

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Título del trabajo

“Caracterización del riesgo asociado a la presencia de relaves
mineros en la provincia de El Oro”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de Minas

Presentado por:

Johnny Arián Briones Escalante

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi abuela Ana Cruz por criarme y cuidarme con tanto amor.

A mis padres por nunca permitir que me falte algo y siempre apoyarme en mis estudios.

A mi familia que me acompaña siempre en cada paso que doy.

A mi enamorada y amigos que están en las buenas y en las malas.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por tantas bendiciones, por tenerme con salud a mí y mi familia.

Gracias a mis padres, pilares fundamentales en mi vida y en este logro conseguido, sin ellos no hubiese sido posible.

Gracias a toda mi familia que ha estado pendiente de mi progreso y mi evolución como estudiante y como persona.

Gracias a mi enamorada que siempre ha estado presente para apoyarme en todo momento, más aún en los momentos difíciles.

Gracias a mis amigos y compañeros que me han dado la mano cuando he necesitado.

Y gracias a mis profesores que me han guiado en esta maravillosa experiencia que ha sido estudiar la carrera Ingeniería de Minas.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Johnny Arián Briones Escalante y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Arian Briones

Johnny Arián Briones Escalante

EVALUADOR

A handwritten signature in blue ink, reading "Samantha Jiménez Oyola". The signature is written in a cursive style with a large initial 'S' and a long horizontal stroke at the end.

Ph.D. Samantha Jiménez Oyola

PROFESOR Y TUTOR DE LA MATERIA

RESUMEN

Los relaves depositados de manera anti-técnica han provocado, durante muchos años, un gran impacto ambiental por las altas concentraciones de metales pesados y otros elementos tóxicos. El presente proyecto se desarrolló con la finalidad de evaluar el potencial contaminante de ocho relaveras ubicadas en zonas cercanas a la cuenca alta del Río Puyango. Para este propósito, se realizó la caracterización físico-química de los relaves, de cara a la estimación del riesgo para el ecosistema y la población. La caracterización física consistió en el análisis granulométrico y la determinación de la gravedad específica, mientras que la caracterización química permitió conocer el contenido de elementos traza mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). La caracterización mineralógica indicó las especies minerales presentes en 4 muestras de relaves analizadas. Además, se realizó el test de lixiviación aplicando la metodología americana (USGS FLT) para conocer el potencial contaminante de los lixiviados. Finalmente, se evaluó el índice de contaminación (IC) y el riesgo que representan estos relaves para el medio ambiente y las personas. Como resultados se determinó que el porcentaje promedio de finos es del 49%. Con respecto a la presencia de elementos potencialmente tóxicos, se determinó que el As y el Cu fueron los elementos que superaron el Límite Máximo Permisible (LMP) en las ocho muestras analizadas. El cuarzo es la especie mineral con mayor proporción en todas las muestras. El 87% de las muestras arrojaron valores de IC muy altos (>14), indicando al alto nivel de contaminación de las áreas estudiadas. La evaluación del riesgo permitió identificar que las zonas muestreadas representan un riesgo muy bajo para las personas y el medio ambiente. Sin embargo, existen zonas con elevadas concentraciones de metales pesados que podrían generar afectaciones a largo plazo. Este proyecto permitió complementar la información obtenida de investigaciones previas en el Río Puyango y sus ríos tributarios, evidenciando la contaminación por metales pesados y otros elementos tóxicos. Con esta información se identificó las relaveras que requieren actuación inmediata y se brindó recomendaciones para minimizar la contaminación en la zona estudiada.

Palabras Clave: Metales pesados, relaves, índice de contaminación, test de lixiviación.

ABSTRACT

Tailings deposited in an anti-technical way have been caused a great environmental impact due to the high concentrations of heavy metals and other toxic elements through time. This project was developed with the purpose of evaluating the potential pollution of eight tailings located in areas near the upper basin of the Puyango River. The physical-chemical characterization of the tailings was carried out, in order to estimate the risk for the ecosystem and the population. The physical characterization consisted in a granulometric analysis and the determination of the specific gravity, while the chemical characterization allowed to know the content of trace elements by means of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The mineralogical characterization indicated the mineral species present in 4 tailings samples analyzed. In addition, the leaching test was carried out applying the American methodology (USGS FLT) to determine the contaminating potential of the leachates. Finally, the contamination index (CI) and the risk that these tailings represent for the environment and people were evaluated. As results, it was determined that the average percentage of fines particles is 49%. Regarding the presence of potentially toxic elements, it was determined that As and Cu were the elements that exceeded the Maximum Permissible Limit (LMP) in the eight samples analyzed. Quartz is the mineral species with the highest proportion in all the samples. 87% of the samples showed very high CI values (>14), indicating the high level of contamination in the areas studied. The risk assessment indicated that the sampled areas represent a very low risk for people and the environment. However, there are areas with high concentrations of heavy metals that could cause long-term effects. This project made it possible to complement the information obtained from previous investigations in the Puyango River and its tributary rivers, evidencing contamination by heavy metals and other toxic elements. With this information, the tailings that require immediate action were identified and suggestions were provided to minimize contamination in the area studied.

Keywords: Heavy metals, tailings, contamination index, leaching test.

ÍNDICE GENERAL

1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Potencial contaminante de relaves	4
1.4.2 Pasivos mineros.....	5
1.4.3 Evaluación del riesgo	7
2.1 Área de estudio	10
2.2 Campaña de muestreo	12
2.3 Análisis de laboratorio	12
2.3.1 Caracterización física	12
2.3.2 Caracterización química	14
2.3.3 Caracterización mineralógica	16
2.4 Evaluación de la contaminación	16
2.5 Evaluación del riesgo	17
2.5.1 Índice de probabilidad (I_p).....	18
2.5.2 Índice de severidad (I_s).....	19
3.1 Caracterización de relaves	22
3.1.1 Caracterización física	22
3.1.2 Caracterización química	23
3.1.3 Caracterización mineralógica	25
3.2 Índice de contaminación	26
3.3 Evaluación del riesgo.....	27

3.4 Propuesta de gestión	29
4.1 Conclusiones	32
4.2 Recomendaciones	33

ABREVIATURAS

DAM	Drenaje Ácido de Minas
DS	Desarrollo Sostenible
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
ICP-MS	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
MAE	Ministerio del Ambiente
PAM	Pasivos Ambientales Mineros
PRAS	Programa de Reparación Ambiental y Social
SGM	Servicio Geológico Mexicano
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente
LMP	Límites máximos permisibles

SIMBOLOGÍA

Al	Aluminio
As	Arsénico
Cd	Cadmio
cm	Centímetro
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
°C	Grados Celsius
Fe	Hierro
Gs	Gravedad específica
IC	Índice de Contaminación
kg	Kilogramo
m	Metro
mg	Miligramo
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
pH	Potencial de Hidrógeno
Pb	Plomo
Se	Selenio
Sb	Antimonio
Zn	Zinc

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ejemplo de matriz de valoración cualitativa del riesgo.....	8
Figura 1.2 Esquema de la metodología para la evaluación del riesgo.....	9
Figura 2.1 Área de estudio y localización de los puntos de muestreo.	11
Figura 2.2 Recolección de muestras.....	12
Figura 2.3 Proceso de lavado de las muestras de relaves.	13
Figura 2.4 Equipos de laboratorio utilizados para el análisis granulométrico.....	14
Figura 2.5 Medición de pH en pasta de las muestras de relaves.....	15
Figura 2.6 Gráfica para la interpretación en términos cualitativos del valor del índice de contaminación (IC) (Arranz et al., 2019).	17
Figura 3.1 Curva granulométrica.....	23
Figura 3.2 Valores de concentración de metales pesados en las muestras de relaves.	25
Figura 3.3 Porcentaje de minerales semicuantitativos de las muestras de relave.	26
Figura 3.4 Índice de contaminación de las muestras de relave.	26
Figura 3.5 Mapa de riesgo de las muestras de relaves.	27
Figura 3.6 Matriz de riesgo para la salud de la población.....	28
Figura 3.7 Matriz de riesgo para el medio natural.....	29
Figura 3.8 Representación gráfica de la propuesta de gestión.....	30
Figura A.1 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-02.	40
Figura A.2 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-03.	40
Figura A.3 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-04.	40
Figura A.4 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-05.	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Trabajos de investigación realizados en la zona de estudio.	5
Tabla 1.2 PAMs reportados en la zona de estudio (PRAS, 2015).	6
Tabla 2.1 Valores de fondo de suelos (mg kg^{-1}).	17
Tabla 2.2 Criterios de valoración de la vulnerabilidad de la población expuesta (VP) en función del aprovechamiento del agua superficial.	20
Tabla 2.3 Criterios de valoración de la vulnerabilidad ecológica (VE) en función del recurso y del mérito de conservación de los ecosistemas.	21
Tabla 3.1 Gravedad específica de las muestras de relave.	22
Tabla 3.2 Contenido de elementos analizados en las muestras de relaves.	24
Tabla 3.3 Proporción de especies mineralógicas de las muestras de relaves.	25
Tabla 3.4 Índice de contaminación de las muestras de relave.	27
Tabla 3.5 Índice de contaminación de las muestras de relave.	29

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La actividad minera, practicada de forma ilegal y anti-técnica, ha generado contaminación por metales pesados y otros elementos tóxicos, ocasionando afectaciones considerables en el medio ambiente. En la provincia de El Oro, las actividades mineras metálicas se desarrollan, en gran parte, en el sector más alto de la cuenca del Río Puyango. En este sector se extrae principalmente oro y plata, que luego se trata en las plantas de procesamiento mineral ubicadas en la orilla de los ríos Calera y Amarillo. En estas plantas de tratamiento se busca enriquecer el mineral a través de varios procesos de beneficio. Sin embargo, los residuos de estos procesos han sido, durante muchos años, descargados directamente a los ríos, provocando un gran impacto ambiental por las altas concentraciones de metales pesados y otros elementos tóxicos (Oviedo et al., 2017).

Como consecuencia de esta actividad, la parte alta del Río Puyango ha sido severamente contaminada ocasionando conflictos transfronterizos con Perú. Agricultores peruanos han acusado a las plantas de procesamiento mineral ubicadas en Zaruma y Portovelo, de ser las responsables de la presencia de metales pesados en el río Puyango - Tumbes. Es ampliamente conocido que la presencia de elementos de alta toxicidad perjudica a la flora, fauna y a la salud de los usuarios de los ríos (Torres, 2021).

Hoy en día existe una demanda internacional contra el Estado ecuatoriano presentada por la Federación de Agricultores de Tumbes, Perú. Francisco Barreto, representante de esa asociación, logró recopilar en 2018 la información de varios estudios realizados en la zona, en los cuales se evidencia el problema de la contaminación. Entre esos estudios, destaca el realizado a los habitantes de la comunidad Playa Rica en Tumbes, que utilizan el agua para diversas actividades, incluso para consumo, donde los resultados de exámenes de sangre arrojaron valores de elevadas concentraciones de Pb (Pérez, 2020).

El origen de la contaminación en la cuenca del Río Puyango se ha dado principalmente por la gestión inadecuada de los residuos mineros y la presencia de pasivos ambientales mineros (PAM) como relaveras y escombreras. Cuando estos residuos, con alta presencia de sulfuros, están expuestos al oxígeno y agua, se produce el denominado drenaje ácido de mina (DAM), que es un lixiviado sumamente ácido con elevadas concentraciones de metales/metaloides y sulfatos. El DAM se puede generar de forma natural, sin embargo, el desarrollo de las actividades mineras acelera el proceso, que puede mantenerse por décadas en el ambiente provocando contaminación, incluso después de la finalización de las labores mineras (Delgado et al., 2018).

En la actualidad, la etapa post-minería se considera una de las más importantes para mantener la actividad minera alineada con los principios del Desarrollo Sostenible (DS). En ese sentido, la recuperación y rehabilitación de las áreas afectadas por la actividad minera es fundamental. A pesar de esto, en la cuenca del Río Puyango existen depósitos de residuos mineros abandonados que representan un riesgo potencial para el ecosistema y la población. En este contexto, este proyecto busca caracterizar el riesgo asociado a la presencia de relaveras e identificar las zonas más vulnerables a la contaminación, para la priorización de los sitios que requieren una actuación inmediata.

1.1 Descripción del problema

A finales del siglo pasado, se establecieron plantas de beneficio en las cercanías de los ríos Calera, Amarillo y Puyango, en la provincia de El Oro. Su crecimiento ha sido tal que en la actualidad no solo se procesan minerales de las minas sector, sino también de otros distritos mineros como Ponce Enríquez, Nambija entre otros (Sandoval, 2001). Estas plantas trajeron beneficios a la industria minera ecuatoriana, al permitir procesar una mayor cantidad de mineral en un menor tiempo, pero a su vez ocasionaron una importante contaminación, la cual se evidencia hasta la actualidad.

En la zona de estudio la contaminación inició principalmente por la descarga de relaves y otros residuos tóxicos con alto contenido de metales pesados y metaloides a los ríos. Acorde a la normativa minero ambiental, estos residuos tienen que ser depositados en relaveras que deben cumplir especificaciones técnicas-ambientales en sus etapas de

construcción, operación, mantenimiento y cierre. Sin embargo, se conoce de muchos depósitos de relaves abandonados, considerados en la actualidad como pasivos ambientales mineros (Manzur, 2018).

Los depósitos de relaves abandonados tienden a ser potencialmente contaminantes debido a su alta capacidad de generación de drenaje ácido al entrar en contacto con el agua y el oxígeno. El DAM, además de poseer un pH bajo, también contienen una cantidad considerable de metales pesados con elevadas concentraciones que son nocivos para la actividad biológica, contamina cuerpos de agua superficiales y subterráneos, incluso produce afectaciones a edificaciones (Aduvire, 2006). En este sentido, la caracterización del potencial contaminante de estas estructuras de residuos es el primer paso para proponer medidas de control que minimicen la afectación ambiental y el riesgo para las personas que habitan en esos entornos contaminados.

1.2 Justificación del problema

La finalidad de este proyecto es conocer el potencial contaminante de ocho relaveras situadas en la provincia de El Oro; sus principales características físico-químicas, y el riesgo potencial para el medio ambiente y la población.

Este proyecto busca complementar y actualizar información de estudios previos realizados en la zona de estudio, tal como el Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS) elaborado por el Ministerio del Ambiente (MAE) en 2015, el cual evidenció una contaminación significativa en la cuenca alta y media del Río Puyango. Así mismo, se busca proporcionar información relevante, obtenida de diferentes ensayos de laboratorio, que permita comparar el nivel de contaminación que se tiene en esta zona.

Es importante cuantificar el riesgo que genera la presencia de metales pesados y otros elementos tóxicos en el medio natural, y sobre todo evaluar las consecuencias de esta contaminación para el ecosistema y la población establecida en las cercanías de los depósitos de residuos mineros. Finalmente, se busca proponer recomendaciones para la gestión adecuada de los residuos mineros.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el potencial contaminante en muestras de relaves, mediante análisis físico-químicos y mineralógicos, de cara a la estimación del riesgo para el ecosistema y la salud de la población.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar muestras de relaves mineros a través de diferentes ensayos de laboratorio para conocer sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas.
- Evaluar el contenido de elementos traza en las muestras de relaves mineros, para la comparación con los valores de referencia reportados en la literatura científica.
- Analizar el potencial contaminante de los emplazamientos de estudio, de cara a la identificación del riesgo potencial para el ecosistema y la población en las áreas aledañas.

1.4 Marco teórico

Los relaves mineros son el material resultante del proceso de flotación de los minerales metálicos en las plantas de beneficio mineral. Estos residuos son comúnmente material muy fino y con gran contenido de humedad por lo cual se depositan en grandes piscinas conocidas como relaveras, las cuales deben ser recubiertas previamente por una geomembrana que impida la conexión con el sub suelo y fuentes hídricas subterráneas (Silvana & Romero, 2010).

1.4.1 Potencial contaminante de relaves

El potencial contaminante de los relaves depende de la naturaleza del residuo, es decir, la mineralogía del depósito del cual se extrae el material, la presencia de metales y/o metaloides (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Se, Zn, etc.), y la influencia de factores biológicos y geoquímicos sobre los relaves. Estos elementos tóxicos contenidos en los residuos, transportados principalmente por degradación hídrica, son los generadores de daños al ecosistema (Vargas, 2016).

La Tabla 1.1 presenta un resumen de varios trabajos de investigación realizados en la zona de estudio, donde se evidencia el alto nivel de contaminación producto de las actividades mineras realizadas de forma ilegal y anti-técnica.

Tabla 1.1 Trabajos de investigación realizados en la zona de estudio.

Zona de estudio	Principales hallazgos	Referencia
Cuenca del río Puyango, Ecuador	Análisis de muestras de agua, suelo y sedimentos demostraron una alta contaminación en la cuenca alta y media del río Puyango. Sin embargo, la mayor afectación a la salud se evidencia en la población establecida en la cercanía de la cuenca baja. El principal factor de contaminación y afectación a la salud fue la presencia de Pb en pescados que consumen los habitantes.	PRAS (2015)
Cuenca del río Puyango y ríos tributarios; río Calera, río Amarillo.	Se detectaron altas concentraciones de metales pesados en muestras de sedimentos recolectadas después de la confluencia de los ríos Calera y Amarillo. Los elevados niveles de metales pesados y las bajas concentraciones de Al en estas muestras indican la presencia de mineral polimetálico, el cual es descargado por las plantas de beneficio después de extraer el oro.	Mora et al. (2016)
Cuenca binacional Puyango – Tumbes, entre Ecuador y Perú	Muestras de agua del río Puyango arrojaron valores de concentraciones altas de metales pesados como Cu, Fe y Pb que superan los límites máximos permisibles por las normas establecidas tanto en Perú como en Ecuador. También se reportó presencia de nitratos en las muestras de agua debido a la utilización de fertilizantes y también a los desagües que son descargados a los ríos.	Nuñez & Zegarra (2006)
Cuenca del río Puyango, Ecuador	Se identificaron dos fuentes principales de contaminación; los drenajes ácidos generados en pasivos ambientales y los efluentes de plantas mineras, que contribuyen altas concentraciones de sulfatos y elementos potencialmente tóxicos a los cursos de los cuerpos hídricos de la zona.	Delgado et al. (2018)

1.4.2 Pasivos mineros

Los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) engloban desde las actividades mineras efluentes, emisiones, instalaciones abandonadas hasta las escombreras y relaveras que se encuentran fuera de operación y que producen una o más alteraciones al medio natural; contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, afectación directa a los suelos destinados como relaveras, cambio visual negativo, potencial riesgo de perjuicios al ecosistema, y existencia de metales pesados en el medio físico (Silvana & Romero, 2010). Este estudio se basa en la información reportada por el MAE a través del PRAS en 2015, en el cual se realizó un inventario de PAMs en varios distritos mineros

auríferos del país, además se levantó información sobre el estado ambiental de las zonas con presencia de PAMs, se realizaron análisis de muestras de agua, suelo, sedimentos, aire y del componente biótico en la cuenca del río Puyango, y se verificó el alto grado de contaminación presente en la zona. En la Tabla 1.2 se presenta la información de los depósitos de residuos mineros identificados en la zona de estudio (MAE-PRAS, 2015).

Tabla 1.2 PAMs reportados en la zona de estudio (PRAS, 2015).

PAM	Localización	Observaciones	Fotografía
Relavera abandonada	Zaruma – Muluncay Grande	Se ubica al borde la vía y cerca de una mina y planta de beneficio activa. Se puede observar escorrentía y emana olores fuertes de cianuro y otros elementos potencialmente tóxicos.	
Relavera abandonada	Zaruma – Muluncay Grande	Se encuentra al borde de una vía de segundo orden. Produce lixiviados que se dirigen al río ubicado a 300 metros aproximadamente, olor ligero a productos químicos.	
Planta de beneficio abandonada	Zaruma – Zaruma	Se ubica cerca al puente de la Quebrada Honda, genera impacto visual y físico. Es una infraestructura inestable y no hay señalética. El río Quebrada Honda, ubicado a 2m de este pasivo es posible receptor de lixiviados.	
Planta de procesamiento abandonada	Zaruma – Zaruma	Recurrente contaminación al río Quebrada Honda que recibe efluentes provenientes del PAM.	
Relavera abandonada	Zaruma – Malvas	El terreno posee una pendiente de aproximadamente 55%. A 20m se encuentra el Río Calera. Existe vegetación que cubre la relavera.	

Relavera activa	Zaruma – Muluncay Grande	El río Calera es el receptor de los drenajes ácidos y lixiviados generados en este PAM.	
Depósito de relaves	Piñas – Piñas	Situado en la ribera del río Calera, se evidencia basura como fundas, sacos y madera que se utilizan en las actividades de beneficio.	
Relavera abandonada	Piñas – Piñas	Ubicado en la ribera del río Calera. Materialmente con alto potencial de dispersión por el viento y transporte por escorrentía.	
Relavera abandonada	Piñas – Piñas	Este PAM contamina directamente a la Quebrada Buza. Por la coloración de los lixiviados se observa un alto grado de contaminación.	

Fuente: PRAS, 2015.

1.4.3 Evaluación del riesgo

El riesgo se puede evaluar calculando la probabilidad de que suceda un evento y analizando sus consecuencias no favorables. En este sentido, se describe la evaluación del riesgo como el complemento de dos factores; la probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias. La evaluación de riesgos es un procedimiento sistemático que tiene como finalidad definir prioridades de control a través de fórmulas transparentes y repetibles. No se espera obtener soluciones inmediatas de los escenarios evaluados, mucho menos eliminar los riesgos, pero es importante desarrollar esta evaluación para conocer la prioridad de cada caso y establecer puntos críticos.

En los estudios de riesgo es indispensable la recopilación de información, sin embargo, muchas veces no se consigue suficiente cantidad de datos para cada evento estudiado, lo que repercute en que los resultados del cálculo de la probabilidad y severidad no sean exactos. Por lo tanto, no es factible hablar de una certeza absoluta en la evaluación de riesgos. Según sea el caso, se puede realizar un análisis cualitativo, cuantitativo o una combinación de ambos. Generalmente, en la práctica, se realiza primero un análisis cualitativo para obtener estimación general del nivel de riesgo; este resulta ser menos complejo y de menor inversión. Por otro lado, el análisis cuantitativo proporciona información más detallada y se realiza siempre y cuando existan los medios para obtenerlo.

El análisis cualitativo emplea calificativos para asignar la severidad de las consecuencias y la probabilidad de que sucedan. Estos calificativos pueden ser “muy alta”, alta, “moderada”, “baja” y “muy baja”, y se pueden modificar o adaptar acorde al escenario que se esté evaluando. Finalmente, la valoración del riesgo se desarrolla en una matriz de doble entrada considerando los dos factores probabilidad y severidad, se muestra un ejemplo de la matriz en la Figura 1.1 (IGME, 2014). En el esquema presentado en la Figura 1.2 se presenta uno de los posibles escenarios en los que se puede evaluar el riesgo con esta metodología de análisis cualitativo; escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre aguas superficiales.

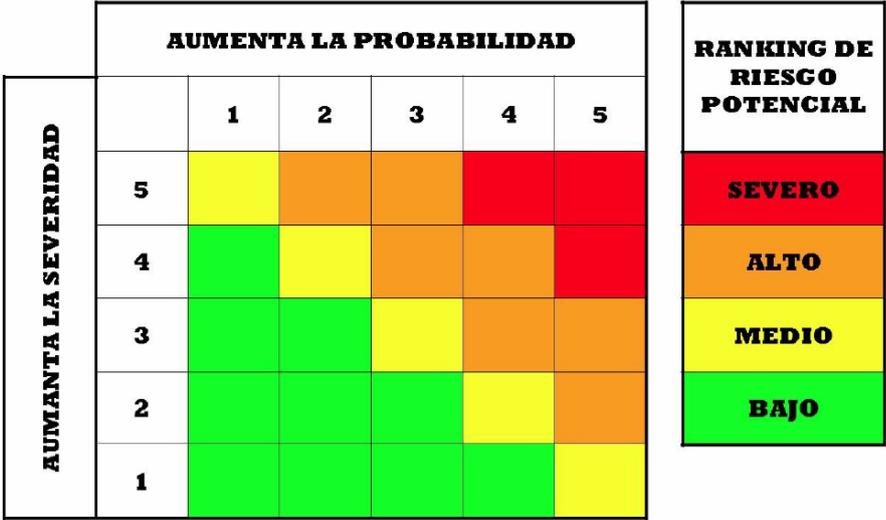


Figura 1.1 Ejemplo de matriz de valoración cualitativa del riesgo.

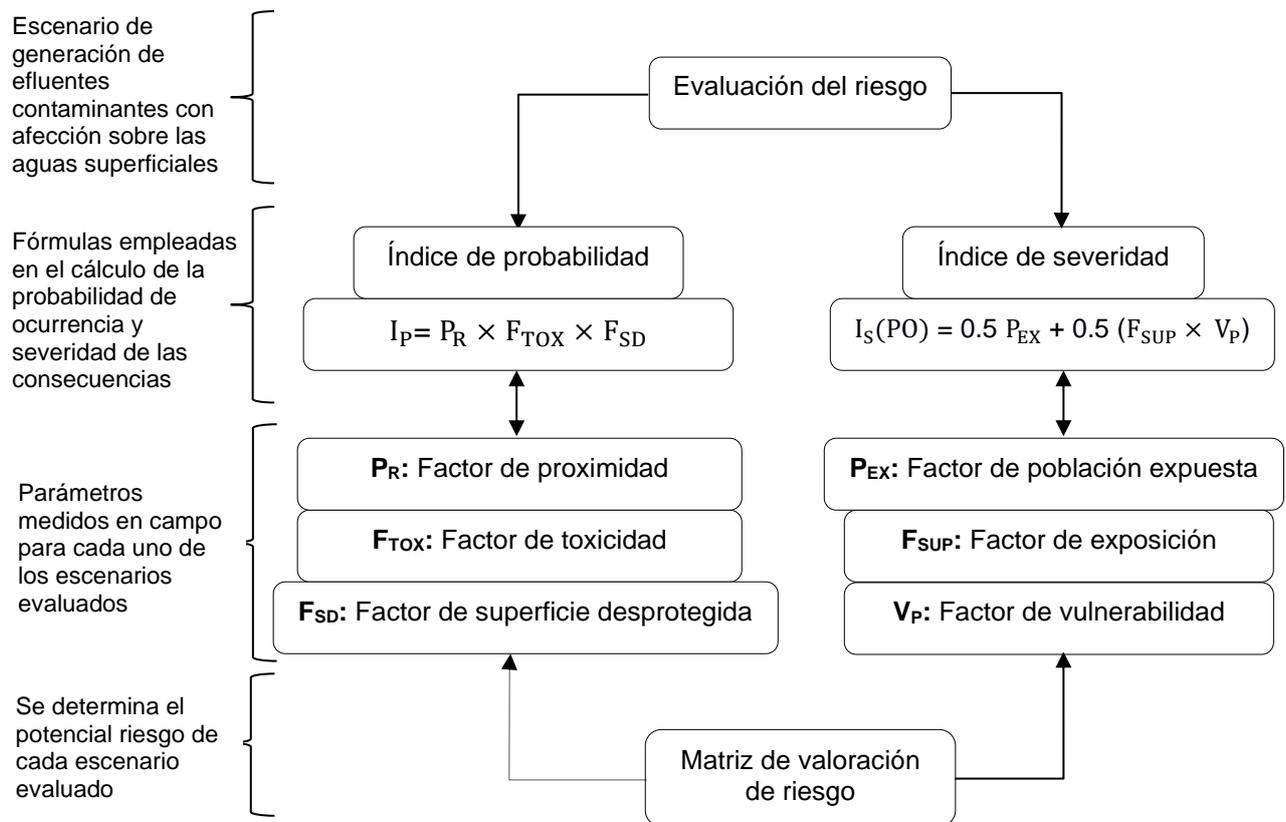


Figura 1.2 Esquema de la metodología para la evaluación del riesgo.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

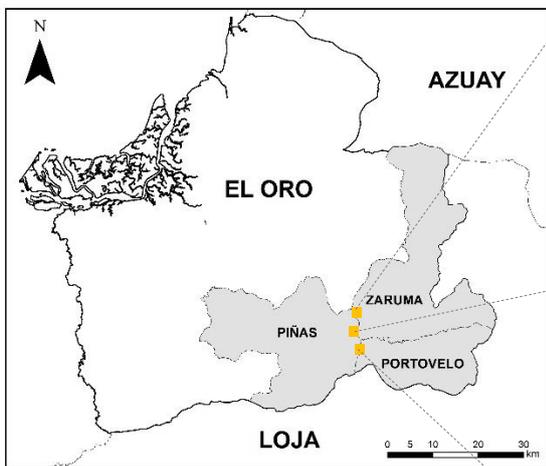
2.1 Área de estudio

En la zona Sur del Ecuador y en conexión al océano pacífico se encuentra la provincia de El Oro, caracterizada por su versatilidad en paisajes y su clima. En la zona montañosa de la provincia de El Oro, cerca de la provincia de Loja, están ubicados los cantones; Piñas, Zaruma y Portovelo. Estos cantones son muy reconocidos por la gran actividad minera que se viene desarrollando desde el inicio del siglo pasado (Ministerio del Ambiente, 2020).

La explotación de oro se ha localizado tradicionalmente en la zona de Zaruma y Portovelo, y se ha extendido a lo largo de los años a otras regiones de la Provincia como el Cantón Santa Rosa, El Guabo, Piñas y Atahualpa. Estudios previos han reportado que la zona de estudio es rica en metales de interés económico y que además del oro se puede encontrar plata, cobre, entre otros (Calderón, 2020).

En cuanto a la geología, en la zona de estudio afloran las rocas más antiguas correspondientes a una secuencia metamórfica del Precámbrico, en la que destaca el Grupo de piedras formado por esquistos verdes, anfibolitas y cuarcitas; del Paleozoico inferior se tiene el Grupo Tahuín, constituido por esquistos, gneises, cuarcitas y anfibolitas de las Formaciones Capiro y San Roque; del Cretáceo, la Formación Raspa, formada por esquistos, la Formación Célica constituida por lavas andesíticas y piroclásticas, el Grupo Alamor, conglomerados, areniscas, lutitas, grauvacas y piroclásticas (GADP El Oro, 2020).

El área de estudio comprende tres zonas donde previamente el MAE, en el marco del PRAS (2015), reportó la presencia de relaveras abandonadas. La zonificación del área se puede observar en la Figura 2.1, este mapa fue elaborado en la herramienta digital ArcMap 10.5, y las imágenes satelitales se georrefenciaron de Google Earth Pro.



SIMBOLOGÍA

- Muestras de Relaves
- Zona de muestreo

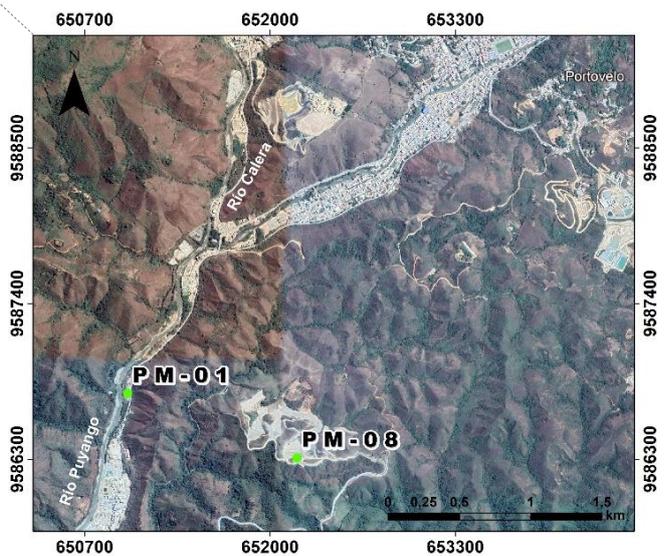
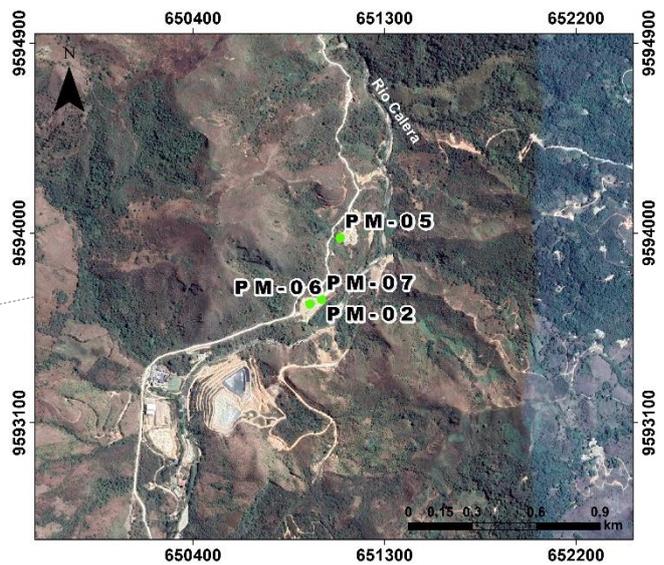
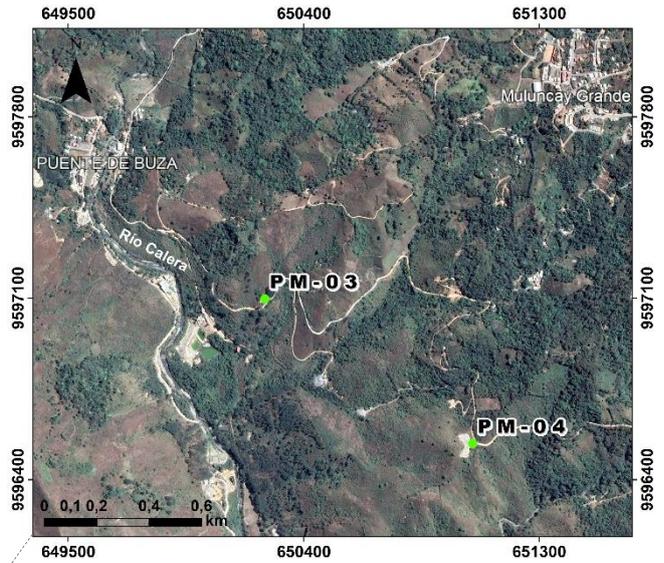


Figura 2.1 Área de estudio y localización de los puntos de muestreo.

2.2 Campaña de muestreo

La campaña de muestreo consistió en la recolección de muestras de ocho relaveras previamente identificadas como relaveras abandonadas o inactivas. Esta información se obtuvo del Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS) del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE, 2015). La mayoría de los puntos muestreados se encontraban cerca del Río Calera y de la vía Puente de Buza – Piñas, que atraviesa Zaruma, Portovelo y rodea el cantón Piñas.

Las muestras de relaves fueron tomadas con una pala de forma manual, a una profundidad de entre 30 y 40 cm. Se tomaron varias muestras de una misma relavera con la finalidad de homogenizar la muestra y de que esta sea representativa de la zona de interés. La localización de las relaveras muestreadas se presenta en la Figura 2.1.



Figura 2.2 Recolección de muestras.

2.3 Análisis de laboratorio

2.3.1 Caracterización física

La caracterización física de las muestras de relaves se realizó en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL, e incluyó el análisis granulométrico y el ensayo de gravedad específica para las ocho muestras de relaves.

a. Análisis granulométrico

El primer paso fue pesar el recipiente a utilizar para contener la muestra. Posteriormente, se depositó la muestra en el recipiente y se volvió a pesar. Con esto se pudo saber el peso de la muestra seca antes del lavado. Luego se colocó la muestra en el tamiz No.200 y se procedió a agregarle agua del grifo para eliminar los finos, este proceso duró unos 20 minutos aproximadamente hasta que el agua que atraviesa el tamiz se observó limpia, ya que esto indica que se ha eliminado la mayor cantidad de partículas finas (Figura 2.3). Después las muestras fueron secadas en la estufa durante 24 horas a una temperatura de 60°C. Una vez pasado ese tiempo, con ayuda de guantes especiales, se retiró el recipiente de la estufa para proceder a pesarlo. De esta manera se pudo calcular el peso de la muestra seca después del lavado. También se pudo determinar el peso del material fino al restar el peso de la muestra antes y después del lavado. Finalmente, se obtuvo el porcentaje de finos dividiendo el peso del material fino para el peso de la muestra antes del lavado, y multiplicándolo por cien.



Figura 2.3 Proceso de lavado de las muestras de relaves.

Los tamices utilizados para el análisis granulométrico fueron: No.10, No.16, No.30, No.50, No.100 y No.200. La muestra seca se colocó en la parte superior, se tapó y se colocó en el equipo tamizador por tres minutos, el cual realiza un movimiento circular horizontal y un golpeteo vertical, lo que genera que la muestra vaya atravesando cada uno de los tamices de acuerdo al tamaño que tengan las partículas. Pasados los tres minutos se retiró la torre de tamices del equipo. Se pesó

el material que contenía cada uno de los tamices en la balanza digital (Figura 2.4). Este procedimiento se realizó para todas las muestras de relaves.

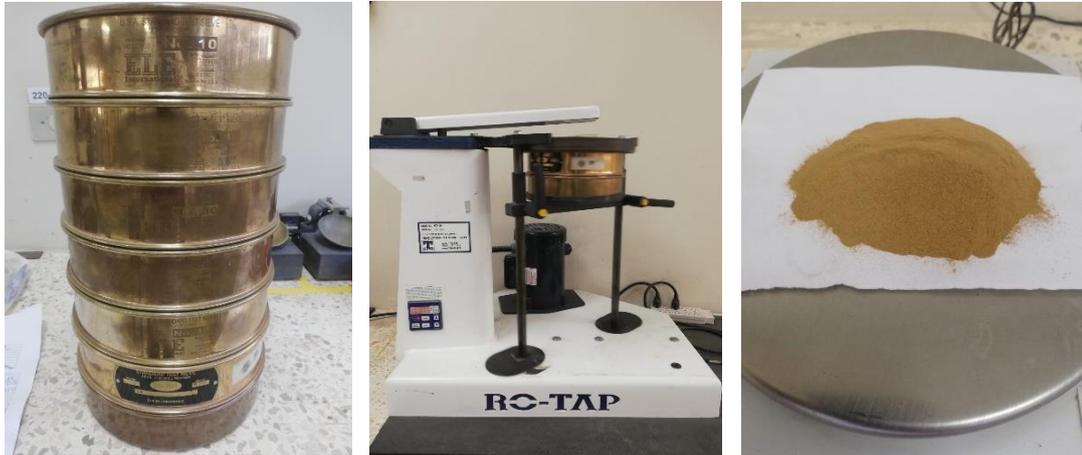


Figura 2.4 Equipos de laboratorio utilizados para el análisis granulométrico.

b. Ensayo de gravedad específica

Se tamizó la muestra seca con el tamiz No.16. De la muestra resultante se tomaron 50 gramos aproximadamente. Para este ensayo se utilizó un matraz de 500 ml, primero se anotó su peso vacío, luego se le agregó agua hasta la línea de aforo y se lo pesó. Posterior a eso, se botó aproximadamente la mitad del agua del matraz y se añadió los 50 gramos de la muestra tamizada. Se realizaron movimientos circulares con el matraz para homogenizar bien la muestra y para tratar de retirar todo el oxígeno. Nuevamente se agregó agua al matraz hasta la línea de aforo y se procedió a pesar. Posteriormente, la muestra fue secada en estufa durante 24 horas a 60°C. Después de ese tiempo se retiró el recipiente de la estufa y se pesó. Estos datos nos permitieron calcular la gravedad específica de cada una de las muestras.

2.3.2 Caracterización química

a. Análisis de elementos traza

Las muestras de relaves fueron secadas al aire, trituradas y pasadas por el tamiz de 2mm, homogeneizadas y conservadas hasta su análisis. La determinación del contenido de elementos traza se realizó mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) en el Servicio Geológico Mexicano (SGM) (Oaxaca, México). El ICP-MS es una técnica de análisis instrumental,

multielemental, capaz de detectar y determinar cuantitativamente la gran mayoría de los elementos de la tabla periódica. Los elementos de interés para este estudio y sus respectivos límites de detección, en mg/kg, fueron: As (4,01), Cd (0,01), Co (0,01), Cr (3,33), Cu (2,67), Mo (0,06), Ni (0,01), Pb (0,02), Sb (0,004), Se (0,01), y Zn (0,41). Se implementaron dos métodos de medición; disolución en sistema abierto con 4 ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF) grado reactivo/ I.C.P-Óptico y disolución en sistema abierto con 4 ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF) grado ultra puro/ I.C.P-Masas.

b. Determinación de pH

La determinación de pH se realizó en el sobrenadante de la solución de agua desionizada y muestra, y tuvo como finalidad determinar la presencia de acidez acumulada por oxidación o meteorización previa de los sulfuros contenidos en la muestra. Para este procedimiento se agregó agua destilada a las muestras de relaves en proporción 1:1 y se agitó (aproximadamente 30 segundos) con una espátula, para posteriormente dejar reposar por 15 minutos. Luego se introdujo el electrodo de un pH-metro, previamente calibrado, en el sobrenadante. El pH fue registrado cuando las lecturas se mantuvieron constantes. Para este procedimiento se utilizó un multiparámetro (HACH HQ40D). Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Sanitarias de la FICT – ESPOL.



Figura 2.5 Medición de pH en pasta de las muestras de relaves.

2.3.3 Caracterización mineralógica

La difracción de rayos X se realizó en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano, se utilizó para analizar la composición de las muestras de relave en base a su estructura cristalina e identificar minerales, aleaciones, metales entre otros. El método de polvo cristalino permite obtener una lista de espaciados e intensidades de manera rápida y sencilla. Previo al análisis difractométrico se prepara la muestra reduciéndola a polvo fino, y utilizando un aglomerante adhesivo se coloca sobre un portamuestras. La reducción de tamaño permite obtener cristales que pueden reflejar los rayos X. El equipo de medición es el difractómetro en polvo Marca Bruker Modelo D2 Phaser 2nd Gen, el cual posee una fuente de rayos X, un goniómetro donde la muestra se encuentra horizontal siempre y un detector. Este detector de láminas de Si con 160 canales es ultrarrápido y no presenta ningún fallo ni láminas muertas (Bruker, 2017). Se utiliza un método sistemático para la identificación acorde al difractograma obtenido, el cual muestra el ángulo de difracción, la intensidad correspondiente y los datos de las muestras analizadas (SGM, 2017).

2.4 Evaluación de la contaminación

Para evaluar la contaminación en las muestras de relaves se calculó el Índice de contaminación (IC). Este índice permite conocer la concentración de elementos que a partir de un valor determinado son considerados inaceptables para la salud o conservación del ecosistema (Guzmán et al., 2020). El IC se calculó con la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[X]}{NF_x} \quad (2.1)$$

Donde:

[X]_i: La concentración del i-ésimo elemento de la muestra

NF_x : El nivel de fondo regional para el elemento X

n: El número de elementos analizados

Los valores de la concentración de los elementos en las muestras se obtuvieron del análisis de elementos traza realizado en la caracterización química. La figura 2.6 se utilizó para interpretar el valor de IC obtenido con la ecuación (2.1).

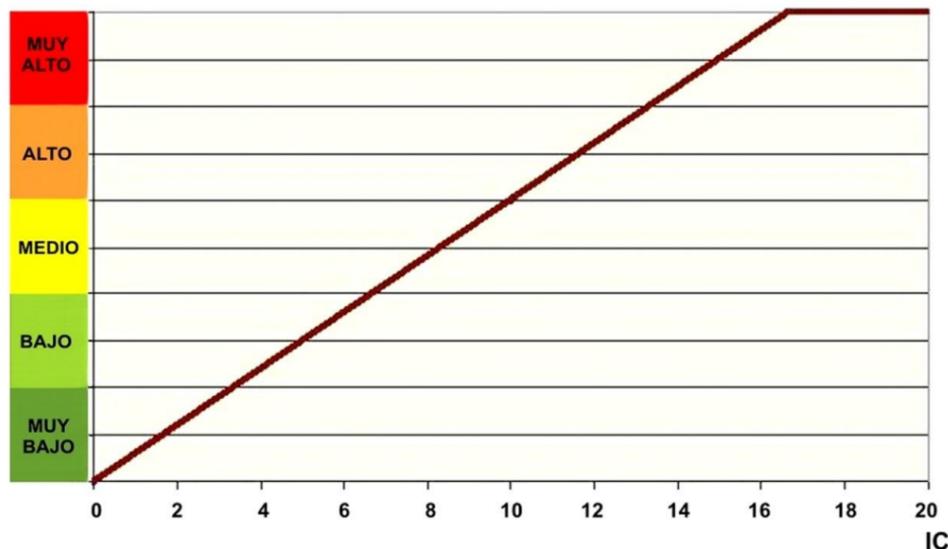


Figura 2.6 Gráfica para la interpretación en términos cualitativos del valor del índice de contaminación (IC) (Arranz et al., 2019).

Además, en la Tabla 2.1 se muestran los valores de fondo referenciales que se utilizaron en la evaluación de la contaminación.

Tabla 2.1 Valores de fondo de suelos (mg kg^{-1}).

Referencia	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn
Corteza terrestre ^a	4.8	0.09	17.3	92	28	1.1	47	17	0.4	0.09	62
Nivel de Fondo Global de suelos ^b	4.7	1.1	6.9	42	14	1.8	18	25	0.62	0.7	62

^a Rudnick & Gao (2014); ^b Kabata-Pendias (2010)

2.5 Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo se realizó aplicando la metodología propuesta por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Para evaluar el riesgo potencial de las relaveras sobre el medio ambiente, se consideró el escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales. La evaluación del riesgo consiste en la valoración compuesta de dos factores: la probabilidad de ocurrencia de un escenario de riesgo por contaminación (Índice de probabilidad: I_p) y la severidad de las consecuencias que se pueden producir sobre la salud y seguridad de las personas y sobre el ecosistema (Índice de severidad: I_s) (IGME, 2014).

2.5.1 Índice de probabilidad (I_P)

El índice de probabilidad se calculó mediante la ecuación (2.2), con base en los siguientes factores: factor de proximidad (P_R), factor de toxicidad (F_{TOX}), y factor de superficie desprotegida (F_{SD}).

$$I_P = P_R \times F_{TOX} \times F_{SD} \quad (2.2)$$

El factor de proximidad (P_R), depende de la distancia (D), en metros, de los cauces o cuerpos de agua superficiales a las relaveras analizadas. Esta distancia se midió con la herramienta digital ArcMap 10.5 y se georreferenciaron las imágenes de las zonas de estudio desde Google Earth Pro. Para este estudio se asumió cauces permanentes, por lo que se consideraron los siguientes rangos:

- $P_R = 1$, si $D \leq 50$
- $P_R = -0.0022 \times D + 1.1$, si $50 < D < 500$
- $P_R = 0$, si $D \geq 500$

El factor de toxicidad (F_{TOX}) se obtuvo a través del cálculo del cociente promedio de peligrosidad (CPP_{LAB}) con la siguiente ecuación:

$$CPP_{LAB} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=0}^n \frac{[X]_{LIX-LAB}}{NCA_X} \quad (2.3)$$

Donde:

$[X]_{LIX-LAB}$: Concentración medida en el lixiviado obtenido aplicando el método americano USGS FLT (Hageman, 2007).

NCA_X : Contenido máximo admisible en el agua o nivel de calidad de aguas correspondiente al elemento X.

n: Número de elementos para los que la concentración medida en el extracto es superior al nivel adoptado como estándar.

Con los resultados obtenidos se aplicaron los siguientes rangos para determinar el valor del factor de toxicidad:

- $F_{TOX} = CPP_{LAB} \times 0.0125$, si $CPP_{LAB} \leq 400$
- $F_{TOX} = 5$, si $CPP_{LAB} > 400$

El factor de superficie desprotegida (F_{SD}) es otro factor determinante en el cálculo de índice de probabilidad. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$F_{SD} = F_S \times (1 - F_C) \quad (2.4)$$

Donde:

F_S : Factor de superficie.

F_C : Fracción de cobertura.

Para este parámetro se determinó un factor superficial (F_S) que depende del área expuesta (S_{EX}) por la relavera en hectáreas, se tienen las siguientes equivalencias:

- $F_S = 0.5 \times S_{EX}$, si $S_{EX} \leq 2$
- $F_S = 1$, si $S_{EX} > 2$

Se estableció que el valor de la fracción de cobertura (F_C) sea igual a 0 al no encontrarse vegetación sobre la superficie donde se tomaron las muestras de relaves, con lo cual el factor de superficie desprotegida (F_{SD}) es igual al factor de superficie (F_S).

2.5.2 Índice de severidad (I_S)

El índice de severidad se determinó tanto para los efectos sobre las personas $I_S(PO)$ como para los efectos sobre el medio natural $I_S(NA)$, cada uno con su respectiva fórmula, y para los cuales se realizó una matriz de riesgo independiente.

a. Efectos sobre las personas

$$I_S(PO) = 0.5 P_{EX} + 0.5 (F_{SUP} \times V_P) \quad (2.5)$$

Donde:

P_{EX} : Factor de la población expuesta que se abastece del agua extraída de cuerpos de agua superficiales.

F_{SUP} : Factor de exposición de la población expuesta en el punto de extracción con el uso del agua más vulnerable y más próximo a la relavera.

V_P : Factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable, los criterios de valoración se encuentran en la Tabla 2.2.

El factor de población expuesta se analiza considerando hasta 5 km de distancia desde la relavera, el criterio de evaluación indica que a partir de más de 50 personas que se abastecen el riesgo es elevado y toma el valor de 5, por el contrario, si el caso es que ninguna persona se abastece se asigna el valor de 0. Para valores intermedios, se divide el número de personas abastecidas para 10.

Por otra parte, el factor de exposición de la población expuesta (F_{SUP}) depende de la distancia, en metros, de la carga contaminante en el cuerpo de agua superficial, se obtuvo con las siguientes igualdades:

- $F_{SUP} = [-0,0002 \times (D+1)]$, si $100 < D \leq 5000$
- $F_{SUP} = 0$, si $D > 5000$
- $F_{SUP} = 1$, si $D \leq 100$

Tabla 2.2 Criterios de valoración de la vulnerabilidad de la población expuesta (V_P) en función del aprovechamiento del agua superficial.

Valoración de la vulnerabilidad de la población ante la ingestión y/o contacto directo con aguas superficiales contaminadas por efluentes procedentes de relaveras	
Criterio de valoración	V_P
Aprovechamiento del Agua Muy Altamente Vulnerables: Agua de abastecimiento a la población (pozos de uso privativo y captaciones de agua a consumo humano, que abastezcan a más de 50 personas o a núcleos de población).	5
Aprovechamiento del Agua Altamente Vulnerables: Regadío (huertas, otros cultivos y pastos) y otros usos agroganaderos (abrevaderos). Acuicultura, cotos de pesca y uso recreativo (zonas de baño).	4
Aprovechamiento del Agua Vulnerables: Uso recreativo (pesca deportiva). Agua para irrigación de parques, etc.	3
Aprovechamiento del Agua Poco Vulnerables: Uso industrial generación energía (para refrigeración) y otros usos industriales, agua para riego de campos de golf, navegación y transporte acuático, etc.	2
Aprovechamiento del Agua Muy Poco Vulnerables: Otros usos de baja exposición.	1

b. Efectos sobre el medio natural

$$I_S(\text{NA}) = F_{\text{SUP}} \times V_E \quad (2.6)$$

Donde:

F_{SUP} : Factor de exposición a que se encuentran expuestos los recursos naturales y ecosistemas más vulnerables, y más próximos a la relavera.

V_E : Factor de vulnerabilidad ecológica en función del recurso o ecosistema expuesto más vulnerable, situado a una distancia máxima de 5 km en la dirección del flujo de agua. La valoración de este factor se realizó en base a la Tabla 2.3.

El factor de exposición (F_{SUP}) a la que están expuestos los elementos del medio natural o el ecosistema en general, se define de la misma manera que se mide para el efecto sobre las personas.

Tabla 2.3 Criterios de valoración de la vulnerabilidad ecológica (V_E) en función del recurso y del mérito de conservación de los ecosistemas.

Valoración de la vulnerabilidad de los ecosistemas ante la contaminación de las aguas superficiales por efluentes procedentes de relaveras	
Criterio de valoración	V_E
Recursos y Ecosistemas Muy Altamente Vulnerables: Áreas sensibles (protección ambiental de recursos y ecosistemas). Masas de agua superficiales con muy buen estado ecológico	5
Recursos y Ecosistemas Altamente Vulnerables: Humedales bien conservados. Masas de agua superficiales con buen estado ecológico.	4
Recursos y Ecosistemas Vulnerables: Masas de agua superficiales con un estado ecológico moderado.	3
Recursos y Ecosistemas Poco Vulnerables: Masas de agua superficiales con un estado ecológico deficiente.	2
Recursos y Ecosistemas Muy Poco Vulnerables: Masas de agua superficiales con un estado ecológico malo.	1

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados de la caracterización de las ocho muestras de relaves incluidas en el estudio. Así mismo, se muestran los resultados del índice de contaminación y de la evaluación del riesgo considerando el escenario de la generación de efluentes con afectación a las aguas superficiales; con esta información se priorizan las relaveras que tienen un mayor potencial contaminante para el medio ambiente y las personas. Finalmente, se presentan recomendaciones para futuras acciones de gestión.

3.1 Caracterización de relaves

3.1.1 Caracterización física

a. Análisis granulométrico

Se obtuvo el porcentaje de material pasante por cada una de los tamices utilizados, este porcentaje se relacionó con la abertura, en milímetros, de cada tamiz y se elaboró la gráfica de la curva granulométrica (Figura 3.1), la cual permitió identificar que el porcentaje promedio de finos es del 49%, mientras que el porcentaje restante corresponde a arenas de tamaño grueso y medio.

b. Gravedad específica

Los resultados del ensayo de gravedad específica (Gs) se presentan en la Tabla 3.1. Se observa que hay poca variación de Gs en las muestras analizadas, con valores entre 2,45 – 3,02, siendo la muestra PM-08 la que presenta el valor más elevado de gravedad específica.

Tabla 3.1 Gravedad específica de las muestras de relave.

Parámetro	Código de la muestra							
	PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-07	PM-08
Gs	2,69	2,72	2,94	2,45	2,68	2,8	2,68	3,02

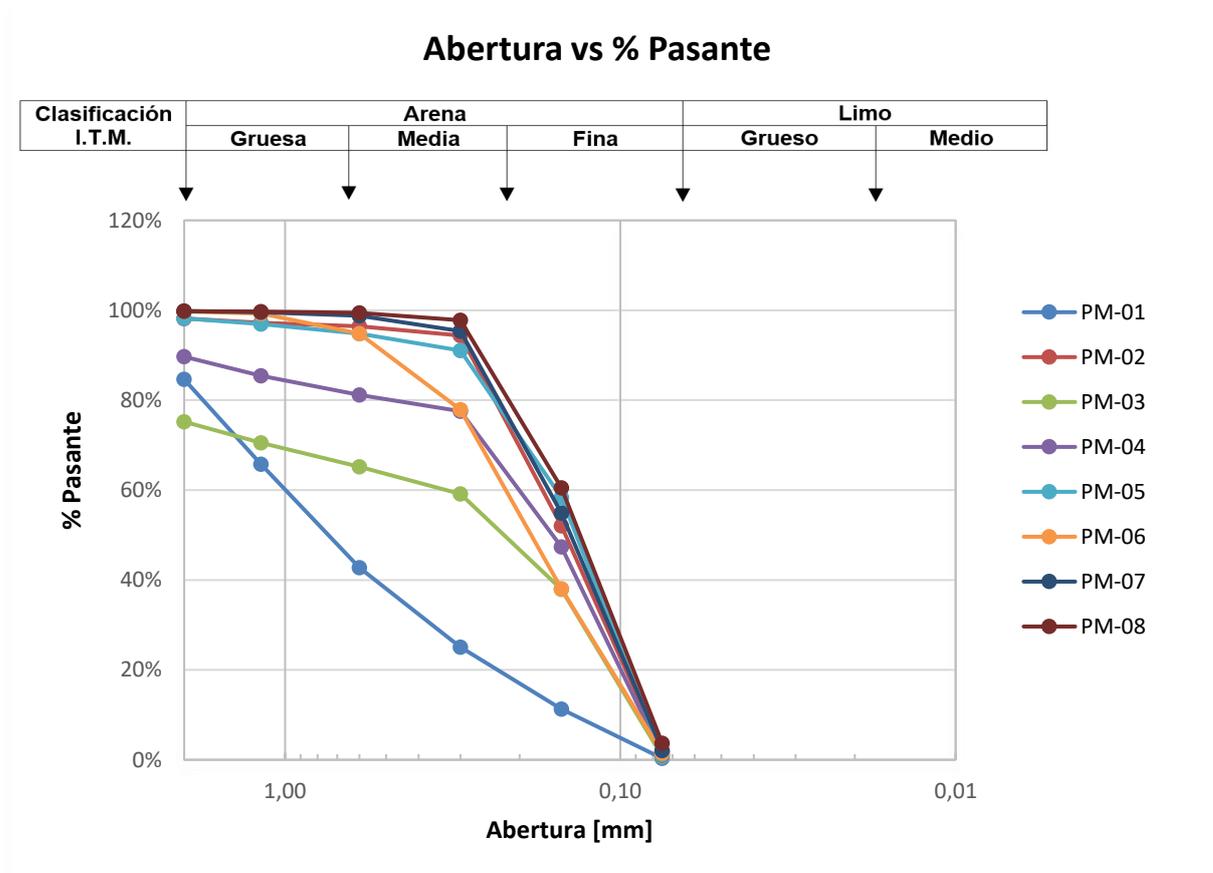


Figura 3.1 Curva granulométrica.

3.1.2 Caracterización química

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados de los elementos analizados en las muestras de relaves, además de sus valores de pH. Los valores de pH se encuentran en el rango de 2,58 y 7,28, indicando condiciones acidas para el 75% de las muestras analizadas.

Por otro lado, la concentración (p50) de los elementos traza tiene un comportamiento decreciente Cu>Pb>As>Zn>Sb>Cr>Co>Ni>Se>Mo>Cd. Como se observa en la Figura 3.2, la muestra PM-08 es la que presenta mayor contenido de metales pesados, principalmente de Zn, Pb, As y Cu. Esta muestra está ubicada en las afueras de Portovelo cerca del Río Puyango. En la campaña de muestreo se identificó que esta relavera es utilizada por varias plantas de beneficio de la zona como relavera común, lo cual justifica los altos valores de concentración en algunos elementos en comparación con otras muestras.

Además, se compararon los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles (LMP) en los criterios de remediación de suelo que proporciona el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), los LMP para los elementos analizados en este estudio, en mg/kg, son; As=12, Cd=2, Co=40, Cu=64, Cr=65, Mo=5, Ni=50, Pb=60, Se=2, Zn=200. El arsénico y el cobre son los elementos que superan los LMP, 12 y 63 mg/kg respectivamente, en todas las muestras de relaves. Por otra parte, el níquel es el único elemento que no supera el LMP (50 mg/kg) en ninguna de las muestras. De igual modo, el cadmio refleja valores de concentración bajos que no están muy alejados del valor permitido, por ello se puede afirmar que estos dos elementos (Ni y Cd) no son potenciales contaminantes en la zona de estudio. En la Figura 3.2 se puede observar que los valores de concentración del As, Cu, Pb y Zn son muy elevados para la mayoría de las muestras, representando un potencial riesgo de contaminación para el medio natural y para la población, debido al DAM que pueden generar al encontrarse expuestos al oxígeno atmosférico y al agua de lluvias y escorrentías.

Tabla 3.2 Contenido de elementos analizados en las muestras de relaves.

Parámetro	LD (mg/kg)	Código de la muestra							
		PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-07	PM-08
pH	-	6,37	4,48	2,89	2,97	3,21	2,58	3,25	7,28
As	4,01	23,6	129,62	4 612	344,74	3 940	418,14	470,34	5 772
Cd	0,01	0,7	0,17	1,09	0,73	3,31	3,91	0,46	96,24
Co	0,01	23,02	6,85	22,06	11,55	14,93	2,75	2,41	42,86
Cr	3,33	88,3	31,32	75,62	25,14	63,46	26,34	43,58	45,36
Cu	2,67	64,87	119,87	1 679	583,39	812,59	515,19	279,19	1 834
Mo	0,06	3,02	2,96	0,98	4,55	25,8	7,56	10,49	5,07
Ni	0,01	42,35	6,15	19,59	6,71	15,35	3,14	6,74	23,29
Pb	0,02	37,38	178,74	85,88	584,36	698,96	1 353	474,16	6 196
Sb	0,004	14,59	25,26	93,78	36,69	156,94	165,98	72,79	78,69
Se	0,01	1,15	10,93	5,49	14,14	9,74	5,35	9,79	7,33
Zn	0,41	106,8	141,8	148,42	196,34	332,8	589,2	113,06	18 392

LD: Límite de detección del equipo de medición.

Concentración de metales pesados en muestras de relaves

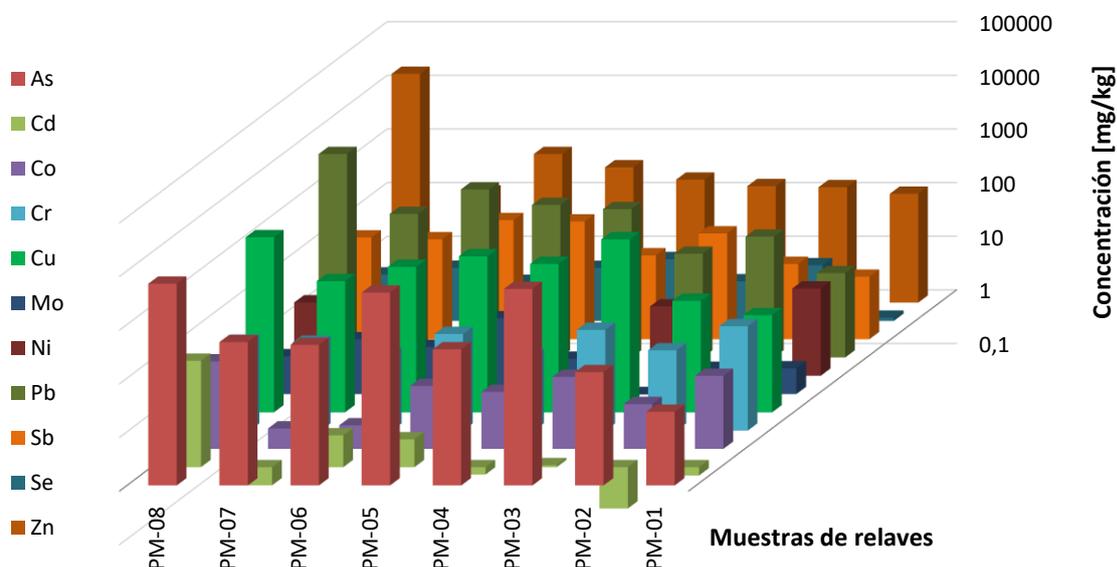


Figura 3.2 Valores de concentración de metales pesados en las muestras de relaves.

3.1.3 Caracterización mineralógica

En el SGM se analizaron 4 muestras (PM-02, PM-03, PM-04 y PM-05). En la Tabla 3.3 se presenta en orden decreciente la proporción de especies mineralógicas, siendo el cuarzo el de mayor proporción en todas las muestras analizadas.

Tabla 3.3 Proporción de especies mineralógicas de las muestras de relaves.

Proporción	Código de la muestra			
	PM - 02	PM - 03	PM - 04	PM - 05
	Especie mineral			
Grande (más de 25%)	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo
Mediana (de 10 a 25%)		Jarosita Yeso		
Pequeña (de 1 a 10%)	Jarosita Chamosita	Muscovita 2M Chamosita Goethita	Chamosita Wollastonita Jarosita	Jarosita Calcita Yeso Chamosita

En la Figura 3.3 se muestra el gráfico circular con los minerales semicuantitativos de las 4 muestras de relaves analizadas, cabe destacar que se empleó radiación monocromática de Cu K-alfa-1.

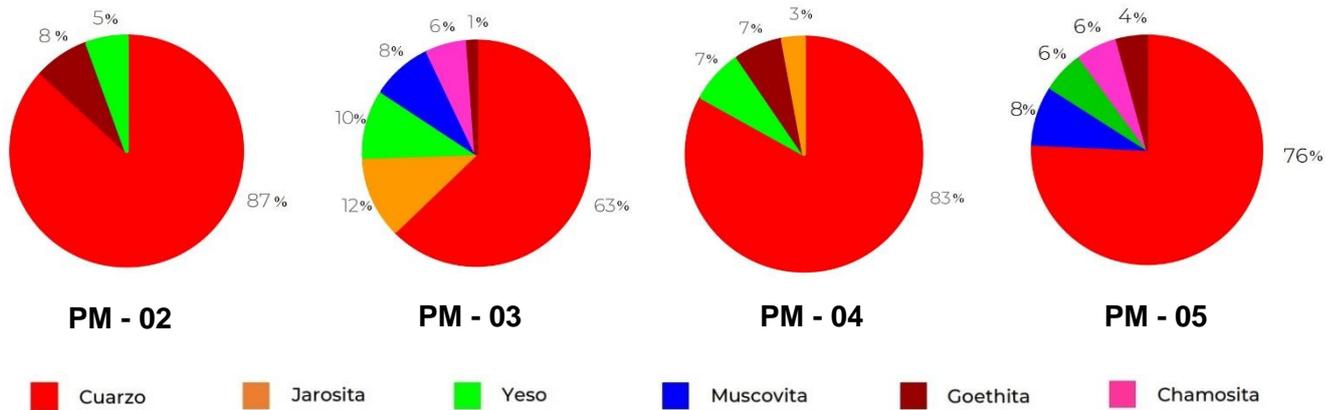


Figura 3.3 Porcentaje de minerales semicuantitativos de las muestras de relave.

3.2 Índice de contaminación

Los resultados del cálculo del índice de contaminación se presentan en la Tabla 3.4. Se pudo determinar que la muestra PM-01 es la única que presenta un índice de contaminación bajo (IC = 6,74), mientras que las demás presentan valores muy altos (IC > 14) que representan un alto potencial contaminante al ecosistema y a la salud de la población. Los elementos que más contribuyen al IC son el arsénico, el antimonio y el selenio (Figura 3.3).

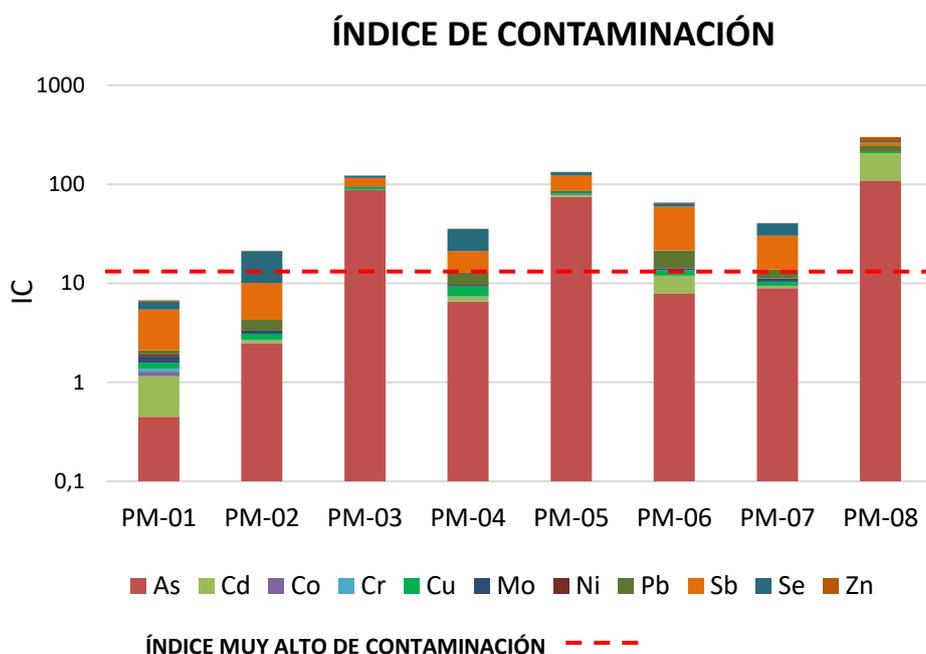


Figura 3.4 Índice de contaminación de las muestras de relave.

Tabla 3.4 Índice de contaminación de las muestras de relave.

Parámetro	Código de la muestra							
	PM-01	PM-02	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-07	PM-08
IC	6,74	21,28	121,75	35,67	132,64	65,44	40,35	298,61

IC: Índice de contaminación.

3.3 Evaluación del riesgo

La Figura 3.5 muestra el mapa de riesgo de las muestras de relave, el riesgo resultó ser muy bajo, tanto para la población como para el medio natural, a pesar de contener metales pesados con concentraciones elevadas (Cu, Pb y Zn). Otros factores como la distancia de la relavera a los pueblos o a los recursos naturales influyeron en el resultado.

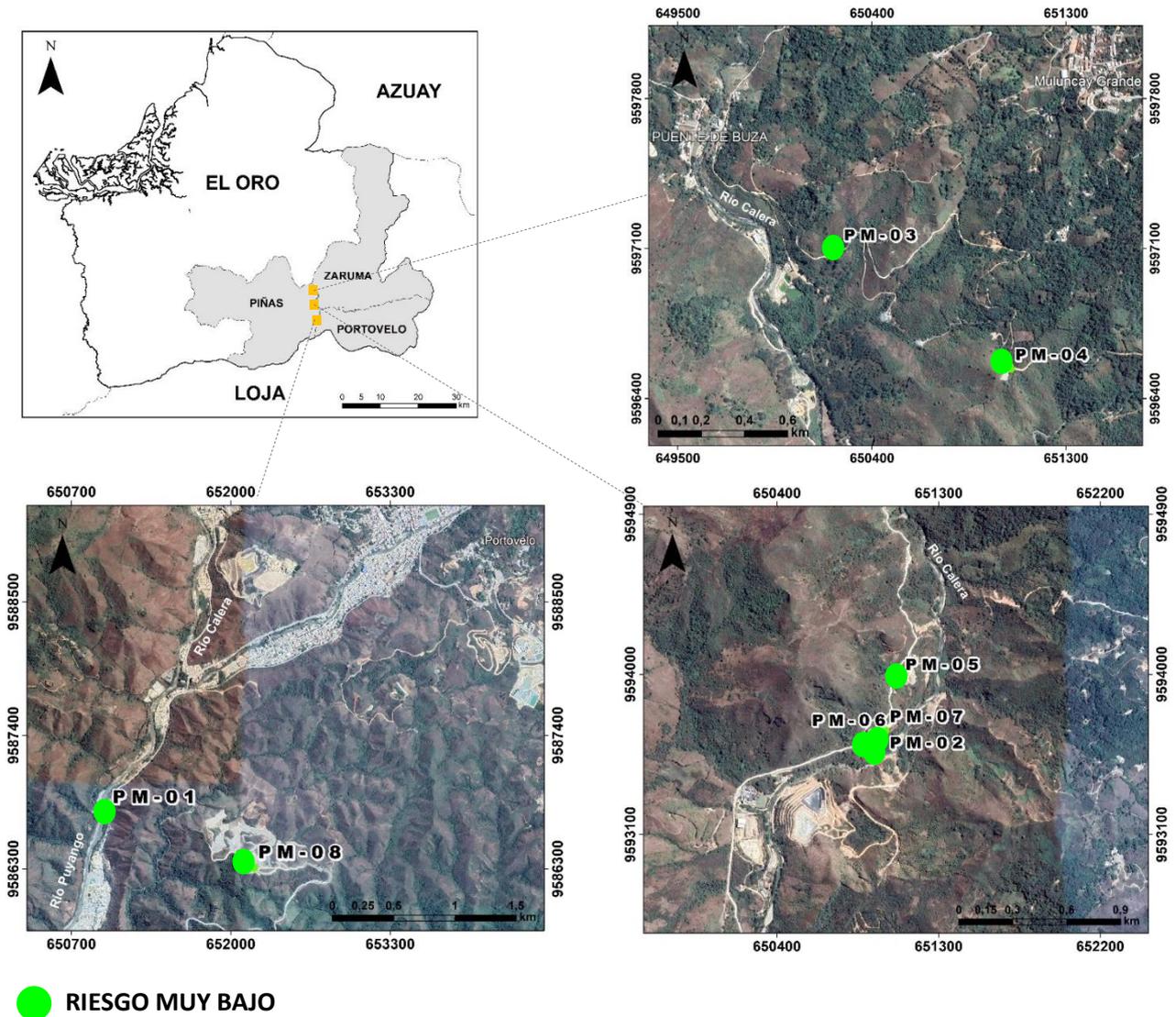


Figura 3.5 Mapa de riesgo de las muestras de relaves.

El riesgo potencial para la población resultó ser muy bajo para todas las muestras de relaves (Figura 3.6), el índice de probabilidad fue bajo principalmente por las dimensiones de las relaveras que eran menores a 2 hectáreas, a excepción de la muestra PM-08. Mientras que para el índice de severidad se consideró un factor de vulnerabilidad medio donde el aprovechamiento es vulnerable de uso recreativo, pesca e irrigación de parques.

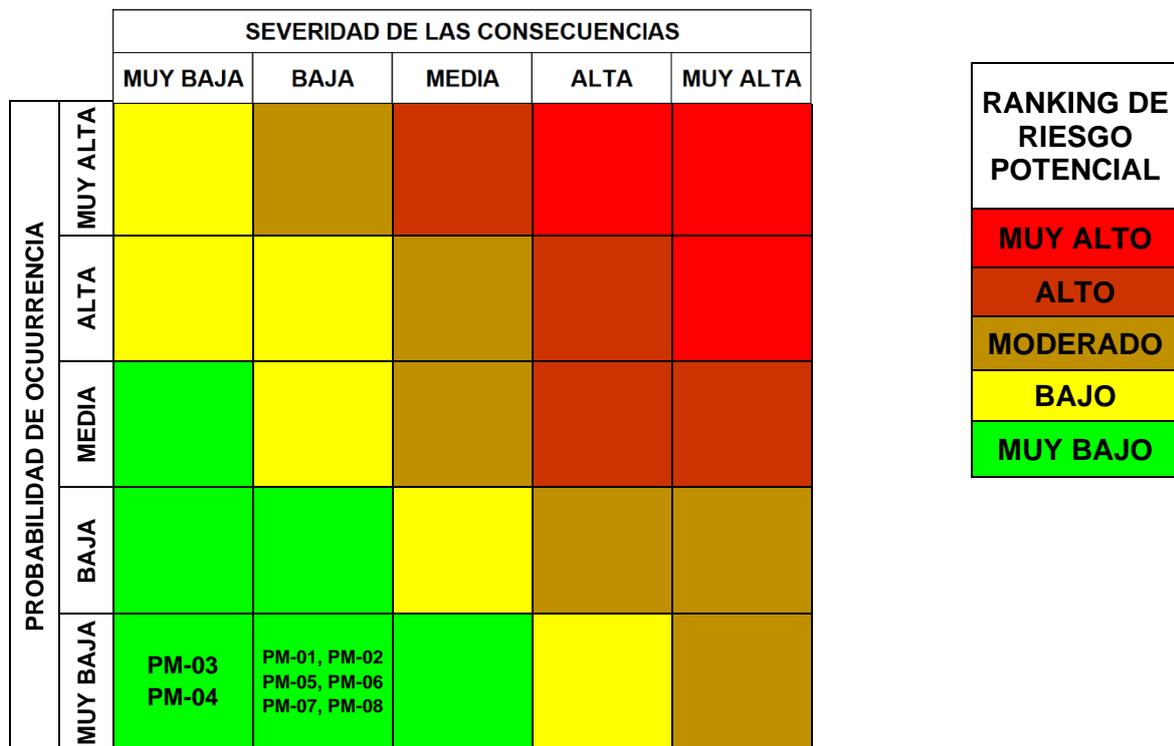


Figura 3.6 Matriz de riesgo para la salud de la población.

Para los efectos sobre el medio natural se toma el mismo índice de probabilidad que los efectos sobre las personas, se consideró un factor de vulnerabilidad ecológica bajo, con recursos y ecosistemas poco vulnerables, masas de agua superficiales con un estado ecológico deficiente. El factor de exposición de los recursos naturales también resultó un valor bajo debido a que la distancia desde las relaveras a los ríos principalmente era mayor a 400 metros. En la figura 3.7 se puede observar que a pesar de que todas las muestras de relaves poseen un índice de severidad medio, la probabilidad de ocurrencia es muy baja, disminuyendo el riesgo potencial de las mismas.

		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS				
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	MUY ALTA					
	ALTA					
	MEDIA					
	BAJA					
	MUY BAJA			PM-01, PM-02 PM-03, PM-04 PM-05, PM-06 PM-07, PM-08		

RANKING DE RIESGO POTENCIAL
MUY ALTO
ALTO
MODERADO
BAJO
MUY BAJO

Figura 3.7 Matriz de riesgo para el medio natural.

3.4 Propuesta de gestión

Se presenta una propuesta de gestión de residuos mineros con la finalidad que se mantenga la estabilidad física y química de las estructuras de residuos y que a largo plazo no se genere contaminación. Se busca evitar la generación de drenaje ácido inhibiendo el proceso de oxidación de sulfuros. Al tratarse de relaveras pequeñas que no generan un riesgo excesivamente alto, se puede colocar una capa de sellado en su superficie lo que evita significativamente el contacto entre el oxígeno y los materiales sulfurosos además se obtendría una percolación mínima del agua de precipitaciones y escorrentías (Figura 3.8). Los materiales que se podrían implementar son arcilla compactada y polietileno de elevada densidad (Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Índice de contaminación de las muestras de relave.

Material de sellado	Ventajas
Arcilla compactada	Disponibilidad. Buen sellado si se da un buen mantenimiento Permeabilidad = 10^{-9} a 10^{-11} m/s
Lamina de polietileno de alta densidad	Longevidad Impermeabilidad

Se debe controlar que no existan aportes de agua de lluvia por lo que se pueden construir canales perimetrales que bordeen la estructura para evacuar el agua. También colocar sistemas de recogida de posibles efluentes que se pueden generar en la zona en función de la pendiente donde se pueden originar lixiviados y finalmente una revegetación del sitio.

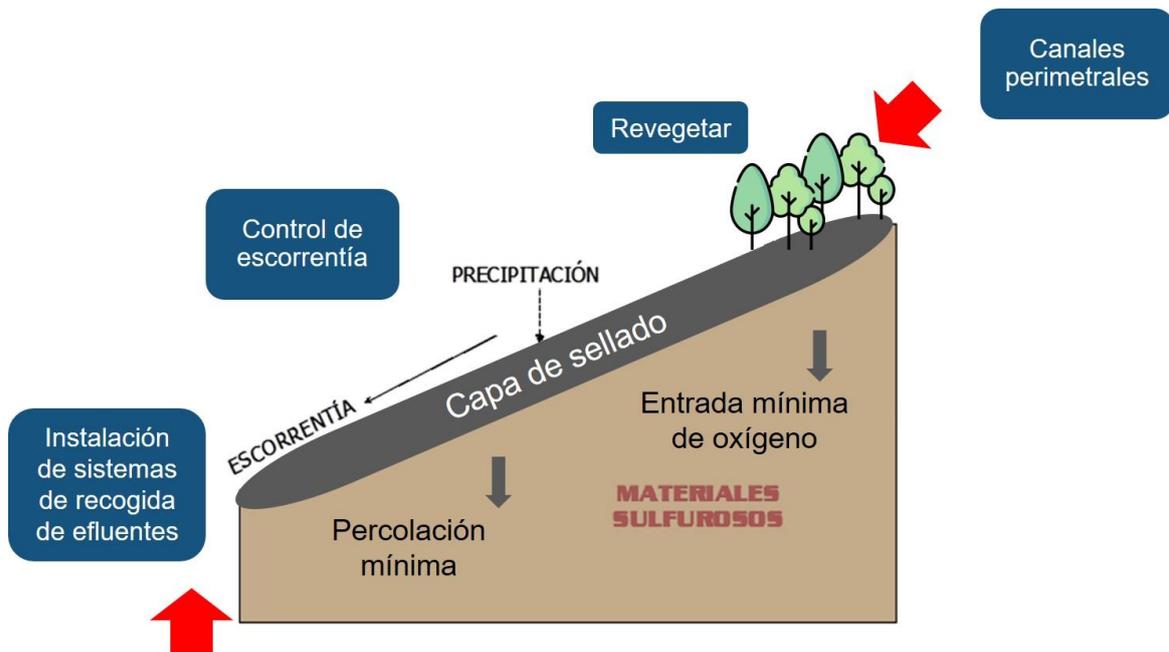


Figura 3.8 Representación gráfica de la propuesta de gestión.

Para disminuir la afectación de los PAMs al ecosistema se debe implementar una política pública clara, además de las estrategias de gestión de los PAMs para mitigar el impacto de estos en los recursos naturales y en la salud de la población. Trabajos de investigación proponen estrategias de biorremediación con especies vegetales, también conocida como fitorremediación, que incluyen plantas nativas, para la remoción de metales pesados de efluentes y suelos en áreas mineras contaminadas (Lam et al., 2017). Por otra parte, algunos estudios sugieren la creación de Geoparques en aquellas zonas que no representen un riesgo significativo para la población (Franco et al., 2020).

Se identificó a Puyango como área prioritaria de control, es decir, necesitan de intervención inmediata, así como planes de restauración y remediación. Los PAMs que requieren un alto nivel de intervención incluyen; depósitos de desechos, bocaminas y plantas de procesamiento abandonadas. Además de los planes de gestión, es necesario

contar con planes de control y seguimiento continuo de las áreas, para asegurar la correcta recuperación y restitución de los terrenos. Finalmente, debe existir un plan de comunicación de riesgos para minimizar la exposición de la población a estas áreas potencialmente peligrosas.

Generalmente, las estrategias de rehabilitación están en función del clima local, la topografía, la hidrología superficial y el medio de crecimiento vegetal, así como la naturaleza y magnitud de la perturbación, además de los recursos financieros y humanos (Leah et al., 2014). En cuanto a la restitución de la vegetación, una gestión importante en la rehabilitación, aún se considera un proceso delicado y complejo debido a las incertidumbres en la selección de especies, además del manejo y control de especies exóticas invasoras (Gastauer et al., 2018).

En algunos casos, la rehabilitación incluye la instalación de sistemas de energía renovable como proponen en la mina abandonada de Sangdong en Corea (Choi & Song, 2016). En este sentido, los procesos de restauración de las áreas mineras degradadas son complejos y requieren de un trabajo conjunto entre diferentes instituciones: empresas mineras, planificadores, inversionistas, instituciones y comunidades locales, con una visión común enfocada en la sustentabilidad (Popovic et al., 2015). Además, es necesario señalar la importancia de contar con políticas públicas claras que incentiven a los involucrados a poner en práctica la responsabilidad social y ambiental durante la ejecución de los proyectos mineros.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Este proyecto se desarrolló con la finalidad de conocer el potencial contaminante de ocho relaveras abandonadas en la provincia de El Oro, la mayoría ubicadas a poca distancia del río Puyango y sus ríos tributarios. Los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de relaves permitieron interpretar y comparar los resultados en base a criterios internacionales de calidad y normativas nacionales como el TULSMA. También se determinó el índice de contaminación utilizando los valores de concentraciones de los metales pesados obtenidos en el análisis de elementos traza. Finalmente, se realizó una propuesta de gestión de residuos mineros para controlar la potencial contaminación y minimizar las posibles afectaciones para los recursos naturales y la población.

Con respecto a la caracterización física, el análisis granulométrico indicó que el 49% de las muestras de relaves corresponden a partículas finas; este es un porcentaje elevado considerando que mientras más finos existan en el relave el problema de contaminación es mayor, debido a que se tiene más superficie expuesta. Por otra parte, el valor de gravedad específica fue similar para todas las muestras (2.45-3.02).

En la caracterización química se midió el pH de todas las muestras y el 75% de ellas resultaron ser ácidas con valores por debajo de 4.5. Por otro lado, los resultados del contenido de elementos traza confirmó la información recopilada de estudios previos en la zona, demostrando que las concentraciones de varios metales pesados superan los límites máximos permisibles, especialmente el arsénico y el cobre, con valores de concentraciones muy elevados, lo que representa un riesgo potencial de contaminación por el DAM que se puede producir al entrar en contacto con el oxígeno atmosférico y el agua de lluvias y escorrentías.

La difracción de Rayos X permitió conocer las especies mineralógicas en cuatro muestras de relaves, obteniéndose que las especies mayoritarias son; cuarzo, jarosita,

yeso, muscovita, goethita y chamosita. El cuarzo es la especie mineral que se encuentra en mayor proporción (más del 25%) en todas las muestras.

El índice de contaminación evidenció que siete de las ocho muestras representan un alto potencial de contaminación con valores muy por encima del límite ($IC > 14$). Por el contrario, la evaluación del riesgo determinó que las relaveras no representan un riesgo potencial para los recursos naturales y la población a pesar de contener metales pesados con elevadas concentraciones. Esto se debe a que las relaveras se encuentran alejadas de los pueblos, este factor disminuye considerablemente el riesgo que puede generar afectaciones a la población.

La propuesta de gestión de los residuos mineros se plantea para minimizar la contaminación que se puede producir por el drenaje ácido generado en varios pasivos ambientales mineros como las relaveras abandonadas evaluadas en este proyecto, que si bien en la actualidad no representan un riesgo importante para la población, es posible que a largo plazo produzcan una contaminación significativa para el medio ambiente y las personas, debido a las elevadas concentraciones de metales pesados y a la falta de un plan de gestión.

En los últimos años, se han venido realizando varios estudios de identificación, caracterización y evaluación de los PAMs, sin embargo, en materia legal, institucional, y técnica no se han tenido avances significativos que impulsen proyectos de tratamiento de esos pasivos y de remediación de zonas afectadas. Como primer paso para una correcta gestión de estos PAMs es necesario el diseño y aplicación de una matriz de riesgo, como la elaborada en este proyecto, enfocada a evaluar el impacto potencial para el medio ambiente y la salud de la población, que incorpore las buenas prácticas mineras, para así mitigar y prevenir mayores daños en el entorno socioambiental.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar evaluando periódicamente todos los PAMs e identificar los que representan un mayor riesgo de contaminación para iniciar un plan de tratamiento y recuperación de esas zonas.

Las autoridades competentes deberían dirigir recursos y esfuerzos a este problema de los pasivos ambientales mineros que, si bien hoy en día no tiene un gran impacto, puede generar una importante contaminación a mediano o largo plazo.

Se recomienda prestar mayor atención a aquellos PAMs que abarcan una gran superficie y se encuentran cerca de los pueblos, ya que su riesgo potencial de contaminación aumenta considerablemente.

Todas las muestras analizadas deben ser evaluadas bajo los mismos parámetros y normativas, desde la campaña de muestreo hasta los diferentes ensayos realizados en los laboratorios, para así garantizar la calidad de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. In *Instituto Geológico y Minero de España*.
http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
- Arranz, J., Rodríguez, V., Rodríguez, R., Fernández, F., Vadillo, L., & Alberruche, E. (2019). *Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/guia-rehabilitacion-instalaciones-residuos-mineros-abandonadas-2019_tcm30-496582.pdf
- Bruker. (2017). *D2 Phaser*. <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d2-phaser.html>
- Calderón, P. (2020). Estado actual de la minería del oro en Ecuador: gran minería vs minería artesanal [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *Boletín Ciencias de la Tierra*.
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/335984/TFM_PAOLA CALDERON%2813-11-2020%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/335984/TFM_PAOLA_CALDERON%2813-11-2020%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Choi, Y., & Song, J. (2016). Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: A case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned Sangdong mine, Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/su8121320>
- Delgado, J., Ayala, D., & Páez, H. (2018). Sistema de tratamiento para mejorar la calidad de aguas de drenaje de pasivos ambientales mineros en la cuenca del río Puyango (Ecuador). *Sociedad Geológica de España*, 63–66.
https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo64/geo64_16.pdf
- Franco, G. H., Mero, P. C., Carballo, F. M., Narváez, G. H., Bitar, J. B., & Torrens, R. B. (2020). Strategies for the development of the value of the mining-industrial heritage of the Zaruma-Portovelo, Ecuador, in the context of a geopark project. *International Journal of Energy Production and Management*, 5(1), 48–59. <https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N1-48-59>
- GADP El Oro. (2020). *Actualización Integral del Plan de Desarrollo y*

- Ordenamiento Territorial de la Provincia de El Oro* (Vol. 1, Issue 06).
- Gastauer, M., Silva, J. R., Caldeira Junior, C. F., Ramos, S. J., Souza Filho, P. W. M., Furtini Neto, A. E., & Siqueira, J. O. (2018). Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for more sustainable mining. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1409–1422. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.223>
- Guzmán, F., Arranz, J. C., Ortega, M., García, M. J., & Rodríguez, V. (2020). A new ranking scale for assessing leaching potential pollution from abandoned mining wastes based on the Mexican official leaching test. *Journal of Environmental Management*, 273(July). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111139>
- Hageman, P. L. (2007). US Geological Survey field leach test for assessing water reactivity and leaching potential of mine wastes, soils, and other geologic and environmental materials. *Geological Survey Techniques and Methods, Book 5*, 14. https://pubs.usgs.gov/tm/2007/05D03/pdf/TM5-D3_508.pdf
- IGME. (2014). *Manual para la Evaluación de Riesgos de Instalaciones de Residuos de Industrias Extractivas Cerradas o Abandonadas*. <http://igmepublicaciones.blogspot.com/2015/05/medio-ambiente-fs.html>
- Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. In *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b10158>
- Lam, E. J., Cánovas, M., Gálvez, M. E., Montofré, Í. L., Keith, B. F., & Faz, Á. (2017). Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 210–217. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2017.06.015>
- Leah, B., Paul, M., & Estelle, L. (2014). *International Review of Environmental Rehabilitation Approaches for Artisanal and Small-Scale Mining A Review of Best Practices for Frugal Rehabilitation of ASM in Mongolia*. 83.
- MAE-PRAS. (2015). *Plan de Reparación Integral de la Cuenca del Río Puyango*. http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/737569/LIBRO_PRI_PUYA_NGO.pdf/94bcfdb4-bf26-4d3a-afa3-d5e87cf7398b
- MAE. (2015). *Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS) – Ministerio*

del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.
<https://www.ambiente.gob.ec/programa-de-reparacion-ambiental-y-social-pras/>

Manzur, J. (2018). *Análisis del sector minero en la provincia de El Oro: período 2010-2017* [UNIVERSIDAD DE ESPECIALIDADES ESPÍRITU SANTO].
[http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/2535/1/MANZUR LOOR JOSE SAID - ANÁLISIS DEL SECTOR MINERO EN LA PROVINCIA DEL ORO%2C PERIODO 2000 – 2007.pdf](http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/2535/1/MANZUR_LOOR_JOSE_SAID_-_ANÁLISIS_DEL_SECTOR_MINERO_EN_LA_PROVINCIA_DEL_ORO%2C_PERIODO_2000_-_2007.pdf)

Ministerio del Ambiente. (2020). *Línea de base nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador, Conforme la Convención de Minamata sobre Mercurio*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/NAP-Inventario-de-Mercurio-Ecuador.pdf>

Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., & Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(4), 385–397. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02>

Núñez, S., & Zegarra, J. (2006). *Estudio Geoambiental de la Cuenca Puyango - Tumbes*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/264>

Oviedo, R., Moína, E., Naranjo, J., & Barcos, M. (2017). Contamination by heavy metals in the south of Ecuador associated to the mining activity. *Bionatura*, 2, 437–441.
https://www.revistabionatura.com/pluginAppObj/pluginAppObj_163_03/Bionatura.-Vol-2-No-4--2017-ONLINE.pdf#page=25

Pérez, A. (2020, September 1). *La agonía del río Puyango-Tumbes y un proyecto binacional estancado*. <https://es.mongabay.com/2020/09/contaminacion-rio-tumbes-ecuador-peru-demanda-internacional/>

Popovic, V., Miljkovic, J. Ž., Subic, J., Jean-Vasile, A., Adrian, N., & Nicolaescu, E. (2015). Sustainable land management in mining areas in Serbia and Romania. *Sustainability (Switzerland)*, 7(9), 11857–11877.
<https://doi.org/10.3390/su70911857>

Rudnick, R. L., & Gao, S. (2014). Composition of the Continental Crust. *Treatise*

on *Geochemistry: Second Edition*, 4, 1–51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>

Sandoval, F. (2001). La Pequeña Minería en el Ecuador. *Mining, Minerals and Sustainable Development*, 75. <https://doi.org/10.1039/b203596k>

SGM. (2017, March 22). *Difracción de rayos X*. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html>

Silvana, F., & Romero, A. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(1), 75–82. redalyc.org/pdf/816/81619984010.pdf

Torres, W. (2021, January 27). *Protesta en Perú por contaminación de río por minería en Ecuador*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/protesta-peru-contaminacion-rio-mineria-ecuador/>

Vargas, R. (2016). *Evaluación de la vida útil de las relaveras en función de las propiedades físicas del material que almacenan* [UTMACH]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/7753>

ANEXOS

ANEXO A

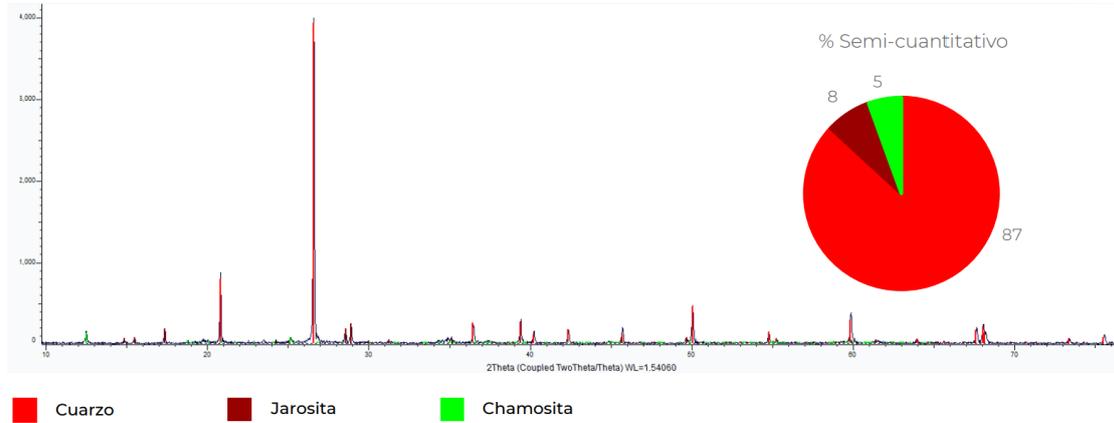


Figura A.1 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-02.

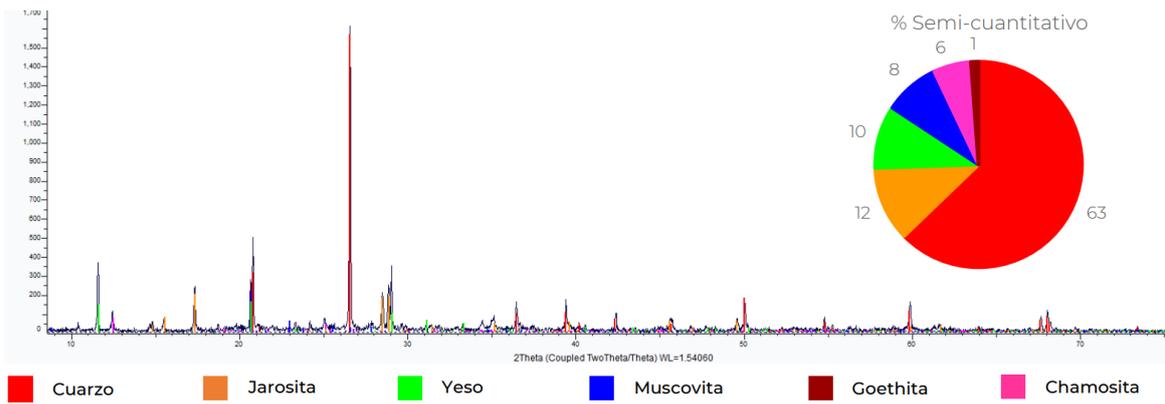


Figura A.2 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-03.

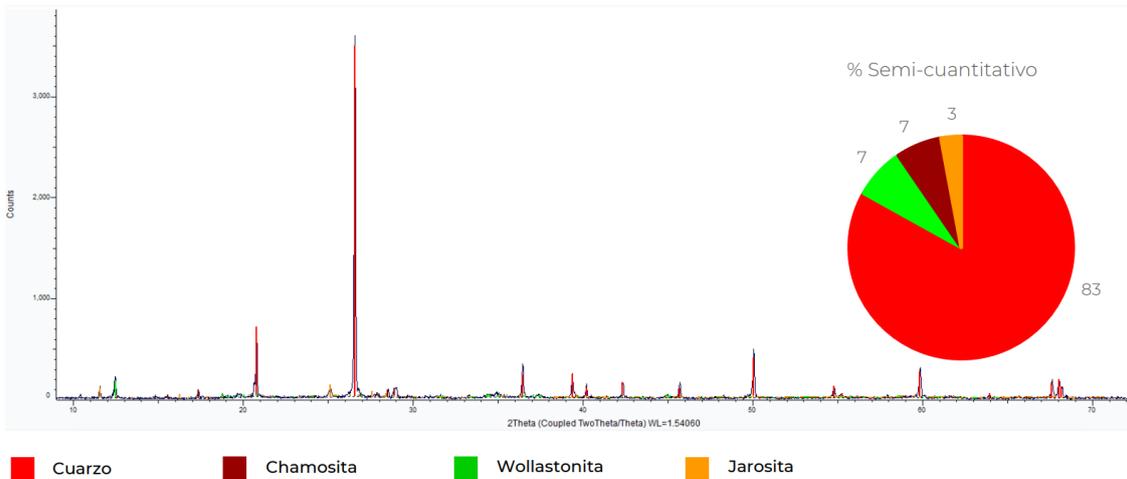


Figura A.3 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-04.

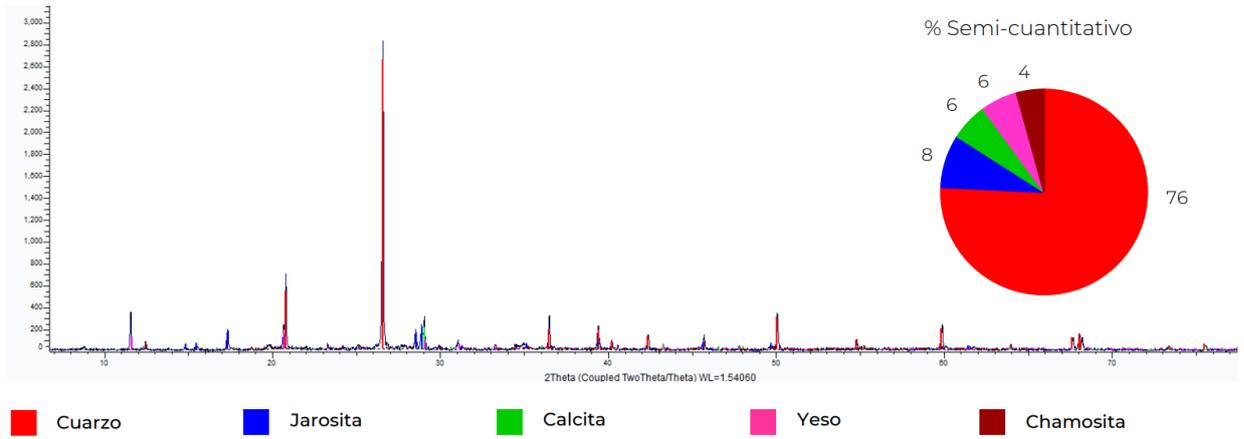


Figura A.4 Difractograma de Rayos X de la muestra PM-05.