Formación San Cayetano. Este miembro está constituido por alternancias entre esquistos arcillo-carbonosos, limolitas, limoareniscas y areniscas, predominando siempre las rocas de granulometría más fina. Es un yacimiento pirito polimetálico con oro en la zona de oxidación. Los minerales principales son esfalerita, galena, pirita, oro, y barita. Tiene texturas masivas y brechadas. La reserva probada tiene un *cut-off* de 2,5% Zn con Cd = 0,017%.

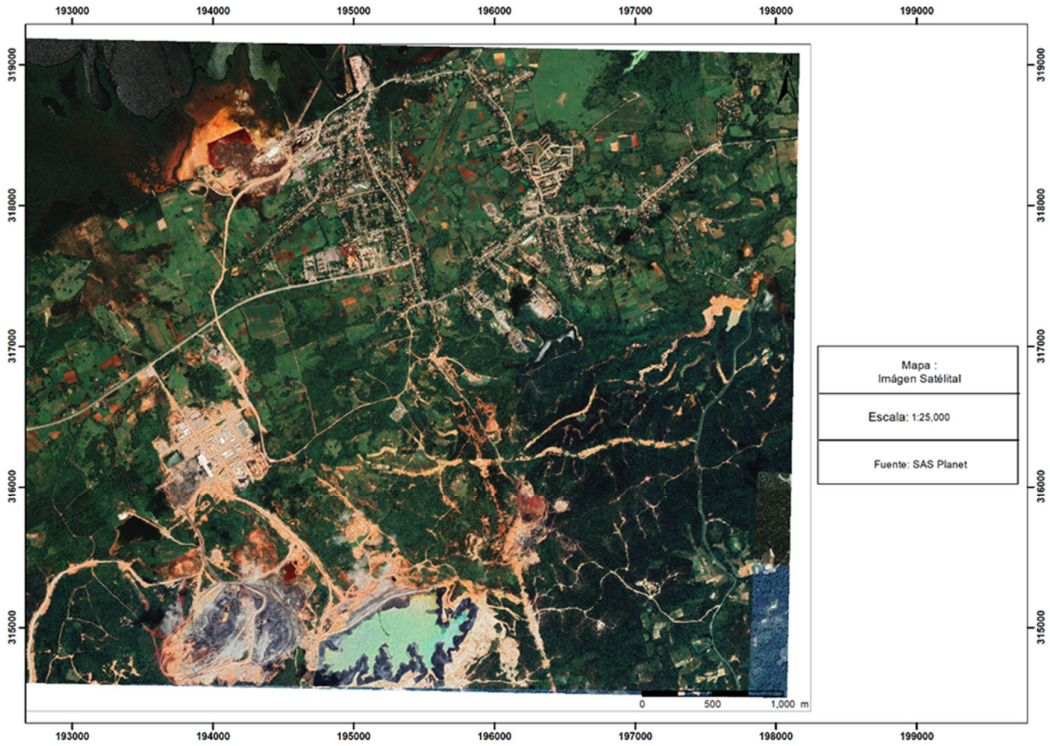

Figura 1. Mapa de la región de Santa Lucía desde la imagen satelital de SAS Planet 2020 (Álvarez et al. 2020)

GEOMORFOLOGÍA Y RELIEVE

La génesis del relieve es tectono-erosiva con edades que oscilan entre el Mioceno y Cuaternario. Este tipo de relieve presenta dos variedades elaboradas en secuencias terrígenas de la Formación San Cayetano: las aplanadas, con una mayor distribución superficial, ocupan la mayor parte del territorio para este tipo de relieve. Sus cotas absolutas oscilan entre 50 y 200 m y el sistema de drenaje superficial es bastante denso (2 - 2,5 km/km^2). Las pendientes de las divisorias son cóncavas, denudadas y con valores de 10-15º.

Según (GAMMA 2013 en Gallardo 2018), la morfología de este tipo de relieve depende más de la etapa de desarrollo en que se encuentra la red hidrográfica, que de la influencia de los movimientos tectónicos, al parecer poco pronunciado. En el área de estudio se encuentran tipos de relieve de carácter lito-estructural también clasificado como tectono-litológico, elaborado sobre las secuencias carbonatadas del Jurásico y del Cretácico Inferior. Cuentan como factor pasivo condicionante con la litología y la presencia de un complejo sistema de estructuras disyuntivas que atraviesan el macizo carbonatado llegando a establecer separación por bloques.

FORMAS DEL RELIEVE

Dentro del territorio se encuentran variadas formas del relieve los cuales pueden ser clasificadas de acuerdo a su génesis en: a) marinas, que se destacan fundamentalmente por la costa baja acumulativa con predominio de vegetación de manglares, aunque con presencia de aisladas playas con sedimentos arenosos; otras formas del relieve de origen marino son los testigos de abrasión presentes en la llanura fluvio marina, abrasiva acumulativa del Q_{3-4}; b) fluviales, en las que se destacan los valles fluviales más amplios en la llanura fluvio marina litoral del Q_{3-4} y en las localidades intramontanas, formando depresiones donde tienen vigencias procesos erosivos, denudativos y cársticos; c) biogénicas, se clasifican como tal los manglares y pantanos del litoral; d) antrópicas,

resaltan las modificaciones de relieve originadas por la acción humana, siendo las más comunes las urbanizaciones, las presas y los embalses, y por las características económicas del municipio, las minas a cielo abierto (GAMMA 2013 en Gallardo 2018).

HIDROGEOLOGÍA Y RED HIDROGRÁFICA

Según el Plan General de Ordenamiento Territorial y Urbano del Municipio Minas de Matahambre (Gallardo 2018), la red fluvial de la zona objeto de estudio, se puede catalogar de escasa y poco densa. Tiene una forma dendrítica, aunque los ríos entre sí adoptan una forma paralela y subparalela a la zona, corren de sur a norte. Las corrientes más importantes están representadas por los ríos Palma, Nombre de Dios y Santa Lucía. El sistema fluvial del yacimiento Santa Lucía, se localiza en la vertiente norte perteneciente a la cuenca hidrográfica Santa Lucía, hacia la cual drenan sus aguas. Este río es la principal corriente y la única permanente de la zona; se incorpora directamente al mar y el resto de las corrientes lo hacen hacia la zona litoral baja.

De acuerdo con el estudio de impacto ambiental realizado en la región de estudio (GAMMA 2013 en Gallardo 2018), en la hidrogeología se constata la presencia de cuatro horizontes acuíferos: horizonte acuífero de los depósitos del Cuaternario, complejo semipermeable del Paleógeno, complejo acuífero del Cretácico-Jurásico y complejo impermeable del Jurásico. La alimentación del acuífero se produce fundamentalmente por las precipitaciones atmosféricas. El movimiento de las aguas subterráneas es hacia el norte. La red de escurrimiento superficial se alimenta por arroyos y canales localmente naturales que drenan hacia el mar. Los ríos y afluentes del sistema hidrográfico de la región (figura 2), constituyen los cuerpos receptores y dispersantes de los elementos contaminantes, mediante las escorrentías que drenan por los niveles descritos en el modelo digital del terreno.

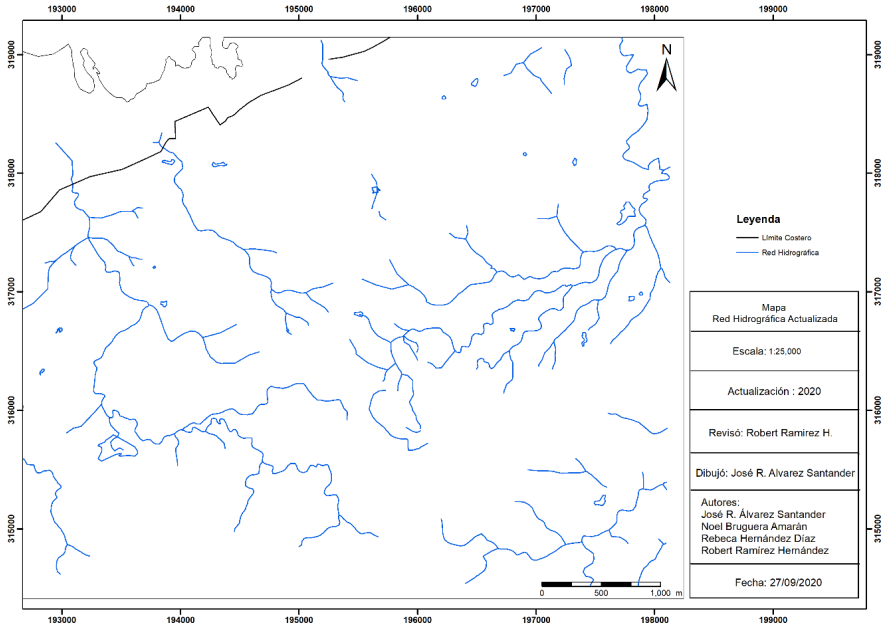

Figura 2. Mapa de la red hidrográfica actualizada para la región minero-metalúrgica de Santa Lucía (Álvarez et al. 2020)

Esta actualización permite analizar la correlación del inventario de PA con el alcance del impacto de los elementos que representan fuentes de contaminación en la región y constituye un resultado sin precedentes para la región objeto de estudio.

CARTOGRAFÍA Y SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

LEVANTAMIENTO CARTOGRÁFICO DEL TERRENO

Para organizar y desarrollar con rigor el levantamiento cartográfico de los pasivos ambientales en la zona, se delimitó el área de estudio en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, donde se concentra el universo total de los pasivos generados por las actividades económicas y sociales. Se empleó una imagen satelital de SAS Planet de 2020 (figura 3). Para asegurar la máxima precisión en los elementos biogeonaturales de la región se efectuó una superposición de la imagen satelital sobre la hoja cartográfica de Santa Lucía. Partiendo de la aplicación del método geológico de itinerarios irregulares, se trazaron los recorridos para el levantamiento cartográfico.

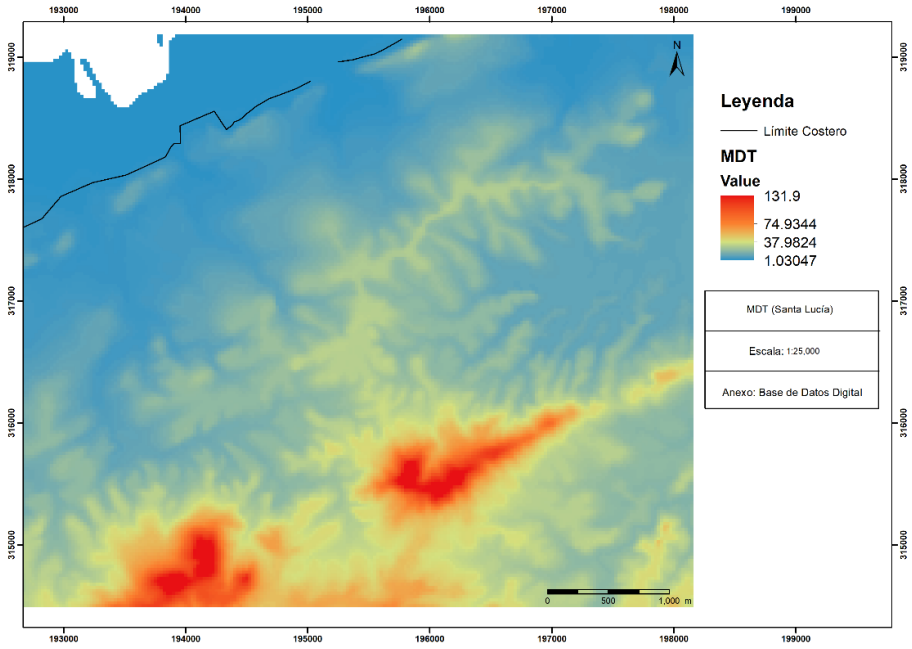

Figura 3. Mapa del MDT disponible a escala 1:25000 de la región objeto de estudio, Santa Lucía (Álvarez et al. 2020)

HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Para los procesos de diagnóstico, evaluación y procesamiento de datos espaciales de los diferentes PA cartografiados, fueron utilizadas como herramientas tres GPS modelo Garmin GPSmap 78s, en el sistema de coordenadas NAD 1927 Cuba Norte, para el levantamiento cartográfico de los PA, con el propósito de lograr la máxima representatividad y correspondencia de las coordenadas tomadas. Se emplearon tableros con formularios para el registro de las características y ubicación de cada uno de los PA como establece la metodología ASGMI (2010).

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Las herramientas utilizadas para el procesamiento y confección de los modelos cartográficos en el trabajo investigativo estuvieron apoyadas por SAS Planet y ArcMap con los cuales se llevaron a cabo las fases metodológicas típicas de un proyecto de SIG. La plataforma SAS Planet empleada fue la versión 200606, proyección Mercator en WGS 1984 y EPSG: 3395, para la UTM zona 17N.

Esta valiosa herramienta permitió la captura georreferencial a gran escala del área de estudio logrando una imagen satelital proveniente del servidor convencional *Google Earth* de alta resolución.

Para la confección de los mapas se trabajó sobre la base del modelo digital del terreno (MDT) disponible a escala 1:25000, que permitió la representación cartográfica con más exactitud.

Para graficar los puntos fue necesario el cambio de coordenadas geográficas a planas mediante el sistema informático Convert ENIA versión 1.0.01, con vistas a lograr la visualización de estos en ArcMap versión 10.7.

INVENTARIO DE LOS PASIVOS AMBIENTALES EN LA REGIÓN

En la región objeto de estudio se han ejecutado procesos minero-metalúrgicos que han generado volúmenes considerables de materiales con alto potencial contaminante, entre los que resaltan los depósitos de ceniza de pirita (FeS_2), producto a la explotación metalúrgica, con más de 986 000 t dispuestas al medio en la zona costera. Se registra la presencia de más de 300 t de arsénico (As) y 7 t de pentóxido de vanadio (V_2O_5) en torres de absorción con alto deterioro estructural. Resaltan los 17 nichos de confinamiento con desechos peligrosos generados en los procesos industriales, las 1 600 t de escorias de plomo del proceso de fundición, entre otros depósitos de PA.

En la figura 4 se evidencian los principales PA de naturaleza minera acumulados en la región: A) Frente de explotación del yacimiento Castellanos; B) Frente explotación abierta de la cantera Santa Lucía sin rehabilitar; C) Depósito 3 de cenizas de pirita tostada en la zona costera.

Figura 4. Pasivo ambiental minero (PAM) en la región de Santa Lucía
(Álvarez et al. 2020)

Los pasivos ambientales químicos (PAQ), son los provocados por procesos de manejo incompleto de sustancias químicas naturales o sintéticas, como derivados de actividades productivas o del empleo y uso industrial, investigativo, docente, energético, metalográfico, farmacéutico y fitosanitario de sus componentes activos con potencial peligroso, durante su ciclo de vida. Para la región de estudio, los procesos precedentes y actuales, han estimulado la generación de este tipo de PAQ. La figura 5 muestra: A) Presa de las colas del proceso de flotación de plomo y zinc; B) Nichos con desechos peligrosos en la zona costera; C) Aguas ácidas confinadas en la zona costera por el talud producto al lavado de las cenizas tostadas.

Figura 5. Pasivo ambiental químico (PAQ) en la región de Santa Lucía
(Bruguera et al. 2020)

De acuerdo con la clasificación de los PA, según la naturaleza de la causa antrópica que lo genera, también se constatan apreciables acumulaciones y escurrimientos de drenajes ácidos de minas (DAM) como se muestra en la figura 6.

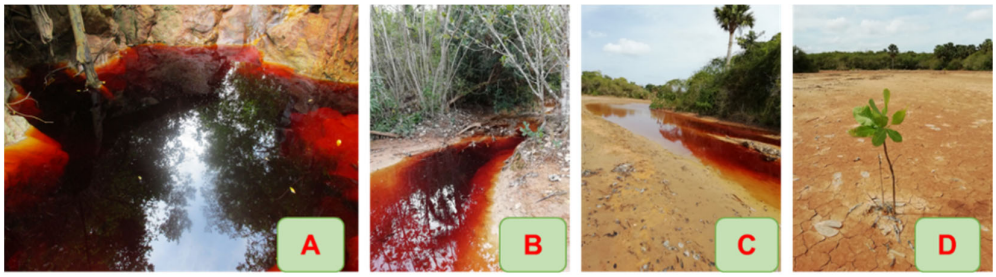

Figura 6. Drenaje ácido de la mina Santa Lucía como PAQ en su recorrido por el escurrimiento en las dos vertientes de la escorrentía (Álvarez et al. 2020)

En el caso específico del DAM del yacimiento Santa Lucía en sus dos vertientes, ocupa una extensión de 2,2 km, descargando sus drenajes ácidos en el cuerpo de agua de naturaleza léntica conocida como La Laguna. Como se constata, las coloraciones rojo-pardas de los drenajes ácidos son representativas de fases oxidadas de la pirita (szomolnokita, rozenita, bianchita, melanterita y magnesio-copiapita), como resultados de la acción biótica y meteorización natural. Este proceso, genera la formación *in situ* de la sulfosal compleja natrojarosita en las acumulaciones acuosas en el yacimiento Santa Lucía, durante el DAM y en los sedimentos analizados en el manglar, siendo representativos de elementos geodisponibles y con potencial contaminante para los ecosistemas receptores (Gallardo et al. 2020).

Como resultado de la actualización del inventario de PA en zona de Santa Lucía para las tres subregiones concebidas en la investigación para el levantamiento cartográfico de estos, se registra un total de 62 PA (figura 7), asociados a los principales sectores y actividades que se ejecutan en la región.

Esta clasificación se asocia a la condición ambiental modificada e inducida por la emisión de elementos con potencial contaminante, tras el no aprovechamiento de los componentes activos que determinan la generación de un riesgo para los ciclos biológicos de la naturaleza o procesos naturales meteorizantes que los favorecen, como la lluvia. Como se aprecia, en la región de Santa Lucía, el 76% son pasivos ambientales químicos (PAQ) y mineros (PAM), lo cual se corresponde con las características socioeconómicas y la evolución histórica de esa región. El 11% son pasivos sanitarios (PAS), el 8% son de naturaleza tecnológica (PAT) y el 5% agroforestal (PAA).

En cuanto a la clasificación de los pasivos ambientales, de acuerdo con la naturaleza de los componentes activos o elementos con potencial contaminante (ETP), se han asumido las cinco tipologías de PA reconocidos en el inventario (57 inorgánicos, 13 orgánicos, 13 ácido-base, 15 biológicos y dos ligno-celulósicos), establecidas por Bruguera et al. (2020).

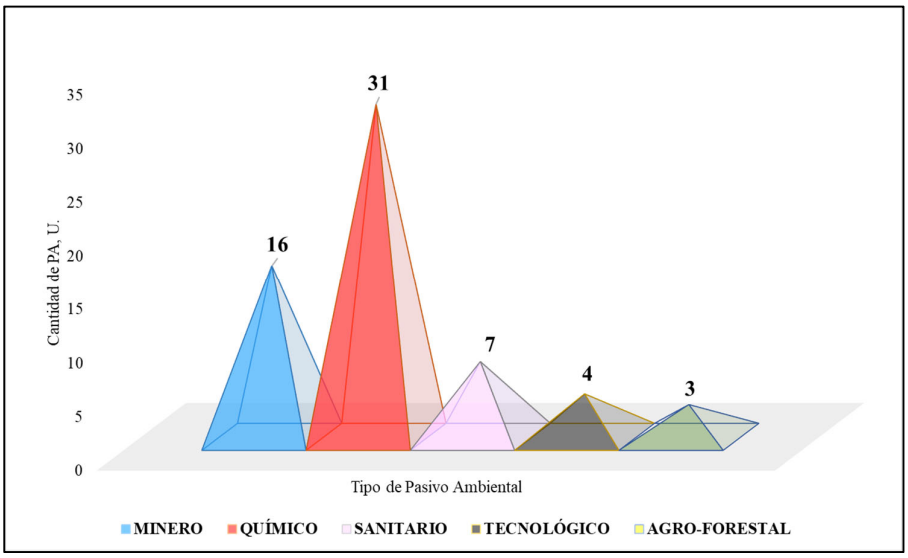

Figura 7. Inventario de pasivos ambientales según la naturaleza de la causa humana que lo genera (Bruguera et al. 2020)

La correlación espacial entre los 62 PA del inventario y el tipo de componente químico que lo componen: inorgánico, orgánico, biológico, ácido-base y ligno-celulósico, se asegura mediante superposición geográfica (figura 8). Se constata que el 94% de los PA (57), tienen una naturaleza inorgánica por los EPT que los caracterizan, provocado por la actividad económica principal de la región. En algunos casos, coincide la naturaleza del componente activo como inorgánico, ácido-base y biológico, como es el caso de los drenajes ácidos de la cantera Santa Lucía, del yacimiento Castellanos y de las escombreras de este proceso.

Como se aprecia, prevalecen los PA de composición inorgánica y ácido-base de acuerdo con la clasificación de Bruguera et al. (2020), donde el 94% de los pasivos ambientales del inventario, tienen una naturaleza inorgánica de los EPT que los caracterizan, por predominar los PAM y PAQ, condicionados por la actividad minero-metalúrgica desarrollada en la región.

A partir del inventario de los pasivos ambientales para la región de estudio Santa Lucía, se desarrollaron un total de 22 representaciones cartográficas, según los tipos de pasivos y los elementos biogeoambientales de interés para el SIG, logrando integrar toda la información geográficamente referenciada como resultado de todas las operaciones geoespaciales realizadas.

Del análisis de superposición espacial de los 62 pasivos ambientales, en particular los PAM y PAQ, con la red hidrográfica de la región (figura 9), se constata que los colectores finales de las escorrentías como transporte de contaminantes, tales como el DAM del yacimiento Santa Lucía y Castellanos, lo constituyen los embalses La Laguna y La Palma. Estos son afluentes del río Santa Lucía y Nombre de Dios, respectivamente, con los cuales se canalizan los escurrimientos ácidos hacia la zona costera, donde desembocan estas cuencas hidrográficas.

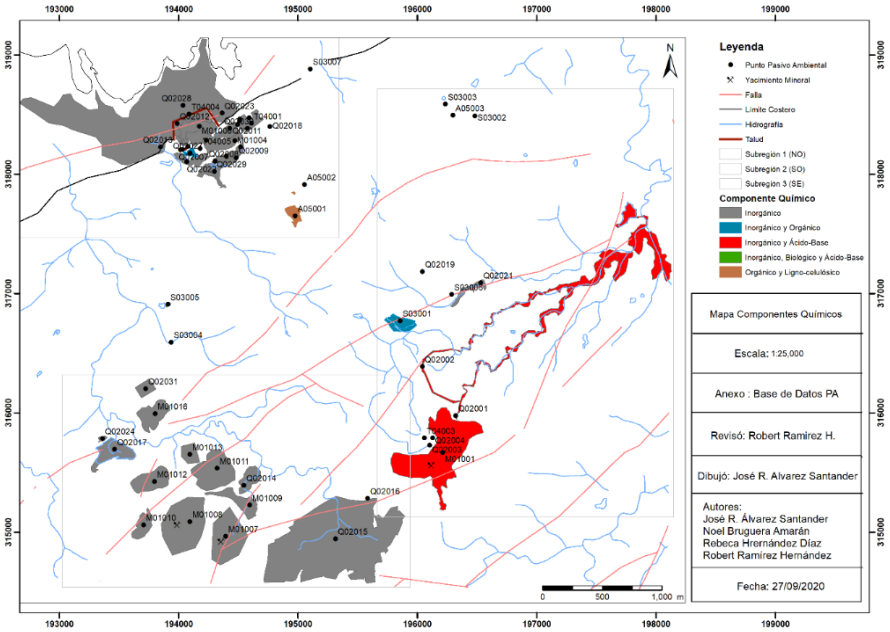

Figura 8. Mapa de correlación geoespacial de los PA del inventario con los componentes químicos activos que lo componen (Álvarez et al. 2020)

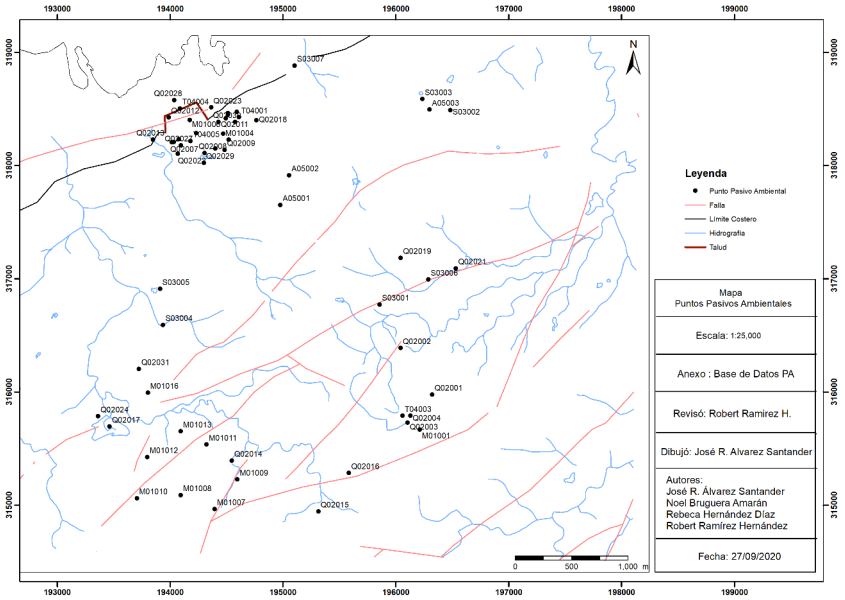

Figura 9. Mapa de ubicación de los puntos de los 62 PA con relación a la red hidrográfica y tectónica de la región de Santa Lucía (Álvarez et al. 2020)

Con ello, se genera un impacto del cuerpo receptor de contaminación química a ese sector costero del Consejo Popular La Sabana, en la zona de Malas Aguas, ubicado en el noreste de la región, para muestras de aguas del río Santa Lucía, lo que corrobora las investigaciones de Gallardo (2018). A partir del modelo digital del terreno (MDT) representado en la figura 3, los PAM identificados en el NO se encuentran en el primer intervalo de elevación enumerado entre 0 y 32 m sobre el nivel medio del mar, los que se corresponden con las zonas más bajas del terreno en posición perpendicular a la

línea de costa, facilitando el escurrimiento y la dispersión de los elementos contaminantes durante eventos de lluvia o vientos hacia la zona costera.

Ello es coherente con los resultados reportados por Gallardo (2018) en las determinaciones semicuantitativas en muestras de sedimentos del fondo marino y en manglar en esa porción costera. La autora señala un índice de acidez alto (pH) de 2,63 unidades en las tres muestras analizadas. Así como una concentración 1,21 mg/l de plomo, 2,48 mg/l de azufre total, 0,17 mg/l de hierro, con niveles altos para los exigidos por la NC: 521/2007 (ONN 2007 en Gallardo 2018).

La correlación del inventario de PA con las unidades geológicas representadas en la región de Santa Lucía se expone en la figura 10. El mayor número de pasivos ambientales del inventario de tipo PAQ y PAM, se concentran sobre la formación Esperanza y Santa Teresa para la subregión NO y para las restantes dos subregiones (SE y SO) se desarrollan sobre la unidad geológica Castellano. 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 más frágiles (humedales costeros e interiores). Esto facilita un mayor grado de dispersión de los elementos contaminantes de los PAQ y PAM en estas zonas más vulnerables.

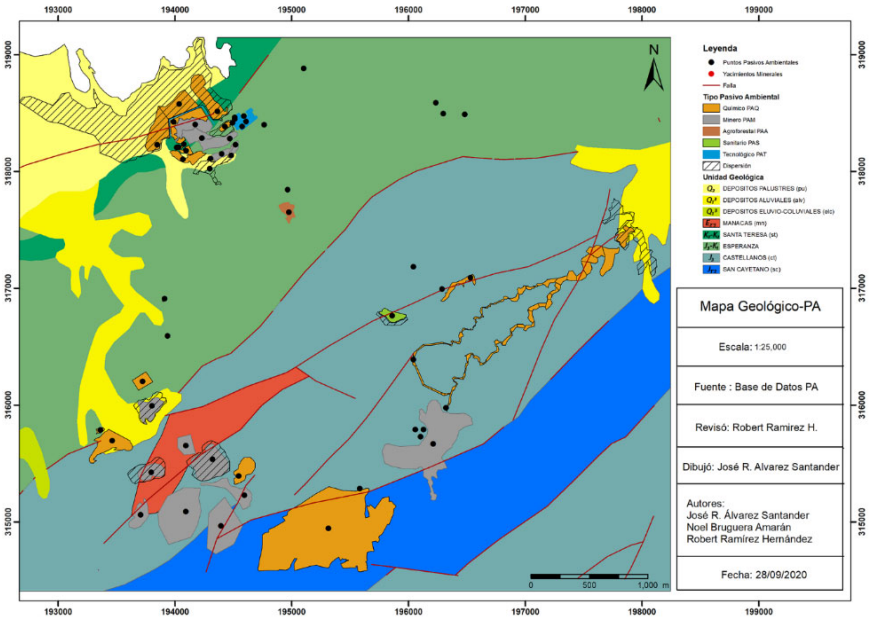

Figura 10. Mapa de correlación geoespacial de los PA del inventario con las unidades geológicas representadas en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía
(Álvarez et al. 2020)

Los 31 PAQ, se encuentran dispersos en las tres subregiones delimitadas para el área de estudio, representativos de extensos drenajes ácidos de minas (DAM), los amplios inventarios de productos químicos ociosos, caducos y otros desechos peligrosos, los que no disponen de soluciones de manejo adecuadas y por consiguiente impactan negativamente sobre los ecosistemas receptores de sus EPT. Los PA de naturaleza química (PAQ), se muestran en el mapa representado en la figura 11.

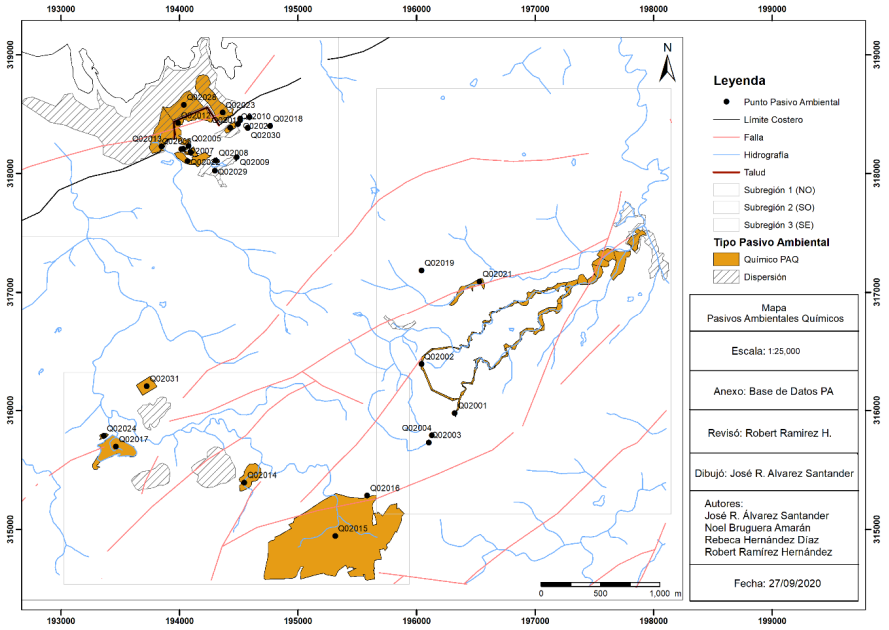

Figura 11. Mapa del inventario de PAQ para la región minero-metalúrgica de Santa Lucía (Álvarez et al. 2020)

En la porción noroeste de la región objeto de estudio, se encuentra ubicada la antigua planta de sulfometales y la concentración del mayor número de pasivos ambientales de los cinco tipos de PA de acuerdo con la naturaleza de la actividad antrópica que lo genera (PAM, PAQ, PAT, PAS y PAA), los que son generados por procesos precedentes y actuales, por consiguiente, constituye la subregión más comprometida de todo el escenario ambiental de Santa Lucía. Están representados todos los tipos de ecosistemas, acuático (marino y dulceacuícola), terrestre, mixto y artificial, reconocidos en la región.

Denota la interrelación continua en la zona costera de las aguas marítimas con los pasivos ambientales de mayor riesgo y peligrosidad de los registrados en el inventario, tales como cenizas de pirita tostada, escorias de plomo, azufre brillante, residuos de pentóxido de vanadio, arsénico y plomo; así como la descarga de altos caudales de aguas tratadas provenientes del proceso de flotación de plomo y zinc, de la actividad agropecuaria, forestal y portuaria y de los escurrimientos superficiales del asentamiento urbano de Santa Lucía.

Esta sabana inundada hacia donde ocurre la dispersión de estos elementos contaminantes se encuentra sobre la Formación Esperanza (J_3-K_1 es), la cual está representada por calizas carbonosas, así como variedades arenosas, limoarenosas silicificadas; las dolomitas y calizas dolomitizadas tienen escasa extensión. Las microbrechas calizo-areniscas y arenisco-calizas tienen una extensión limitada, como se muestra en la figura 12.

En esta zona, la interrelación de cuatro unidades litoestratigráficas proporciona información clave en la dinámica geológica del sector. El ambiente deposicional que identifica la zona es marino, lo que permite generar con más extensión las aureolas de dispersión química, provenientes de los pasivos registrados en esa subregión. Esta diferencia química por la acumulación de sedimentos se pone de manifiesto en la representación cartográfica del sector y tiene un área de extensión de 614 398,0 m^2, llegando alcanzar un radio de 3 km mar adentro hacia el golfo de Santa Lucía, a partir de la proyección espacial en la imagen satelital obtenida de SAS Planet.

El SIG que se obtiene, para la descripción geoespacial de los pasivos ambientales 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, socioeconómica, jurídica y tecnológica con enfoque integrado, ecosistémico, precautorio y de sostenibilidad.

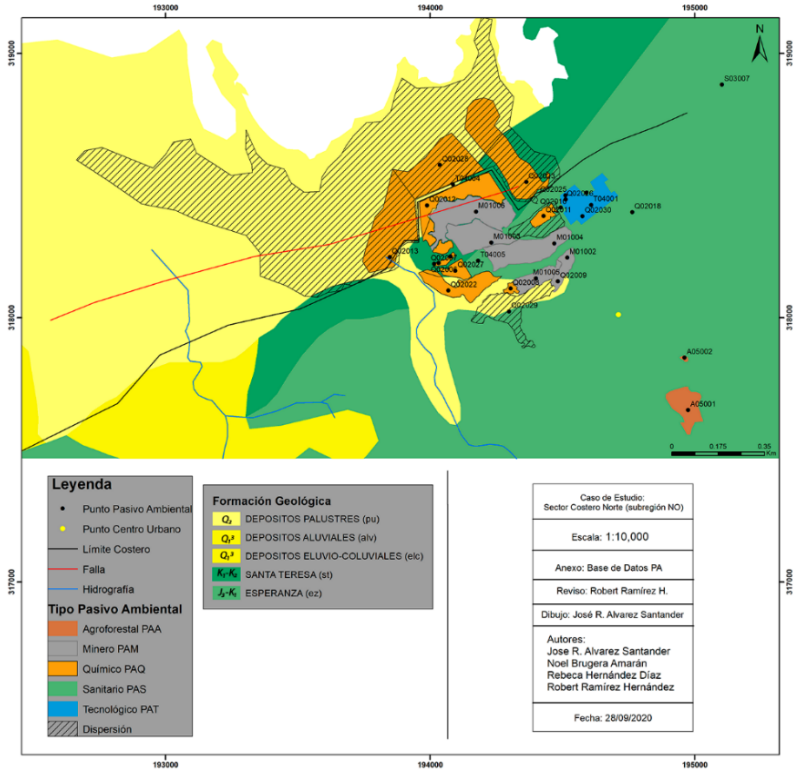

Figura 12. Modelo cartográfico integrado de los PA para la subregión NO de la región minero-metalúrgica de Santa Lucía (Álvarez et al. 2020)

Para ilustrar el alcance del Sistema de Información Geográfico (SIG) del inventario de los PA en la región de Santa Lucía, se muestran tres casos de pasivos ambientales (químico y minero) con códigos Q02013, M01001 y Q02015 (figura 13), de gran auxilio para las entidades administrativas y de gobierno en la gestión de los 62 PA inventariados.

Cada punto del mapa que identifica un tipo de PA, brinda la información de los 18 campos que componen el SIG del inventario de PA en la región objeto de estudio. En este ejemplo se representan: el PAQ-Q0201, depósito de lodos metálicos por neutralización de vertimiento en zona costera de las aguas de proceso EMINCAR S.A.; el PAM-M01001, cantera abierta del yacimiento Santa Lucía; y el PAQ-Q02015, presa de colas del proceso tecnológico de EMINCAR S.A. La herramienta obtenida permite a los decisores y a las entidades regulatorias ambientales y mineras realizar una gestión efectiva de los PA, principalmente de aquellos que comprometen los recursos hídricos de la zona.

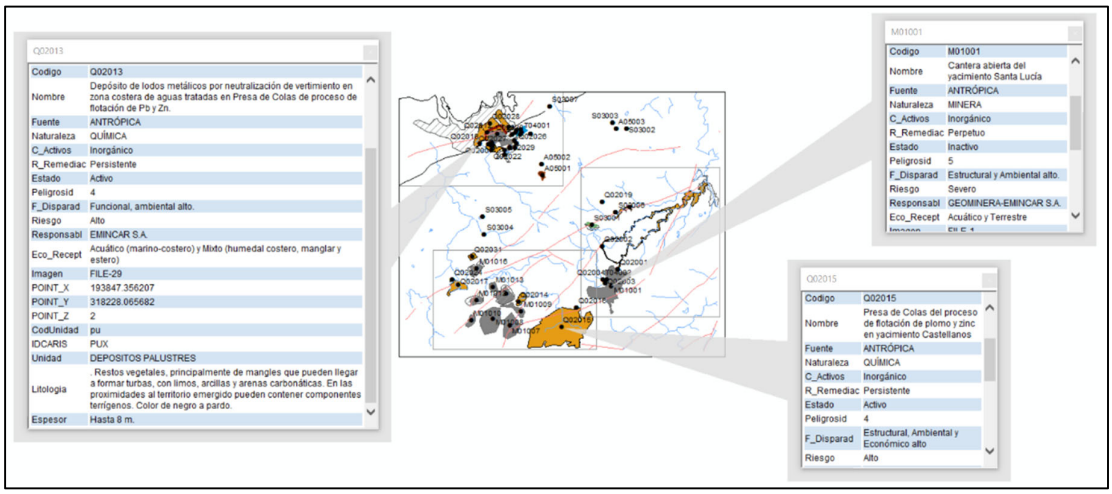

Figura 13. Representación del SIG del inventario de PA en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía (Álvarez et al. 2020)

02 CONCLUSIONES

Las herramientas y los modelos informáticos empleados en la investigación, como complemento de la experticia de los autores, permitieron la correlación del inventario de 62 pasivos ambientales en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía con las variables geología, tectónica, red hidrográfica y ecosistemas, mediante la obtención de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que corrobora los análisis precedentes sobre las fuentes generadoras de contaminación ambiental en la zona objeto de estudio. Este resultado favorece la evaluación ambiental y cartográfica del impacto de los PA sobre los ecosistemas y la red hidrográfica de la región de Santa Lucía.

La actualización de la red hidrográfica de la región de Santa Lucía contribuyó a establecer una correlación directa de los pasivos ambientales con la hidrografía de la zona. La incorporación de las unidades geológicas del área a la base de datos del SIG para los PA permitió establecer criterios científico-tecnológicos novedosos acerca de la dinámica de dispersión y del transporte de los elementos potencialmente tóxicos hacia los ecosistemas receptores.

03 REFERENCIAS

Alonso J. A., Pinto A., Cabrera I., Cozzi G., Gallardo D., Valdivia G. y Díaz A. (2011). "Informe de proyecto I-D (CODIGO: 62029) Principales asociaciones mineralógicas de elementos contaminantes presentes en residuales de la industria minero – metalúrgica, segunda etapa". Ministerio de Energía y Minas, Cuba. 92 pp.

Álvarez J.R., Bruguera N. y Hernández R. (2020). "Modelo cartográfico integrado de los pasivos ambientales en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba". Trabajo de Diploma de Ingeniería Geológica. Dpto. de Geología, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Pinar del Río. 100 pp.

ASGMI (Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos) (2010). "Pasivos Ambientales Mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas". Barquisimeto. Venezuela. 37 pp.

Bruguera N., Gallardo D. y Díaz-Duque J. A. (2020). "Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba". Avances. 22(3), pp. 469-490. ISSN 1562-3297. Extraído de http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/560/1627.

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: SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA. IV Congreso Cubano de Minería. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Palacio de Convenciones. La Habana.

Fuentes R.I., Iturralde M. A. y Hernández A. (2013). "Pasivos Ambientales Mineros y aguas subterráneas en la provincia de Matanzas. Estudio de caso. Cantera Vizcaya". Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, 14(2), pp. 170-178. La Habana, Cuba. ISSN: 1729-3790.

Gallardo D., Bruguera N., Díaz-Duque J. A. y Cabrera I. (2015). "Impacto provocado por la minería en la zona de Santa Lucía, evaluación fisicoquímica". Revista Minería y Geología, 31(4), pp. 100-120. ISSN: 1993-8012.

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 de Doctorado en Ciencias Técnicas. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Pinar del Río, Cuba. 100 pp.

Gallardo, D.; Bruguera, N. Díaz-Duque J. A. y Cabrera I. (2020). "Drenaje ácido de minas y su influencia en ecosistemas asociados al yacimiento Santa Lucía, Cuba". Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad. Vol. 3 No. 2, julio-diciembre, pp. 67-81. Ecuador. ISSN: 2697-3510. DOI: https://doi.org/10.46380/rias.v3i2.79.

Milián E. (2015). "Procedimiento para la rehabilitación minera ambiental para los yacimientos polimetálicos de Pinar del Río". Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Moa, Holguín, Cuba. 100 pp.

Montenegro S. (2013). "Pasivos Ambientales Mineros: De quién es la responsabilidad". 1er Evento Catastrófico de la Minería Chilena. Centro de Derecho Ambiental y del Magister de Derecho Ambiental. Facultad de Derecho, Universidad de Chile. 44 pp.

Olaya V. (2020)**.** "Sistemas de Información Geográfica. Creative Common". Atribución en www.creativecommons.org. Extraído de http://volaya.github.io/libro-sig/. 642 pp. España. ISBN: 978-1-71677-766-0.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

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

Ejerció como investigador principal del trabajo que se resume en el resultado científico – tecnológico que se presenta. Coordinó y participó 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 https://orcid.org/0000-0003-0032-4681

Brindó las bases para el marco teórico de la investigación. Incidió decisivamente en la nueva clasificación y definición de los pasivos ambientales. Incidió decisivamente 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 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 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 Ramirez Hernández 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 computaciones para el desarrollo del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Damaris Gallardo Martínez 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.