

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE ZONAS CON POTENCIAL DE GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA CUENCA MANGOSIZA, PROVINCIA MORONA SANTIAGO, MEDIANTE SIG

PRELIMINARY HYDROGEOLOGICAL ASSESSMENT OF THE POTENTIAL FOR GENERATION AND TRANSPORT OF ACID MINE DRAINAGE IN THE MANGOSIZA BASIN, MORONA SANTIAGO PROVINCE, USING GIS

Solange Fiallos Ayala¹, Santiago Toapanta², Natalia Lindao³, Jean Carlos Farez⁴

{solange.fiallos@esPOCH.edu.ec¹, santiago.toapanta@esPOCH.edu.ec², carmen.lindao@esPOCH.edu.ec³, jean.farez@esPOCH.edu.ec⁴}

Fecha de recepción: 12/05/2026 / Fecha de aceptación: 18/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: El drenaje ácido de mina (AMD) constituye uno de los principales problemas ambientales asociados a la minería metálica debido a la oxidación de minerales sulfurados expuestos al agua y al oxígeno, generando soluciones ácidas capaces de movilizar metales contaminantes hacia aguas superficiales y subterráneas. En Ecuador, el incremento de actividades mineras metálicas en regiones amazónicas ha generado la necesidad de desarrollar evaluaciones hidroambientales preliminares orientadas a identificar zonas con mayor susceptibilidad frente a procesos potenciales de contaminación. La provincia de Morona Santiago presenta importantes concesiones mineras metálicas y actividades de minería aluvial, además de condiciones hidroclimáticas caracterizadas por elevadas precipitaciones y alta conectividad hídrica. El presente estudio tuvo como objetivo identificar preliminarmente zonas con potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina en la cuenca Mangosiza mediante la integración de variables geológicas, climáticas, topográficas e hidrogeológicas en un entorno SIG. La metodología se desarrolló mediante análisis espacial multicriterio utilizando ArcGIS, integrando variables de litología, precipitación, densidad de drenaje, pendiente y

¹Carrera de Minas Sede Morona Santiago, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0000-9801-2373>; +593 992595418.

²Carrera de Minas Sede Morona Santiago, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-4378-3821>; +593 999264576.

³Carrera de Minas Sede Morona Santiago, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0009-6303-6565>; +593 994706420.

⁴Carrera de Minas Sede Morona Santiago, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0002-9367-9923>; +593 989287048.

concesiones mineras metálicas. Cada variable fue reclasificada en tres niveles relativos de susceptibilidad y posteriormente integrada mediante álgebra de mapas. Los resultados permitieron obtener un modelo espacial con valores entre 1.35 y 2.8, identificando zonas de bajo, medio y alto potencial hidrogeológico de generación y transporte de AMD. Las áreas de mayor susceptibilidad se asociaron principalmente con elevada precipitación, mayor densidad de drenaje, presencia de concesiones mineras y unidades litológicas pertenecientes a las formaciones Napo y Arajuno. El modelo desarrollado constituye una herramienta preliminar útil para priorizar futuras investigaciones hidrogeoquímicas y programas de monitoreo ambiental en la cuenca Mangosiza.

Palabras clave: Drenaje ácido de mina; hidrogeología; geología; ambiente; SIG; Morona Santiago; minería

ABSTRACT: Acid mine drainage (AMD) is one of the main environmental problems associated with metallic mining due to the oxidation of sulfide minerals exposed to water and oxygen, generating acidic solutions capable of mobilizing contaminating metals into surface and groundwater systems. In Ecuador, the increase in metallic mining activities in Amazonian regions has created the need to develop preliminary hydroenvironmental assessments aimed at identifying areas with greater susceptibility to potential contamination processes. Morona Santiago province presents important metallic mining concessions and alluvial mining activities, in addition to hydroclimatic conditions characterized by high precipitation and strong hydrological connectivity. The aim of this study was to preliminarily identify areas with potential for the generation and transport of acid mine drainage in the Mangosiza basin through the integration of geological, climatic, topographic, and hydrogeological variables within a GIS environment. The methodology was developed using multicriteria spatial analysis in ArcGIS, integrating lithology, precipitation, drainage density, slope, and metallic mining concessions. Each variable was reclassified into three relative susceptibility levels and subsequently integrated using map algebra. The results produced a spatial model ranging from 1.35 to 2.8, identifying areas with low, medium, and high hydrogeological potential for AMD generation and transport. The highest susceptibility areas were mainly associated with high precipitation, greater drainage density, mining concessions, and lithological units corresponding to the Napo and Arajuno formations. The developed model constitutes a preliminary tool useful for prioritizing future hydrogeochemical investigations and environmental monitoring programs in the Mangosiza basin.

Keywords: Acid mine drainage; hydrogeology; environmental susceptibility; GIS; Morona Santiago; metallic mining

INTRODUCCIÓN

El drenaje ácido de mina (AMD, por sus siglas en inglés) representa uno de los principales impactos ambientales asociados a la minería metálica debido a la oxidación de minerales sulfurados expuestos al agua y al oxígeno (1)(2). Este proceso genera soluciones ácidas capaces

de movilizar metales potencialmente contaminantes, afectando tanto aguas superficiales como subterráneas (3,4).

Diversos estudios han demostrado que la formación y movilidad del AMD dependen principalmente de factores geológicos, climáticos e hidrogeomorfológicos, incluyendo litología, precipitación, conectividad hídrica y características topográficas (5,6). En regiones tropicales como la Amazonía se caracteriza por elevadas precipitaciones, los procesos de lixiviación, infiltración y transporte de contaminantes pueden intensificarse considerablemente (7,8).

En Ecuador, el desarrollo de proyectos mineros metálicos ha incrementado durante las últimas décadas, existen importantes recursos minerales asociadas principalmente a cobre, oro y plata. La minería metálica en ambientes tropicales húmedos puede incrementar el riesgo de generación de drenaje ácido de mina debido a las condiciones climáticas favorables para procesos de oxidación, lixiviación y transporte de contaminantes.

La provincia de Morona Santiago presenta un importante potencial minero asociado a concesiones metálicas distribuidas en diferentes sectores de la Cordillera del Cóndor y la Cuenca Oriente ecuatoriana (9). Así mismo, en la región se desarrollan proyectos mineros estratégicos de gran escala, como el proyecto Mirador, localizado en la provincia vecina de Zamora Chinchipe, el cual constituye uno de los principales proyectos de explotación de cobre a cielo abierto del Ecuador. La cercanía regional de este tipo de proyectos evidencia el creciente desarrollo de la actividad minera metálica en el suroriente ecuatoriano y la necesidad de fortalecer evaluaciones hidroambientales preventivas. Adicionalmente, en diferentes sectores de la provincia de Morona Santiago también se desarrollan actividades relacionadas con minería aluvial, principalmente asociadas a explotación de materiales auríferos en cauces y terrazas fluviales. Dentro de este contexto, la cuenca Mangosiza representa una zona de interés hidroambiental debido a la presencia de concesiones mineras metálicas y condiciones hidrogeológicas favorables para procesos de infiltración, escorrentía y transporte de lixiviados. La combinación de litologías sedimentarias, elevada precipitación y conectividad hídrica puede favorecer procesos potenciales de alteración geoquímica asociados al drenaje ácido de mina.

El problema ambiental relacionado con el drenaje ácido de mina no se limita únicamente a la generación de soluciones ácidas, sino también al posible transporte de metales y compuestos disueltos hacia cuerpos hídricos superficiales y subterráneos, afectando la calidad del agua y ecosistemas acuáticos. En regiones amazónicas, donde la disponibilidad hídrica y la conectividad fluvial son elevadas, estos procesos pueden extenderse espacialmente y generar impacto. Por ello, resulta necesario desarrollar herramientas preliminares de evaluación espacial que permitan identificar sectores con mayor susceptibilidad hidrogeológica antes del desarrollo de actividades extractivas.

La aplicación de modelos multicriterio mediante Sistemas de Información Geográfica constituye una alternativa eficiente para integrar variables ambientales y generar aproximaciones espaciales orientadas a la gestión y monitoreo ambiental. La evaluación preliminar de susceptibilidad al AMD mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una herramienta ampliamente utilizada para integrar variables geológicas y ambientales, y generar modelos espaciales de riesgo

(10). El uso de análisis multicriterio permite combinar información geológica, climática e hidrogeológica mediante técnicas de álgebra de mapas y ponderación relativa (11–13). Este tipo de metodología resulta especialmente útil en regiones donde existe limitada información.

En estudios previos, diferentes autores han utilizado variables como litología, precipitación, pendiente, densidad de drenaje y actividad minera para evaluar susceptibilidad hidroambiental relacionada con procesos mineros (14–17). Asimismo, herramientas SIG han sido ampliamente utilizadas en estudios de vulnerabilidad hidrogeológica y evaluación espacial de contaminación (15).

La presente investigación tuvo como objetivo identificar preliminarmente zonas con potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina en la cuenca Mangosiza, Provincia de Morona Santiago, Ecuador; mediante la integración de variables geológicas, climáticas, topográficas e hidrogeológicas en un entorno SIG. El estudio busca generar una aproximación espacial preliminar que permita priorizar futuras investigaciones hidrogeoquímicas y programas de monitoreo ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La subcuenca Mangosiza de la cuenca del Río Morona se localiza en la provincia de Morona Santiago, Ecuador. La zona presenta ambientes tropicales húmedos, con precipitaciones elevadas y una red hidrográfica altamente desarrollada. Geológicamente, la cuenca está compuesta principalmente por formaciones del Jurásico hasta el cuaternario de la Cuenca Oriente (Figura 1).

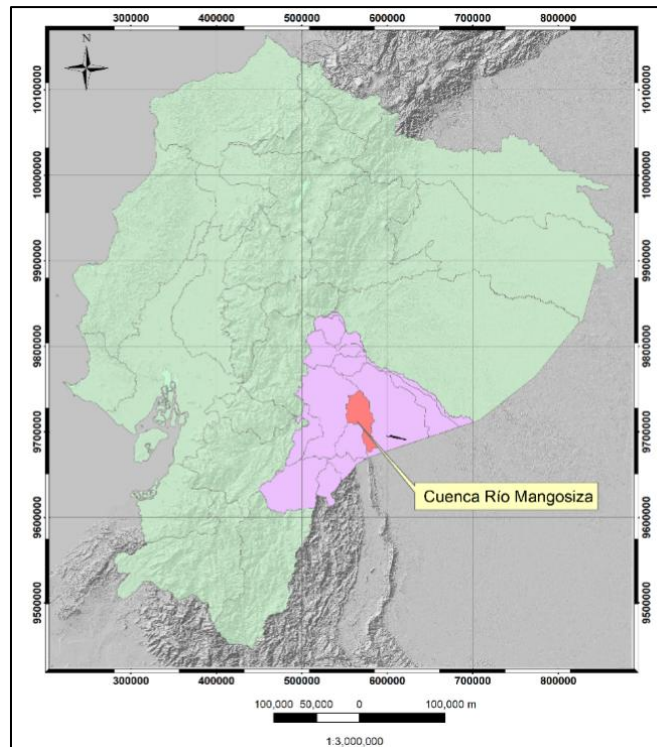


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca Río Mangosiza

Fuente: Propia

La investigación se desarrolló mediante un análisis espacial multicriterio utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) en ArcGIS. La metodología integró variables relacionadas con la generación y transporte potencial de drenaje ácido de mina. Cada variable fue reclasificada en tres niveles relativos de susceptibilidad: baja (1), media (2) y alta (3).

Las variables consideradas fueron:

1. Geología
2. Precipitación
3. Densidad de drenaje
4. Pendiente
5. Concesiones mineras metálicas

Con el fin de garantizar la compatibilidad geométrica entre las capas temáticas utilizadas en el álgebra de mapas, todas las variables fueron normalizadas y convertidas a formato raster utilizando un tamaño de celda uniforme de 150 m mediante procesos de resampling o remuestreo. Este procedimiento permitió homogenizar la resolución espacial de las capas provenientes de diferentes fuentes cartográficas y asegurar la coincidencia geométrica durante el análisis espacial multicriterio

1. Geología

La información geológica fue obtenida a partir de mapas geológicos de la República del Ecuador correspondientes al año 2017. Las unidades litológicas fueron clasificadas considerando sus características geológicas e hidrogeológicas potenciales **Tabla 1. Clasificación de la litología** (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de la litología

Criterio	Valor
Bajo potencial	1
Potencial medio	2
Alto Potencial	3

Fuente: Propia

2. Concesiones mineras

Las concesiones mineras metálicas fueron incorporadas como indicador espacial de influencia minera potencial, fueron obtenidas del catastro minero de la Agencia de Regulación y Control Minero. Se utilizaron las categorías de concesiones inscritas y concesiones en trámite (Tabla 2). Las concesiones inscritas fueron consideradas de mayor susceptibilidad debido a la mayor probabilidad de intervención y exposición de materiales geológicos.

Tabla 2. Clasificación empleada para las concesiones mineras.

Criterio	Valor
Sin concesión	1
Concesión en trámite	2
Concesión inscrita	3

Fuente: Propia

3. Pendiente

La pendiente fue derivada a partir de un Modelo Digital de Elevación utilizando herramientas de análisis espacial en ArcGIS. La clasificación se realizó considerando su influencia en los procesos de escorrentía y transporte potencial de lixiviados (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación para las pendientes

Criterio	Valor
Plana-suave (0-12 %)	1
Media-Fuerte (12-40%)	2
Fuerte (>40%)	3

Fuente: Modificado de Memoria Técnica, Instituto Espacial Ecuatoriano (2013)

4. Precipitación

La precipitación media anual fue obtenida a partir de la base de datos climática WorldClim versión 2.1 correspondiente al período 1970–2000, con resolución espacial original de 30 segundos (~1 km). (18). Los valores registrados en la cuenca variaron entre 1969 y 2942 mm/año (Tabla 4). La reclasificación mediante cuantiles fue:

Tabla 4. Clasificación para la precipitación

Criterio (mm/año)	Valor
1969–2378	1
2378–2621	2
2621–2942	3

Fuente: Propia

5. Densidad de drenaje

La red hidrográfica fue derivada a partir del Modelo Digital de Elevación mediante herramientas hidrológicas de dirección y acumulación de flujo. Posteriormente se calculó la densidad de drenaje mediante análisis de densidad lineal (Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación para la precipitación

Criterio (mm/año)	Valor
0 – 0.616	1
0.616 – 1.232	2
1.232 – 1.848	3

Fuente: Propia

Zonificación (Modelo multicriterio)

El modelo multicriterio fue desarrollado mediante álgebra de mapas utilizando ponderaciones relativas asignadas según la influencia hidrogeológica de cada variable sobre el potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina.

La litología recibió la mayor ponderación (35 %) debido a que constituye el principal factor de control geoquímico e hidrogeológico relacionado con la susceptibilidad a procesos de alteración y movilización de compuestos asociados al AMD. Las características litológicas y sedimentológicas influyen directamente sobre la permeabilidad relativa, interacción agua-roca y presencia de materiales orgánicos y ambientes reductores dentro de las unidades geológicas.

La precipitación recibió una ponderación de 25 % por su influencia sobre los procesos de oxidación, infiltración, lixiviación y movilización de contaminantes, particularmente en ambientes

tropicales húmedos caracterizados por elevada disponibilidad hídrica como es la zona de estudio. Por otra parte, la densidad de drenaje fue ponderada con 20% por su relación con la conectividad hídrica superficial y el potencial transporte de lixiviados.

Por el contrario, la pendiente y las concesiones mineras recibieron ponderaciones menores (10 % cada una) debido a que representan factores condicionantes y no controladores directos de los procesos geoquímicos asociados al drenaje ácido de mina. La pendiente influye principalmente sobre la escorrentía superficial y dinámica de transporte, mientras que las concesiones mineras constituyen un indicador espacial de influencia minera potencial, sin representar necesariamente actividad extractiva activa o generación directa de AMD.

Las variables fueron integradas mediante álgebra de mapas utilizando la expresión (1):

$$AMD = (Litología * 0.35) + (Precipitación * 0.25) + (Drenaje * 0.20) + (Pendiente * 0.10) + (Concesiones * 0.10) \quad (1)$$

RESULTADOS

Geología

La geología de la cuenca Mangosiza corresponde principalmente a unidades sedimentarias pertenecientes a la Cuenca Oriente ecuatoriana, caracterizada por secuencias clásticas y carbonatadas desarrolladas desde el Cretácico hasta el Cenozoico(19). Estas unidades presentan variaciones litológicas que influyen en el comportamiento hidrogeológico, permeabilidad relativa y susceptibilidad hidrogeoquímica frente a procesos potenciales asociados al drenaje ácido de mina.

La Formación Mera está constituida por arenas y conglomerados, por lo que fue clasificada con susceptibilidad baja-media debido a su litología. La Formación Chambira presenta areniscas, lutitas y tobas volcánicas, siendo clasificada con susceptibilidad media por la presencia de materiales finos.

La Formación Arajuno del Mioceno, está compuesta por la presencia de arcillas, areniscas y niveles de lignito, materiales asociados a ambientes sedimentarios reductores y potencial alteración geoquímica por ello fue considerada con susceptibilidad alta. De igual manera, la Formación Chalcana (Oligoceno), conformada por lutitas rojas y yesos, fue clasificada con susceptibilidad media debido a la presencia de materiales finos y evaporíticos.

Las formaciones Tiyuyacu y Tena fueron clasificadas con susceptibilidad media por su litología sedimentaria, es importante mencionar que la formación Tena en cuanto a sus características hidrogeológicas es considerada una unidad con baja permeabilidad.

La Formación Napo (Cretácico), constituida por calizas, lutitas negras y arenisca, fue clasificada con susceptibilidad alta debido a la presencia materia orgánica, características asociadas a ambientes sedimentarios reductores dentro de la Cuenca Oriente.

La Formación Hollín (Cretácico), compuesta principalmente por areniscas y cuarcitas, fue clasificada con susceptibilidad medio-alta debido a su elevada permeabilidad relativa y capacidad potencial de transporte de lixiviados. Diversos estudios hidrogeológicos en la Cuenca Oriente destacan la importancia de esta formación como unidad permeable y reservorio sedimentario (19,20).

Finalmente, la Formación Santiago (Jurásico), nombrada por Goldschmid (1941), aflora en la Cordillera de Cutucú. Está constituida por sedimentos marinos ricos en materia orgánica como calizas y lutitas (21), fue clasificada con susceptibilidad media debido a la combinación de materiales carbonatados y sedimentarios finos que podrían influir sobre procesos hidrogeoquímicos y circulación hídrica local (Tabla 6).

Tabla 6. Litología de la cuenca y su valor

Formación	Litología	Potencial AMD	Valor
Fm. Mera	Arenas/conglomerados	Bajo-Medio	1
Fm. Chambira	Areniscas/lutitas/tobas	Medio	2
Fm. Arajuno	Arcillas/areniscas/lignito	Alto	3
Fm. Chalcana	Lutitas rojas/yeso	Medio	2
Fm. Tiyuyacu	Conglomerados/areniscas	Medio	2
Fm. Tena	Lutitas y capas rojas	Medio	2
Fm. Napo	Lutitas, calizas negras	Alto	3
Fm. Hollín	Areniscas y cuarcitas	Medio-Alto	2
Fm. Santiago	Calizas, lutitas	Medio	2

La distribución espacial de las unidades clasificadas con mayor susceptibilidad mostró una asociación importante con sectores de interés minero y áreas de mayor conectividad hídrica. Esto evidencia la importancia de integrar criterios geológicos e hidrogeológicos dentro de modelos espaciales preliminares de susceptibilidad.

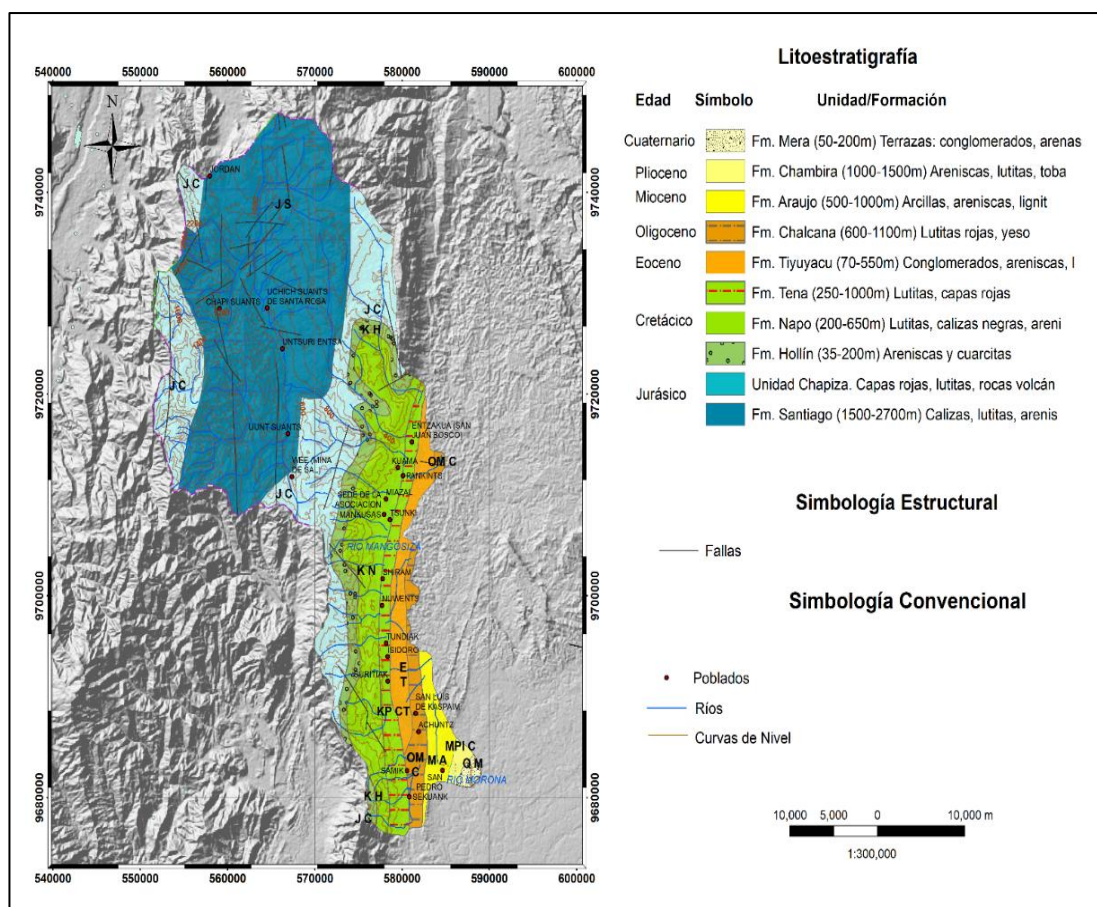


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca Río Mangosiza

Fuente: Propia

Concesiones mineras

El análisis espacial de las concesiones mineras metálicas evidenció una importante distribución de áreas concesionadas dentro de la cuenca Mangosiza. Las concesiones inscritas fueron clasificadas con mayor nivel de susceptibilidad debido a la mayor probabilidad de exploración, intervención y exposición de materiales geológicos.

Las áreas concesionadas se localizaron principalmente en sectores donde coinciden unidades litológicas con susceptibilidad media y alta, lo que incrementa el potencial hidroambiental relacionado con procesos de alteración y movilización de compuestos geoquímicos.

La incorporación de concesiones mineras dentro del modelo multicriterio permitió representar espacialmente la presión minera potencial sobre la cuenca (Figura 3).

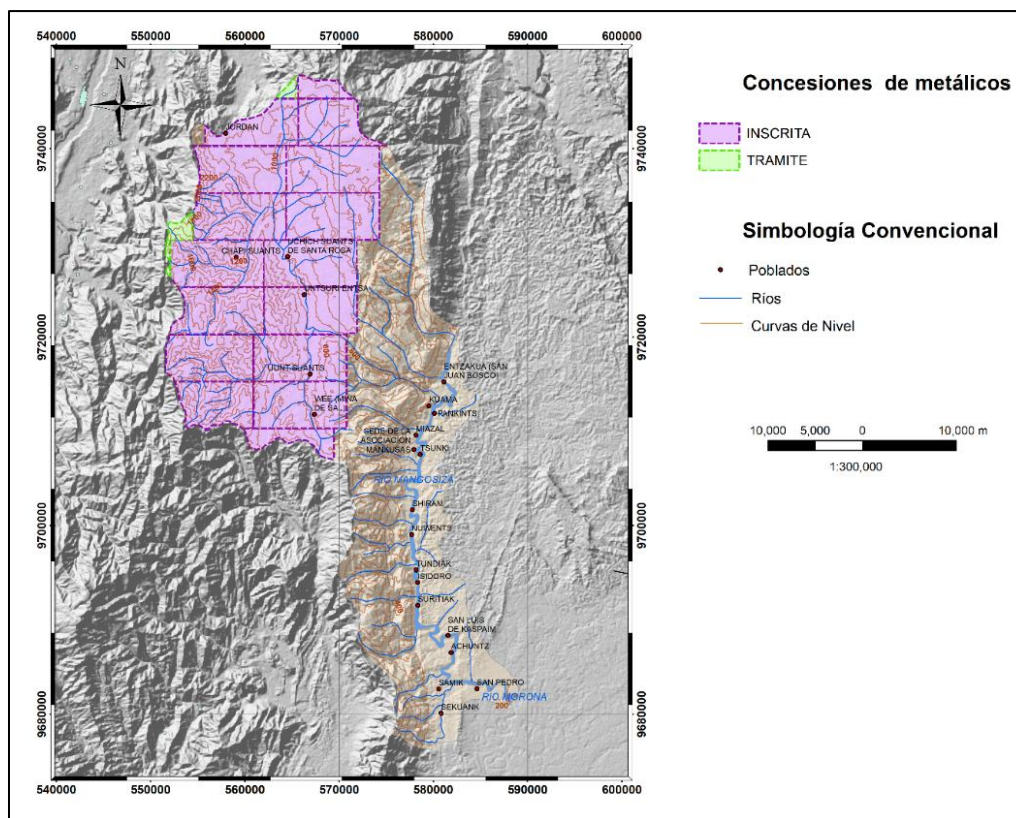


Figura 3. Distribución espacial de concesiones mineras metálicas en la cuenca Mangosiza

Fuente: Propia

Pendientes

La pendiente presentó influencia espacial relacionada con procesos de escorrentía superficial y transporte potencial de lixiviados. Los sectores con pendientes superiores al 40 % fueron clasificados con alta susceptibilidad debido a la mayor energía hidráulica y capacidad de transporte.

Las áreas con pendientes moderadas a fuertes se distribuyeron principalmente hacia sectores de relieve montañoso y zonas de transición geomorfológica. Estas condiciones favorecen la conectividad hidrológica y la movilización superficial de materiales potencialmente contaminantes. Los sectores con pendientes bajas presentaron menor susceptibilidad relativa debido a menores velocidades de escorrentía y menor capacidad de transporte superficial (Figura 4).

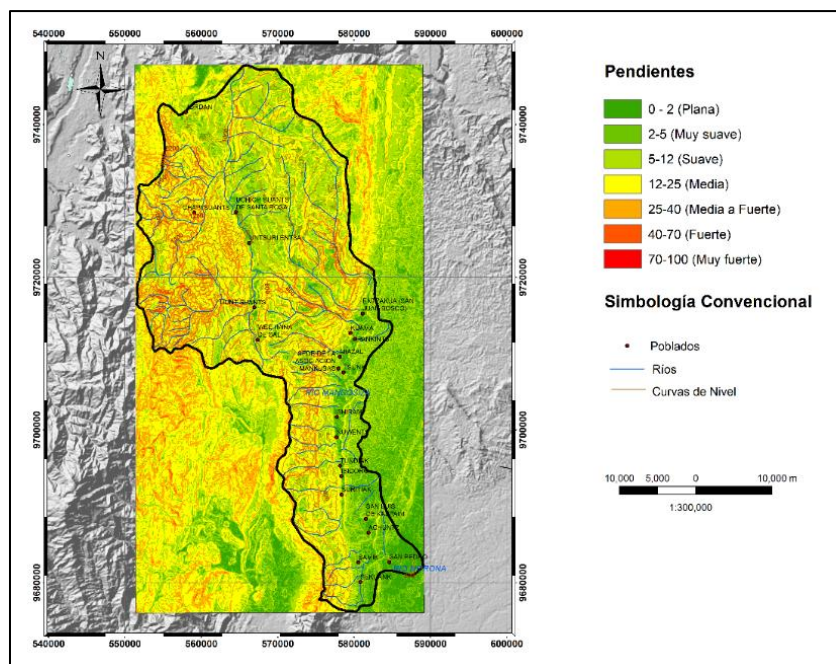


Figura 4. Clasificación de pendientes

Fuente: Propia

Precipitación

La precipitación media anual en la cuenca Mangosiza presentó valores entre 1969 y 2942 mm/año, evidenciando condiciones hidroclimáticas características de ambientes tropicales húmedos. Los sectores con mayores precipitaciones fueron clasificados con alta susceptibilidad debido a la influencia de la disponibilidad hídrica sobre los procesos de oxidación, infiltración y lixiviación.

El análisis espacial mostró que las zonas con precipitaciones elevadas coinciden parcialmente con sectores concesionados y áreas de mayor conectividad hídrica. Esta interacción incrementa el potencial de movilización de compuestos asociados al drenaje ácido de mina. Las áreas clasificadas con precipitación alta se localizaron principalmente en sectores orientales (Figura 5).

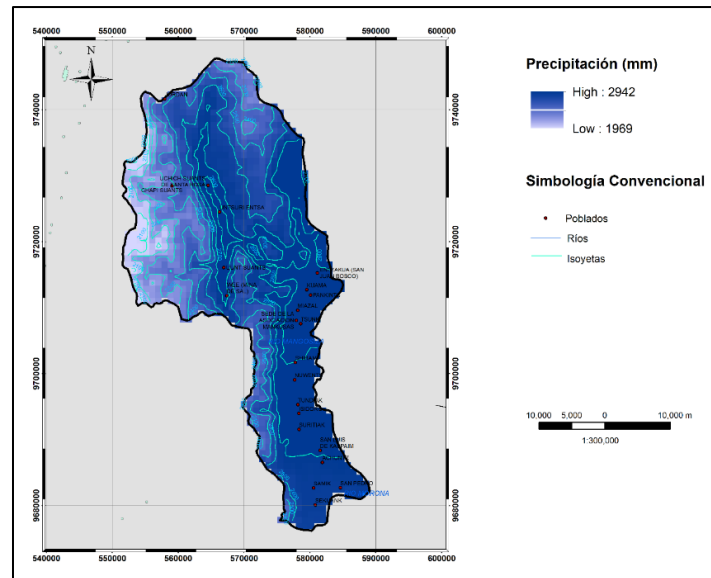


Figura 5. Distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca Mangosiza

Fuente: Propia

Densidad de Drenaje

La densidad de drenaje permitió identificar sectores con mayor conectividad hídrica y potencial transporte de lixiviados. Los valores más altos se asociaron principalmente con zonas de relieve moderado a fuerte y áreas de mayor desarrollo hidrográfico.

Los sectores clasificados con alta densidad de drenaje representan áreas donde los procesos de transporte superficial pueden intensificarse, favoreciendo la movilización de compuestos asociados al drenaje ácido de mina hacia cuerpos hídricos superficiales.

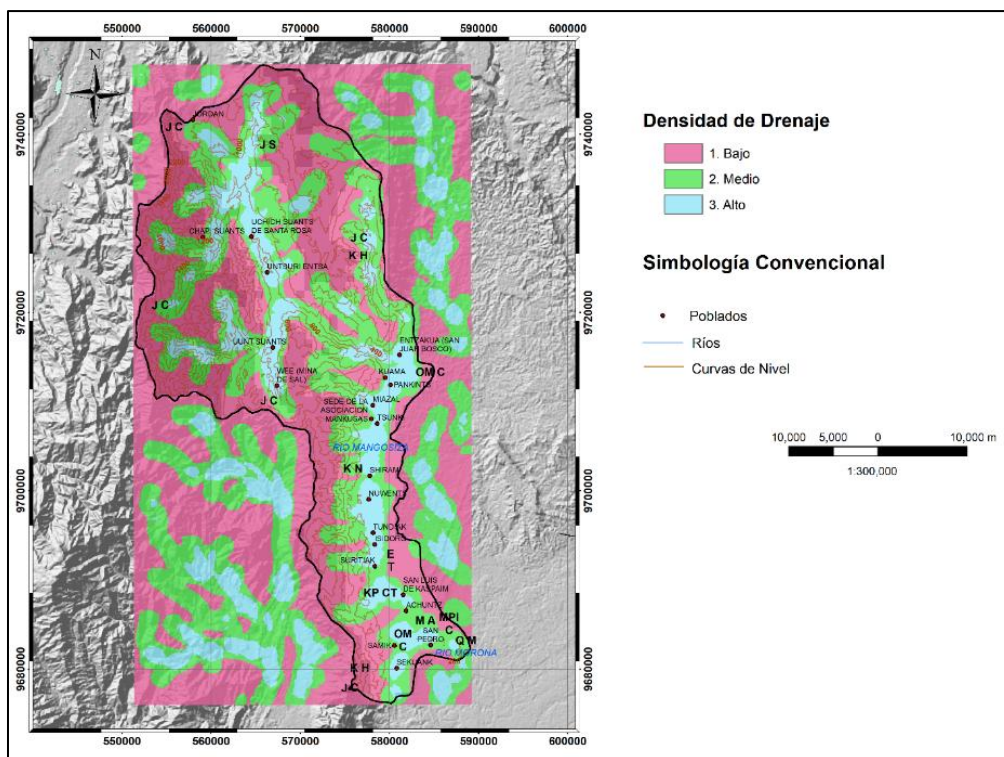


Figura 6. Densidad de drenaje derivada del Modelo Digital de Elevación

Fuente: Propia

Modelo de la zonificación

El modelo multicriterio permitió identificar zonas con diferente susceptibilidad hidrogeológica al potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina en la cuenca Mangosiza.

Los valores obtenidos variaron entre 1.35 y 2.8, permitiendo diferenciar áreas de bajo, medio y alto potencial. Las zonas de mayor susceptibilidad se localizaron principalmente en sectores asociados a elevada precipitación, mayor densidad de drenaje, presencia de concesiones mineras metálicas y unidades litológicas con mayor susceptibilidad hidrogeoquímica.

Las áreas clasificadas con susceptibilidad alta se asociaron principalmente a sectores relacionados con las formaciones Napo y Arajuno, las cuales presentan características litológicas y geoquímicas favorables para procesos potenciales de alteración y movilización de compuestos asociados al AMD.

La precipitación mostró una importante influencia espacial en el modelo debido a la elevada disponibilidad hídrica presente en la cuenca. Asimismo, la densidad de drenaje permitió identificar zonas con mayor conectividad hídrica y potencial transporte de lixiviados.

La pendiente permitió diferenciar sectores con mayor susceptibilidad a procesos de escorrentía superficial y movilización de contaminantes, particularmente en áreas de relieve moderado a fuerte.

El análisis cuantitativo del modelo permitió determinar que el 31.03 % de la cuenca Mangosiza, equivalente a 389.49 km², presenta susceptibilidad alta al potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina. Por otra parte, el 36.26 % de la cuenca (455.16 km²) corresponde a susceptibilidad media, mientras que el 32.71 % (410.50 km²) presenta susceptibilidad baja. Estos resultados permiten complementar la interpretación espacial del modelo multicriterio mediante indicadores métricos y comparables, facilitando la priorización de sectores para futuros estudios hidrogeoquímicos y programas de monitoreo ambiental (Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación cuantitativa de susceptibilidad hidrogeológica al potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina en la cuenca Mangosiza

Categoría de susceptibilidad	Valor	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Baja	1	410.50	32.71
Media	2	455.16	36.26
Alta	3	389.49	31.03
Total	—	1255.15	100

Interpretación hidrogeológica del modelo

El modelo final permitió diferenciar espacialmente zonas de bajo, medio y alto potencial hidrogeológico de generación y transporte de drenaje ácido de mina. Las áreas clasificadas con mayor susceptibilidad presentaron una relación importante con sectores de elevada precipitación, mayor densidad de drenaje y presencia de concesiones mineras.

Las unidades litológicas clasificadas con mayor susceptibilidad hidrogeoquímica mostraron además una relación espacial con sectores de mayor conectividad hídrica, lo cual incrementa el potencial de movilización de lixiviados.

Los valores finales obtenidos entre 1.35 y 2.8 evidencian un comportamiento espacial heterogéneo dentro de la cuenca Mangosiza, permitiendo identificar zonas prioritarias para futuros estudios hidrogeoquímicos y monitoreo ambiental.

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE ZONAS CON POTENCIAL DE GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA CUENCA MANGOSIZA, PROVINCIA MORONA SANTIAGO, MEDIANTE SIG

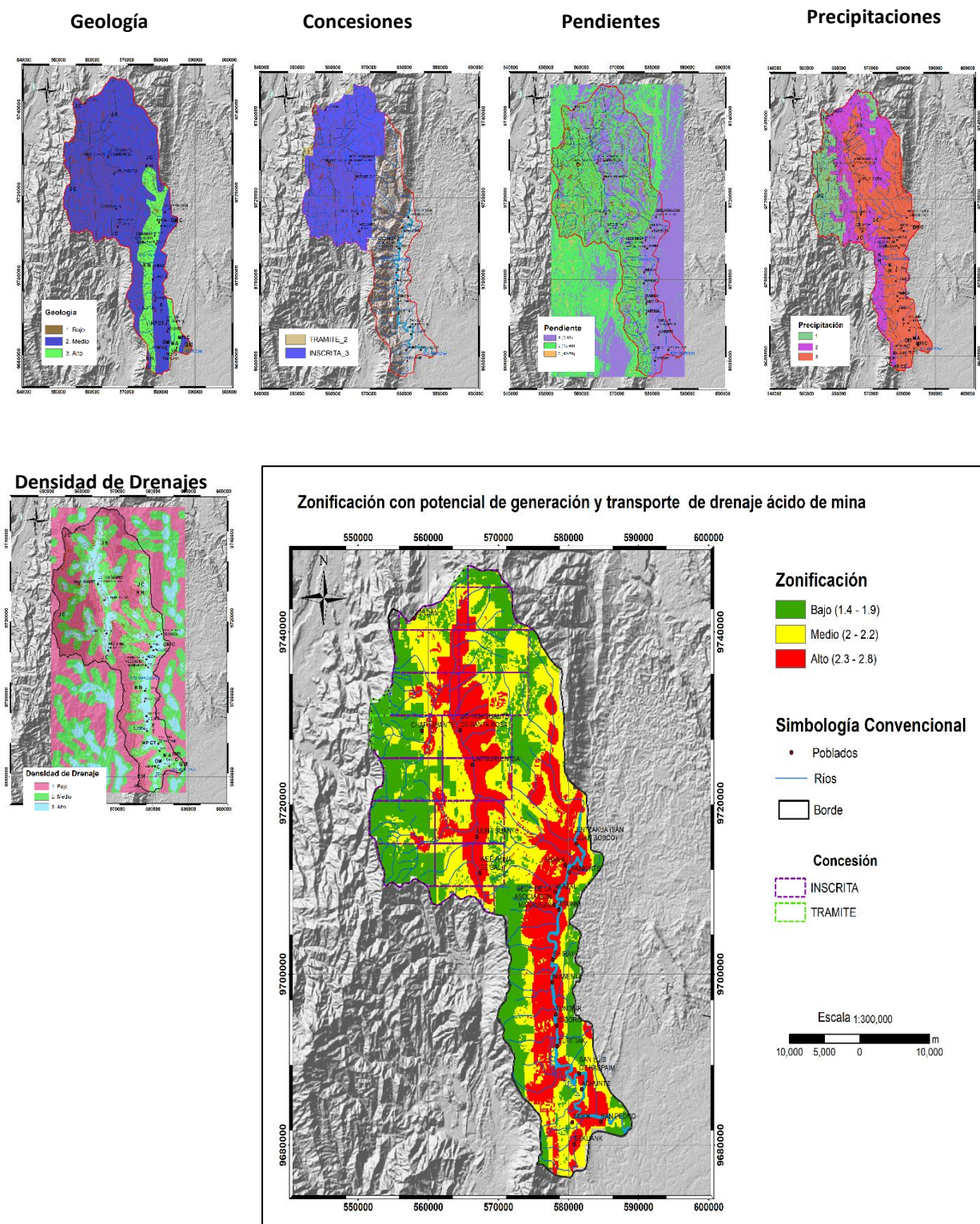


Figura 7. Modelo hidrogeológico preliminar de zonas con potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina en la cuenca Mangosiza.

Fuente: Propia

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten identificar preliminarmente sectores con diferente susceptibilidad hidrogeológica al potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina dentro de la cuenca Mangosiza. La integración de variables geológicas, climáticas, topográficas e hidrográficas mediante Sistemas de Información Geográfica evidencia que las zonas clasificadas con mayor potencial corresponden principalmente a áreas con elevada precipitación, mayor densidad de drenaje, presencia de concesiones mineras metálicas y unidades litológicas con características hidrogeológicas favorables para procesos de alteración y movilización de compuestos asociados al drenaje ácido de mina.

Los datos de la precipitación indican que las condiciones hidroclimáticas de la cuenca Mangosiza favorecen procesos de infiltración, oxidación y lixiviación. Estos resultados coinciden con lo reportado por Akcil y Koldas (2) y Simate y Ndlovu (7), quienes señalan que ambientes tropicales húmedos presentan condiciones favorables para la generación y movilización de drenajes contaminantes debido a la disponibilidad hídrica. De igual manera, la precipitación incrementa la conectividad entre aguas superficiales y subterráneas, favoreciendo el transporte potencial de lixiviados dentro de la cuenca.

La densidad de drenaje muestra que los sectores con mayor conectividad hídrica presentan susceptibilidad más alta dentro del modelo multicriterio. Estos datos indican que la red hidrográfica constituye un factor importante en el transporte potencial de compuestos disueltos hacia sistemas superficiales. Resultados similares han sido reportados en estudios de susceptibilidad ambiental relacionados con minería y drenaje ácido de mina mediante herramientas SIG (14).

En relación con la litología, las formaciones Santiago, Napo y Arajuno presentaron los mayores niveles de susceptibilidad geológica debido a la presencia de lutitas negras, materia orgánica y lignito, materiales comúnmente asociados a ambientes sedimentarios reductores dentro de la Cuenca Oriente(19). Estos datos sugieren que determinadas unidades sedimentarias podrían presentar condiciones favorables para procesos geoquímicos asociados al drenaje ácido de mina, especialmente cuando existe intervención minera y exposición de materiales geológicos.

La alta susceptibilidad modelada para estas unidades muestra coherencia con investigaciones desarrolladas en la Amazonía sur del Ecuador y cuencas vecinas con contextos geológicos similares. Resultados fisicoquímicos reportados en la cuenca del río Napo evidencian concentraciones elevadas de hierro, alcanzando valores de hasta 0.372 mg/L(22), además de incrementos en turbidez, sólidos disueltos y variaciones de pH en sectores asociados a influencia antrópica y actividad minera regional. De igual manera, evaluaciones realizadas en el río Santiago identificaron mayores concentraciones de hierro, aluminio y manganeso en muestras ubicadas aguas abajo respecto a puntos de control, sugiriendo alteraciones hidrogeoquímicas relacionadas con actividades mineras y movilización de sedimentos metálicos en ambientes amazónicos húmedos.

Estos antecedentes regionales permiten observar una relación entre las anomalías hidrogeoquímicas reportadas en cuencas vecinas y las zonas clasificadas con alta susceptibilidad dentro del modelo desarrollado para Mangosiza. El análisis cuantitativo realizado permitió determinar que aproximadamente el 31.03 % de la cuenca, equivalente a 389.49 km², presenta susceptibilidad alta al potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina, principalmente en sectores asociados a las formaciones Napo y Santiago y zonas con elevada conectividad hídrica. Aunque el presente estudio no incluyó monitoreo hidrogeoquímico directo, la correspondencia entre las anomalías reportadas en cuencas amazónicas vecinas y las áreas identificadas mediante análisis multicriterio sugiere que determinadas unidades podrían presentar mayor susceptibilidad a procesos de alteración geoquímica y transporte potencial de compuestos asociados al drenaje ácido de mina bajo escenarios de intervención minera.

Por otra parte, la pendiente mostró influencia sobre la movilidad potencial de lixiviados y procesos de escorrentía superficial. Las áreas con pendientes moderadas y fuertes presentaron mayor susceptibilidad relativa debido al incremento de la energía hidráulica y capacidad de transporte superficial. Estos resultados coinciden con estudios hidrogeomorfológicos donde la pendiente constituye un factor importante en la dinámica de transporte de contaminantes (10,13).

La información de concesiones mineras metálicas: 17 inscritas y 3 en trámite, en la cuenca de Mangosiza permitió representar espacialmente la influencia minera potencial dentro del área. Las zonas concesionadas mostraron coincidencia parcial con áreas clasificadas con susceptibilidad media y alta, lo cual evidencia la importancia de integrar variables antrópicas dentro de modelos de evaluación preliminar. Aunque la presencia de concesiones no implica necesariamente actividad minera activa, sí representa sectores donde podrían desarrollarse futuras intervenciones y exposición de materiales geológicos susceptibles a procesos de alteración.

Uno de los principales aportes de esta investigación corresponde a la integración de variables hidrogeológicas y ambientales mediante análisis multicriterio aplicado específicamente a la cuenca Mangosiza, una zona con limitada información hidrogeoquímica disponible. El modelo desarrollado constituye una aproximación preliminar útil para priorizar futuras investigaciones ambientales y programas de monitoreo en regiones amazónicas con creciente actividad minera.

Dentro de las limitaciones del estudio, el modelo desarrollado no incluye análisis mineralógicos específicos ni monitoreo hidrogeoquímico directo de parámetros como pH, sulfatos o concentración de metales. Por ello, los resultados obtenidos representan únicamente una evaluación preliminar de susceptibilidad y no una confirmación directa de presencia de drenaje ácido de mina. Asimismo, la asignación de ponderaciones dentro del modelo multicriterio responde a criterios hidrogeológicos y revisión bibliográfica, por lo que futuras investigaciones podrían complementar el análisis mediante métodos estadísticos o técnicas de validación hidrogeoquímica en campo.

Finalmente, los resultados muestran que la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y modelos multicriterio constituye una herramienta para desarrollar evaluaciones preliminares en regiones con limitada información ambiental, permitiendo identificar sectores prioritarios para futuras investigaciones y monitoreo ambiental en la Amazonía sur del Ecuador.

CONCLUSIONES

El análisis multicriterio aplicado mediante Sistemas de Información Geográfica permitió identificar preliminarmente zonas con diferente susceptibilidad hidrogeológica al potencial de generación y transporte de drenaje ácido de mina en la cuenca Mangosiza, provincia de Morona Santiago. La integración de variables geológicas, climáticas, topográficas e hidrográficas permitió representar espacialmente sectores con condiciones favorables para procesos potenciales de alteración geoquímica, infiltración, escorrentía y movilización de lixiviados asociados a actividades mineras metálicas.

Los resultados indican que las variables de mayor influencia dentro del modelo corresponden a la litología, precipitación y densidad de drenaje. De acuerdo a la zonificación se clasifica como susceptibilidad alta a la formación Santiago, Napo y Arajuno que se relacionan con su litología, elevadas precipitaciones, mayor conectividad hídrica y presencia de concesiones mineras metálicas. Asimismo, las pendientes moderadas y fuertes favorecen procesos de transporte superficial y movilización potencial de compuestos asociados al drenaje ácido de mina.

El modelo hidrogeológico preliminar desarrollado constituye una herramienta útil para priorizar futuras investigaciones hidrogeoquímicas y programas de monitoreo ambiental dentro de la cuenca Mangosiza. Sin embargo, los resultados obtenidos representan únicamente una aproximación preliminar de susceptibilidad espacial y no una confirmación directa de presencia de drenaje ácido de mina, por lo que se recomienda complementar el estudio mediante monitoreo de calidad de agua, análisis mineralógicos y evaluaciones hidrogeoquímicas específico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Epa U, of Wetlands O. Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction [Internet]. 1994. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/amd.pdf>
2. Akcil A, Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. J Clean Prod. 2006;14(12):1139–45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
3. Nordstrom DK. Mine Waters: Acidic to Circumneutral. Elements. 2011 Dec 1;7(6):393–8. doi:10.2113/gselements.7.6.393
4. Johnson DB, Hallberg KB. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of The Total Environment. 2005;338(1):3–14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>

5. Lottermoser B. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Mine Wastes (Third Edition): Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 2010. 1–400 p.
6. Blowes D, Ptacek C, Jambor J, Weisener C. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. Treatise on Geochemistry. 2003 Nov 30;9:149–204. doi:10.1016/B0-08-043751-6/09137-4
7. Simate GS, Ndlovu S. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. J Environ Chem Eng [Internet]. 2014;2:1785–803. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128705284>
8. Favas P, Pratas J, Gomes M, Cala V. Selective Chemical Extraction of Heavy Metals in Tailings and Soils Contaminated by Mining Activity: Environmental Implications. J Geochem Explor. 2011 Dec 1;111:160–71. doi:10.1016/j.gexplo.2011.04.009
9. Litherland M., Aspden J. A., Jemielita R. A. The metamorphic belts of Ecuador. British Geological Survey. 1994.
10. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. International Journal Geographical Information Science. 2006 Aug 1;20:703–26. doi:10.1080/13658810600661508
11. Kelley D. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS.: EMMANUEL JOHN M. CARRANZA, Editor. Pp. 368. 2008. Elsevier, Amsterdam. ISBN 987-0-444-51325-0. Price \$165.00. Economic Geology. 2009 Nov 30;104:890. doi:10.2113/gsecongeo.104.6.890
12. Saaty T. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. Int J Services Sciences Int J Services Sciences. 2008 Jan 1;1:83–98. doi:10.1504/IJSSCI.2008.017590
13. Eastman JR. IDRISI Andes Manual, Guide to GIS and Image Processing. [Internet]. 2006. Available from: <https://clarklabs.org/>
14. Shahhosseini M, Ardejani F, Amini M, Ebrahimi L. The spatial assessment of acid mine drainage potential within a low-grade ore dump: the role of preferential flow paths. Environ Earth Sci. 2019 Dec 19;79. doi:10.1007/s12665-019-8782-2
15. Indra T, Amalia R, Damayanti A. GIS and RS-Based Analysis of Water Pollution Potential Caused by Acid Mine Drainage in Samarinda, Indonesia. Journal of Settlements and Spatial Planning. 2021 Dec 30;SI:5–13. doi:10.24193/JSSPSI.02.WSWMMSS
16. Syaputra R, Kusuma G, Badhurahtman A. Prediction of Potential Acid Mine Drainage Formation in High Sulfidation Epithermal Deposit Using Geochemical and Mineralogy Approaches. EKSPLORIUM. 2023 May 1;44:33–40. doi:10.55981/eksplorium.2023.6652
17. Suh J. An Overview of GIS-Based Assessment and Mapping of Mining-Induced Subsidence. Applied Sciences. 2020 Nov 5;10:7845. doi:10.3390/app10217845
18. Fick S, Hijmans R. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology. 2017 May 15;37. doi:10.1002/joc.5086
19. Baby P, Rivadeneira M, Barragan R. La cuenca Oriente: geología y petróleo. 2004.
20. Jaillard E. Síntesis Estratigráfica y sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la Cuenca Oriental del Ecuador. Informe Final del Convenio ORSTOM - PETROPRODUCCIÓN. 1997.
21. Díaz M, Baby P, Rivadeneira M, Christophoul F. El pre-apertense en la cuenca oriente ecuatoriana. La Cuenca Oriente: Geología y petróleo. 2004. doi:<https://doi.org/10.4000/books.ifea.2989>
22. Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada. Estado actual de la calidad de agua en la Amazonía: resultados en Ecuador [Internet]. 2026. Available from:

<https://www.raisg.org/es/publicacion/factsheet-estado-actual-de-la-calidad-de-agua-en-la-amazonia-resultados-en-ecuador/>