

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Caracterización de relaves mineros para su aprovechamiento en la  
fabricación de materiales de construcción

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero de Minas**

Presentado por:

Luis Fernando Lalangui Pulla

Diana Stephany Méndez Taco

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado en memoria de dos seres que fueron pilares en mi vida, personas que me han ido corrigiendo en el transcurso de mi vida para ser una persona servicial, son mis abuelitos Miguel Ángel Pulla Morocho y Rosario María Sánchez Marín quienes se encuentran descansando en paz.

Además, este proyecto está dedicado para la mujer quien para mis hermanos y yo se ha convertido en padre y madre para nosotros, que con su esfuerzo, coraje y valentía supo sacarnos adelante y guiarnos en el camino del bien.

**Luis Fernando Lalangui Pulla**

Este proyecto lo dedico a mi familia, especialmente a mis padres, mi pilar fundamental y apoyo incondicional. Sin ustedes nada de esto hubiera sido posible. ¡Lo hicimos, juntos!

Los amo.

**Diana Stephany Méndez Taco**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Instituto de Investigación Geológico y Energético por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

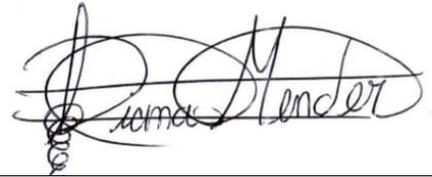
A nuestra tutora de tesis, Ph.D. Samantha Jiménez por siempre estar dispuesta a guiarnos y motivarnos durante la realización de este proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Luis Fernando Lalangui Pulla y Diana Stephany Méndez Taco damos nuestro 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”



Luis Fernando Lalangui Pulla



Diana Stephany Méndez Taco

## EVALUADORES



---

**PhD. Samantha Jimenez**  
PROFESOR DE LA MATERIA



---

**PhD. Samantha Jimenez**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La gestión de los residuos de las actividades extractivas es el principal el gran reto, que en la actualidad, se presenta en las actividades mineras a nivel global. Los grandes volúmenes de relaves mineros que se generan son motivo de preocupación, ya que si no son gestionados adecuadamente pueden liberar sustancias potencialmente contaminantes, representando un riesgo para el ecosistema y la población. La finalidad de este proyecto integrador es evaluar la factibilidad técnico-ambiental respecto a la utilización de relaves mineros como agregados de construcción en la fabricación de adoquines, y su aplicabilidad en la industria de la construcción como una alternativa innovadora y sostenible. Para este propósito, se analizó los relaves provenientes de la concesión minera metálica “Campanillas”, situada en la provincia de Zamora Chinchipe. Se realizó la caracterización física, mineralógica y química de los relaves. Además, se realizó pruebas de lixiviación aplicando la metodología americana (USGS FLT) y europea (EN LLT). Posteriormente, se fabricaron adoquines siguiendo el procedimiento de elaboración tradicional y sustituyendo arena por relave al 50% y 70%. Por último, los adoquines fueron sometidos a ensayos de resistencia y evaluación del potencial contaminante. Los resultados obtenidos demuestran que el material de relave es apto para ser utilizado como agregado de construcción ya que no se detectó elementos potencialmente tóxicos en su contenido, ni como resultado de las pruebas de lixiviación. Además, los adoquines fabricados con relave al 50% presentaron resultados óptimos en torno a las propiedades mecánicas. Finalmente, mediante este proyecto se logró proponer una alternativa sostenible e innovadora para la reutilización de los relaves mineros, que puede ser replicada en distintas áreas mineras a nivel nacional e internacional.

**Palabras Clave:** relaves mineros, pruebas de lixiviación, materiales de construcción, minería sostenible.

## **ABSTRACT**

*The management of waste from extractive activities is the main challenge facing the mining industry globally. The large volumes of mining tailings are a cause for concern, since if they are not properly managed, they can release dangerous contaminating substances, posing a risk to the ecosystem and the population. The purpose of this project is to evaluate the technical-environmental feasibility regarding the use of mining tailings as construction aggregates in the manufacture of pavers, and its applicability in the construction industry as an innovative and sustainable alternative. For this purpose, the tailings from the "Campanillas" metal mining concession, located in the province of Zamora Chinchipe, were analyzed. The physical, mineralogical, and chemical characterization of the tailings was carried out. In addition, leaching tests were carried out applying the American (USGS FLT) and European (EN LLT) methodology. Subsequently, paving stones were manufactured following the traditional manufacturing procedure and substituting sand for 50% and 70% tailings. Finally, the paving stones were subjected to resistance tests and evaluation of the potential contaminant. The results obtained show that the tailings material is suitable for use as a construction aggregate since no potentially toxic elements were detected. In addition, the pavers made with 50% tailings presented optimal results regarding mechanical properties. Finally, through this project it will be possible to propose a sustainable and innovative alternative for the reuse of mining tailings, which can be replicated in different mining areas at a national and international level.*

*Keywords: mining tailings, leaching tests, construction materials, sustainable mining.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
LISTA DE ANEXOS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación del problema .....	3
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco Teórico .....	4
1.4.1 Caso de estudio .....	4
1.4.2 Geología .....	4
1.4.3 Residuos mineros masivos .....	5
1.4.4 Estado de arte.....	6
1.4.4.1 Tejas cerámicas.....	7
1.4.4.1 Adoquines .....	7
1.4.4.2 Bloques y ladrillos .....	8

1.4.4.3 Baldosas.....	8
CAPÍTULO 2.....	10
2.    METODOLOGÍA.....	10
2.1    Acondicionamiento y preparación de muestras.....	11
2.2    Caracterización de las muestras de relaves.....	14
2.2.1    Análisis físico.....	14
2.2.2    Análisis mineralógico.....	17
2.2.3    Análisis químico.....	17
2.2.3.1 Fluorescencia de RX.....	17
2.2.3.2 Análisis de elementos traza.....	18
2.2.3.3 Ensayo al fuego.....	18
2.2.3.4 Pruebas de lixiviación.....	18
2.3    Elaboración de adoquines.....	22
2.3.1 Pruebas de resistencia mecánica.....	23
2.3.2 Determinación del potencial contaminante.....	24
CAPÍTULO 3.....	25
3.    RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	25
3.1    Caracterización física.....	25
3.1.1    Granulometría.....	25
3.1.2    Densidad real y aparente.....	26
3.2    Caracterización mineralógica.....	26
3.3    Caracterización química.....	26
3.3.1    Contenido de elementos traza.....	27
3.3.2    Fluorescencia de rayos X (XRF).....	28
3.3.3    Pruebas de lixiviación.....	28

3.4 Elaboración de adoquines .....	32
3.4.1 Pruebas de resistencia mecánica.....	32
3.4.2 Determinación de potencial contaminante .....	35
CAPÍTULO 4.....	37
4.    CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	37
4.1 Conclusiones .....	37
4.2 Recomendaciones.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS.....	44

## ABREVIATURAS

AA	Absorción Atómica.
DAM	Drenaje Ácido de Mina.
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético.
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
PPC	Pérdidas Por Calcinación a 1000 °C
XRF	X-Ray Fluorescence
XRD	X-Ray Diffraction
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental

## SIMBOLOGÍA

Ag	Plata
As	Arsénico
Ba	Bario
Be	Berilio
Cd	Cadmio
CE	Conductividad Eléctrica
cm	Centímetro
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Eh	Potencial REDOX
G	Gramo
Hg	Mercurio
kg	Kilogramo
L	Litro
m	Metro
mm	Milímetro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
MPa	Mega Pascal
mV	Milivoltio
Ni	Níquel
pH	Potencial de Hidrógeno
Pb	Plomo
rpm	Revoluciones por minuto
Se	Selenio
Tl	Talio
µm	Micrómetro
V	Vanadio
Zn	Zinc

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema metodológico de la investigación.....	10
Figura 2.2 (a) Reducción de tamaño de partículas. (b) Cribado de relave. (c) Acondicionamiento de lote de relave homogenizado. ....	11
Figura 2.3 Lote homogeneizado con 20 arreglos. ....	12
Figura 2.4 Pesaje de las particiones seleccionadas. ....	13
Figura 2.5 (a) Reducción de tamaño de muestras. (b) Muestras preparadas y etiquetadas. ....	13
Figura 2.6 (a) Peso del picnómetro seco y vacío. (b) Picnómetro, muestra y agua destilada. ....	16
Figura 2.7 Palet de adoquines con relave. ....	23
Figura 2.8 (a) Ensayo de resistencia a la tracción indirecta. (b) Ensayo de resistencia a la compresión. (c) Ensayo de absorción.....	24
Figura 3.1 Curva granulométrica resultante.....	25
Figura 3.2 Determinación de minerales por XRD. ....	26
Figura 3.3 Resultados de pH de las metodologías de lixiviación, antes de filtrar. ....	29
Figura 3.4 Resultados de pH de las metodologías de lixiviación, después de filtrar. ....	29
Figura 3.5 Comparación de resultados de conductividad eléctrica en pruebas de lixiviación, antes de filtrar.....	30
Figura 3.6 Comparación de resultados de conductividad eléctrica en pruebas de lixiviación, después de filtrar.....	31
Figura 3.7 Comparación de resultados de potencial redox en metodologías de lixiviación, antes de filtrar.....	32
Figura 3.8 Comparación de resultados de potencial redox en metodologías de lixiviación, después de filtrar.....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Casos de estudio enfocados en la reutilización de relaves mineros para la construcción de materiales de construcción. ....	9
Tabla 2.1 Variación de cantidad de materiales en la fabricación de adoquines. ....	23
Tabla 3.1 Comparación de los contenidos de metales pesados con los valores máximos permisibles en la normativa. ....	27
Tabla 3.2 Determinación de elementos mayoritarios por XRF .....	28
Tabla 3.3 Resultados de resistencia a la tracción indirecta en adoquines. ....	33
Tabla 3.4 Resultados de compresión en adoquines.....	34
Tabla 3.5 Resultados de índice de absorción en adoquines .....	34
Tabla 3.6 Resultados de pH, CE y Eh para lixiviados en adoquines .....	35
Tabla 3.7 Resultaos de concentración de metales pesados en lixiviados y comparación con normativa europea.....	36
Tabla 3.8 Resultados de concentración de aniones por cromatografía iónica .....	36

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Datos de muestreo por incrementos y aleatorio .....	45
Anexo 2. Porcentaje retenido y pasante de relave .....	45
Anexo 3. Mediciones de densidad real.....	45
Anexo 4. Mediciones de densidad aparente.....	46
Anexo 5. Comparación de resultados de concentraciones de metales en lixiviados .....	46
Anexo 6. Comparación de resultados de concentración de aniones en lixiviados.....	46
Anexo 7. Resultados de ensayo de tracción indirecta realizada en adoquines .....	47
Anexo 8. Resultados de ensayo de compresión realizada en adoquines.....	47
Anexo 9. Resultados de índice de absorción en adoquines .....	48

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería data del inicio de la humanidad y poco a poco ha ido evolucionando. El desarrollo de tecnologías y la búsqueda de técnicas que permitan optimizar la extracción de recursos mineros, así como la gestión adecuada de los residuos generados, ha sido el objetivo hacia donde apunta la industria minera en la actualidad.

En Ecuador, la industria minera forma parte del sector estratégico y representa uno de los pilares fundamentales de desarrollo económico del país, que cuenta con cinco proyectos estratégicos y alrededor de seis proyectos mineros catalogados de segunda generación (BCE, 2019). Sin embargo, hasta hace pocos años, la actividad minera en Ecuador solo se realizaba de forma artesanal y a pequeña escala, concentrándose principalmente en las provincias de El Oro, Zamora Chinchipe y Azuay. Estas actividades se han caracterizado por una inadecuada gestión de los residuos, principalmente relaveras y escombreras, que durante años fueron descargadas directamente a los ríos, lo que ha ocasionado alteraciones en los entornos mineros.

La industria minera se enfrenta a un gran reto con la gestión de los residuos, principalmente los relaves mineros, debido a su potencial contaminante. En este sentido, se han efectuado diversas investigaciones en busca de alternativas en torno a la disposición final y/o uso de los relaves, siendo el reaprovechamiento el campo de mayor interés. Entre los estudios realizados sobresale la reutilización de relaves mineros como agregados en materiales de construcción (Cerón & Gutiérrez, 2019; Huacho & la Fuente, 2021; Paladines, 2016; Veiga Simão et al., 2021). Sin embargo, sigue siendo un campo poco explorado en la actualidad, pero con un alto potencial de desarrollo.

Por lo antes expuesto, este documento presenta una propuesta alternativa para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de procesos gravimétricos en la fabricación de adoquines, para lo cual se realizó la caracterización fisicoquímica y mineralógica de los relaves, además de ensayos de lixiviación con la finalidad de evaluar

la capacidad de generar drenaje ácido de mina y analizar su utilización en la elaboración de materiales de construcción.

### **1.1 Descripción del problema**

Los residuos mineros provienen de la extracción y tratamiento de los recursos minerales. Estos residuos incluyen materiales de cobertera (capa superior del suelo), roca estéril y los relaves (producto del proceso de beneficio mineral). Tienen en su composición varios elementos químicos o mineralógicos que se encuentran presentes en diferentes proporciones, y que generalmente son de poco interés en la industria.

Los relaves mineros son los residuos de mayor preocupación, ya que se producen reacciones de oxidación que pueden desencadenar la generación de drenaje ácido de mina (DAM); de esta forma los contaminantes son movilizados y transportados alcanzando regiones mucho más grandes que el área de explotación minera. La situación se agrava cuando estos residuos contienen elementos potencialmente tóxicos como el As, Hg, Cd, o Pb, ya que estos peligrosos para el medio (Escobar-Segovia et al., 2021; Jiménez-Oyola et al., 2021).

En Ecuador, existen más de 150 plantas de beneficio mineral debidamente registradas (Diario La Hora, 2019). Estas plantas generan residuos mineros en grandes cantidades y, por lo tanto, su gestión y disposición final se convierte en un problema, si estos residuos no son tratados adecuadamente.

La gestión de los residuos mineros representa elevados costos para las empresas, por lo que el problema de disposición final se vuelve aún más complejo. Un problema común de la gestión de estos residuos son sus grandes volúmenes, lo que puede ocasionar la saturación de la capacidad de almacenamiento de las relaveras, provocando situaciones de inestabilidad física y química de estas estructuras a largo plazo. En este sentido, buscar alternativas de uso para los relaves mineros puede reducir significativa esta problemática.

## **1.2 Justificación del problema**

La gestión de los residuos mineros se ha convertido en un tema de interés a nivel global. La demanda de extracción de recursos minerales aumenta gradualmente, lo que obliga a buscar alternativas sostenibles que den solución al problema de generación y tratamiento de relaves.

La incorporación de nuevos procedimientos que impulsan la utilización consciente de los recursos promueve la innovación, industria e infraestructura sostenible, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Así, se dinamiza la economía y se hace frente a los impactos ambientales generados por los residuos mineros masivos.

El desarrollo de este proyecto propone una alternativa sostenible frente al problema producción de residuos mineros masivos, mediante la reutilización de relaves como agregados en la fabricación de adoquines para la industria de la construcción. Esto se logra sustituyendo los materiales de fabricación tradicional (arenas) por relaves, reduciéndose la extracción de materias primas para su fabricación y obteniendo un producto final de iguales características a los convencionales.

Finalmente, con este proyecto se busca contribuir al desarrollo de una industria minera sostenible con responsabilidad social y ambiental, además de brindar oportunidades a las empresas mineras en lo referente a la reducción de los costos generados por la generación de relaves mineros. De esta manera, se promueve la economía circular y la investigación ecuatoriana, además de, fomentar la innovación entorno a la reutilización de relaves mineros

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la factibilidad (técnica y ambiental) de la utilización de relaves mineros en la fabricación de adoquines, mediante ensayos de campo y laboratorio.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los relaves mineros a utilizar en la elaboración de adoquines.
- Evaluar el potencial contaminante de los residuos mineros, mediante pruebas de lixiviación en laboratorio.
- Evaluar la resistencia y potencial contaminante de los adoquines para el análisis de su utilidad y aplicabilidad en la industria de la construcción.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 Caso de estudio**

Las muestras de relaves que son analizadas para este caso de estudio provienen del sector “Campanillas”, que se encuentra dentro de la parroquia San Carlos de las Minas, localizado en Zamora Chinchipe (Barba et al., 2017). Las muestras, fueron tomadas de relaveras en las cuales se depositan residuos producto de las actividades de extracción y recuperación de mineral, principalmente oro, mediante procesos gravimétricos.

### **1.4.2 Geología**

El campo minero “Campanillas” se asienta al norte del distrito Nambija en donde la mayor parte de las familias de este sector se dedica a la minería, siendo esta actividad el principal ingreso económico para aproximadamente el 80 % de la población (IIGE, 2019).

La Unidad Piuntza es la principal formación de la zona de estudio, encontrándose una secuencia de rocas pertenecientes al jurásico inferior, donde se ha registrado la presencia de areniscas, arcillas y argilitas, y una secuencia de rocas volcano-sedimentarias compuestas por andesitas con tobas y brechas volcánicas de textura variada, además de sedimentos de origen volcánico con tamaños de grano entre fino a medio de color gris verdoso. También existen mineralizaciones en roca tipo skarn con alteraciones hidrotermales (Litherland & J. A. & Jemielita, 1997),

y se pueden encontrar afloramientos en dirección NW- SW, con vetas de pirita y calcopirita y presencia de rocas muy fracturadas que albergan principalmente Au, Cu y Zn en mineralizaciones vetiformes (Velasco Valarezo, 2016).

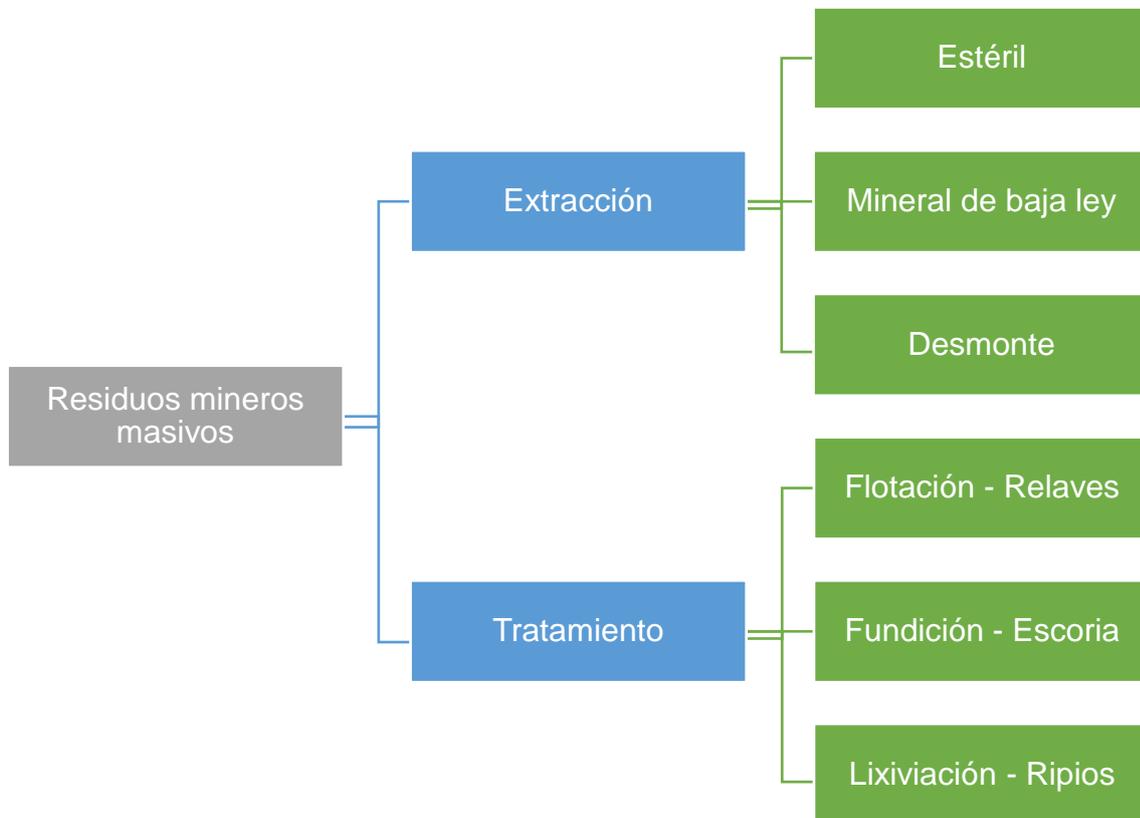
Así también, se encuentra el complejo intrusivo Zamora que es considerado como un batolito tipo I, que no se encuentra deformado ni metamorfozido. Este batolito está compuesto por una serie de litologías, que van desde granitos hasta granodioritas, hornblendicas - biotíticas de grano grueso a medio (Barba et al., 2017). Es así como, las características geológicas que presenta esta zona la convierten en un lugar atractivo para el desarrollo de actividades mineras.

### **1.4.3 Residuos mineros masivos**

Las actividades de obtención de recursos minerales es de carácter antropogénico, consiste en retirar grandes cantidades de material que posteriormente es tratado con el fin de recuperar el mineral de interés económico para la industria. Los residuos generados en este proceso son de gran volumen, llegando a ocasionar alteraciones ambientales cuando no son gestionados adecuadamente. A estos materiales sin valor económico se los denomina residuos mineros masivos, cuya gestión significa una alta inversión para las empresas mineras. La situación se torna más compleja con el tiempo, debido al agotamiento de recursos, lo que ocasiona bajas leyes y como consecuencia, mayor cantidad de residuos generados.

En la Figura 1.1 se muestra la clasificación resumida de los residuos mineros masivos producto de procesos de extracción y tratamiento mineral. Por un lado, se tiene los residuos de los procesos de extracción; residuos que en su composición no tienen mineral de interés o tienen mineral de baja ley que no resulta rentable en la industria. Por otro lado, se encuentran los residuos de tratamiento mineral de los procesos de fundición, lixiviación, entre otros. Los relaves forman parte de este grupo de residuos y provienen de procesos de flotación para recuperación del mineral valioso, este tipo de residuos está compuesto por una mezcla de sólidos y

líquidos depositados en piscinas de grandes magnitudes en cuya composición se encuentran sustancias químicas que resultan contaminantes.



**Figura 1.1 Clasificación de residuos mineros masivos (Ministerio de Minería, 2002).**

#### **1.4.4 Estado de arte**

La reutilización de residuos mineros como agregados de materiales de construcción es un tema innovador y ha sido objeto de diversas investigaciones en diferentes países. En este sentido, se han establecido procedimientos estándar para la fabricación de ladrillos, bloques, tejas y de otros materiales cuyas metodologías de fabricación no han sido definidas, ya que, se encuentran en fase de estudio. A continuación, se presenta algunos casos enfocados en la reutilización de relaves mineros como materiales de construcción (ver Tabla 1.1).

#### **1.4.4.1 Tejas cerámicas**

Se trata del aprovechamiento de residuos provenientes de minas sulfídicas inactivas con presencia de Pb, Zn y Cu ubicadas en Bélgica y Alemania. En el caso de Bélgica, específicamente en la mina Plombières, se evidencia la presencia de óxidos, escorias, arcillas, arenas y alto contenido de carbón. Por otro lado, en el caso de la mina Freiberg ubicada en Alemania, existe la presencia de silicatos y principalmente sulfuros como residuos almacenados en relaveras (Veiga Simão et al., 2021).

Las muestras de residuos obtenidas en cada uno de los casos fueron tratadas en laboratorio previo a su utilización para la fabricación de tejas, de la siguiente manera: secado a 105°C, trituración, caracterización fisicoquímica y mineralógica.

En lo que concierne a la fabricación de tejas, se reemplazó las arenas y arcillas de uso general por 5% de material de relaves y 16% de agua, ya que, debido a que estos residuos son provenientes de minas sulfídicas tienen un alto potencial para la generación de eflorescencia, es decir, que tiende a producir manchas blanquecinas una vez el material haya secado, lo que afecta a la estética de este. Además, la granulometría fue un factor importante ya que, con tamaños de partículas superiores a las 50 micras, las condiciones técnicas de las tejas no se garantizan. La metodología que se siguió en los casos detallados anteriormente corresponde a una mezcla manual o por equipos para luego realizar una extrusión al vacío y ensayos técnicos.

#### **1.4.4.1 Adoquines**

Los materiales de relave utilizados en la fabricación de adoquines fueron obtenidos de la mina “Agroindustrial El Corazón”, localizada en la provincia de Imbabura, cuyas presas de relave presentan silicatos, óxidos y plagioclasas (Calderón, 2020). Para la obtención de adoquines, se realizó ensayos con tres porcentajes diferentes de relave: 30%, 50% y 70% para lo cual se estableció una

proporción entre los materiales principales como lo es cemento, material grueso y fino (1:2:4).

La forma de las probetas de ensayo utilizada fue cilíndrica con un volumen de 0,03 metros cúbicos. Posterior a la obtención y secado de probetas se efectuó ensayos de resistencia dando como resultado que las probetas con mayor resistencia fueron las que contenían 70% de relave en su composición. De esta manera, se estableció el procedimiento que se empleó para la obtención de adoquines: secado del material de relave, proporción de mezclas óptimo (1 cemento: 1 material fino: 2 material grueso: 3 relave), modelado y secado.

#### **1.4.4.2 Bloques y ladrillos**

Para el caso de los bloques, se sustituyó el uso de arena como agregado y en su lugar se colocó 10% de residuos provenientes de minas sulfídicas y 18% de agua. El procedimiento que se realizó fue el mismo que se detalló en la elaboración de tejas (Veiga Simão et al., 2021).

#### **1.4.4.3 Baldosas**

En este caso de estudio, la elaboración de baldosas estuvo sujeta a procesos de encapsulamiento. La metodología se basó en atrapar e inactivar los metales pesados presentes en los relaves utilizados como agregados para la fabricación de baldosas y que tenían potencial en la generación de lixiviados. Previamente, se realizó la caracterización fisicoquímica y mineralógica que permitió obtener una mezcla coloidal compuesta de cemento, cal, agua y material de relave con una significativa presencia de sílice en su composición, mismos que, fueron llevados a moldes y dejados secar por aproximadamente un mes. Los porcentajes óptimos de agregados utilizados fueron: material grueso de 15 a 70%; material fino de 10 a 20%; cemento de 40 a 70%; y cal de 1 a 10% (Romero & Flores, 2010).

**Tabla 1.1 Casos de estudio enfocados en la reutilización de relaves mineros para la construcción de materiales de construcción.**

<b>Caso de estudio</b>	<b>¿Qué se hizo?</b>	<b>¿Cómo?</b>	<b>Observaciones</b>
Bélgica (Plombieres) y Alemania (Freiberg) (Veiga Simão et al., 2021)	Tejas cerámicas	Caracterización fisicoquímica y mineralógica del material de residuos mineros. Se considera 5% en peso de residuo minero. Además, 16% en peso de agua. Para encapsular los sulfatos presentes se utiliza 0.5% de carbonato de Bario	Sólo se utiliza 5% en peso para no producir eflorescencia (manchas blancas) a causa de la presencia de materiales sulfurados
Agroindustria "El Corazón", Ecuador (Calderón, 2020).	Adoquines	Reemplaza el 70% de materia fina por material de relave.	Resistencia a la tracción mayor a 3 MPa y absorción menor al 9%
"La Pituca II", Zamora Chinchipe (Mina de Oro), Ecuador (Paladines, 2016)	Ladrillos (22x11x7) cm	Mezcla de hidróxido de sodio con material de relave	A temperaturas superiores a los 120°C la resistencia a la tracción disminuye ya que el secado se produce más rápido dando paso a la formación de fisuras.
Relaves mineros polimetálicos en Ticapampa, Perú (Romero & Flores, 2010).	Baldosas artesanales	Encapsulamiento de los metales pesados presentes en el material de relave. Mediante la mezcla de cemento, cal, agua y relave se forma una mezcla coloidal misma que es sometida a secado bajo temperatura ambiente por un periodo de 30 días.	14-70% en peso de agregados gruesos, 10-22% en peso de agregados finos, 40-70% en peso de cemento y del 1-10% en peso de cal.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El método de investigación empleado en este trabajo es de tipo descriptivo-experimental, ya que evalúa las características fisicoquímicas y mineralógicas del relave utilizado como agregado para la elaboración de adoquines y los procedimientos a seguir para la obtención de estos. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama metodológico de esta investigación.

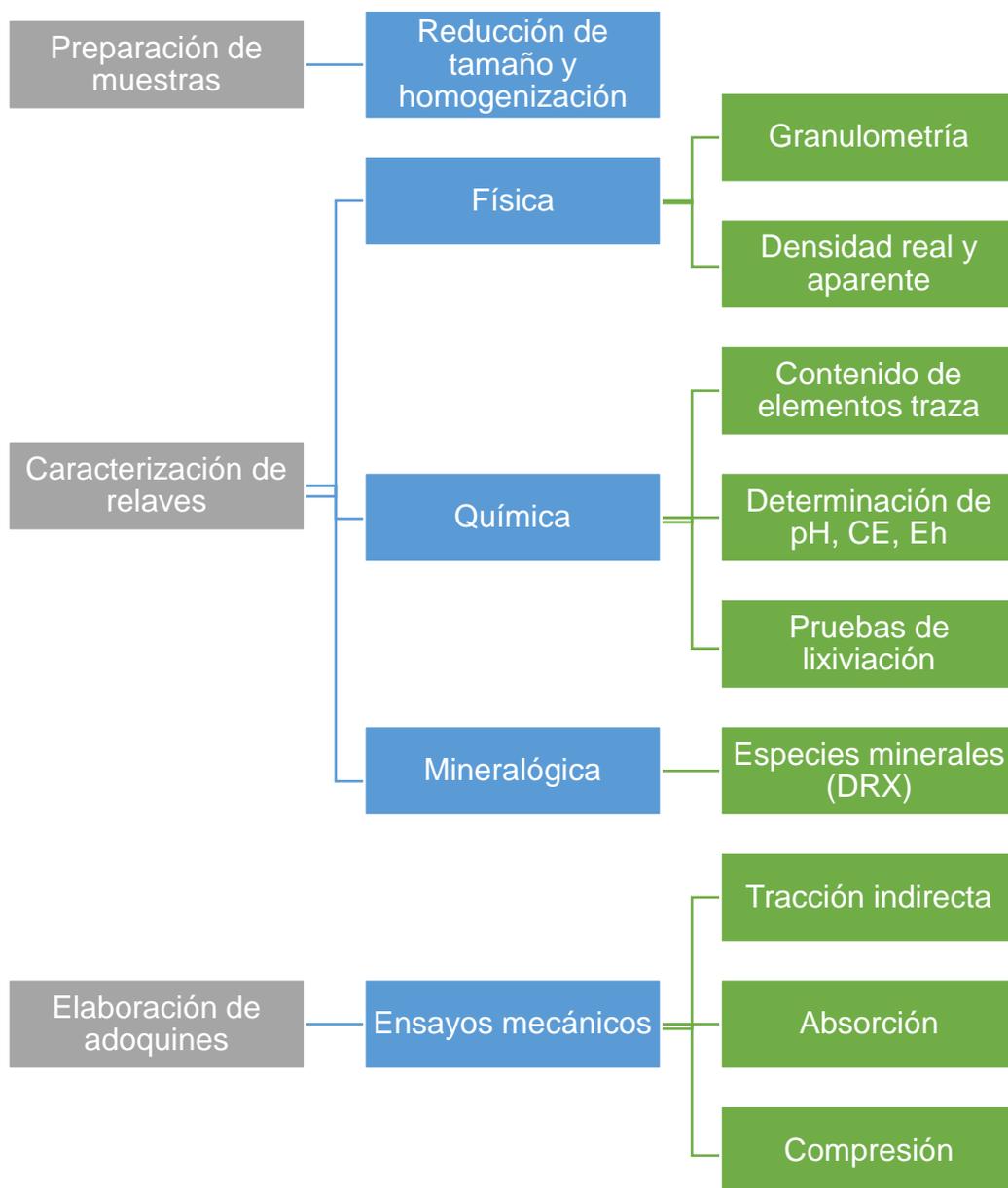


Figura 2.1 Esquema metodológico de la investigación

## 2.1 Acondicionamiento y preparación de muestras

### - Acondicionamiento

Se trabajó con un lote de 219.44 kg de relave los cuales fueron homogeneizados de la siguiente manera:

Se acondicionó un lugar amplio para extender el lote de muestra. Luego, se pasó el material por mallas de 4 y 8 mm para reducción de tamaño de partícula. Con ayuda de un combo y palas manuales como herramientas, se redujo el tamaño del material que se encontraba solidificado a manera de roca para volverlo a pasar por las mallas y lograr la homogenización. Con la utilización de palas, se acondicionó el lote de relave homogeneizado formando un rectángulo cuyas dimensiones se muestran a continuación (Figura 2.2).

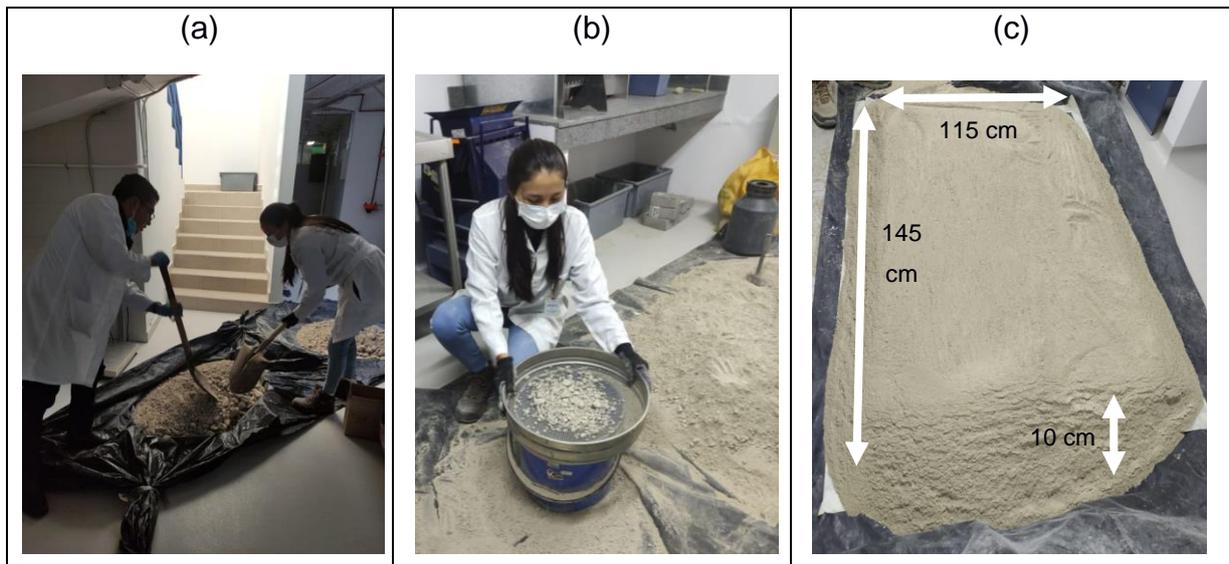


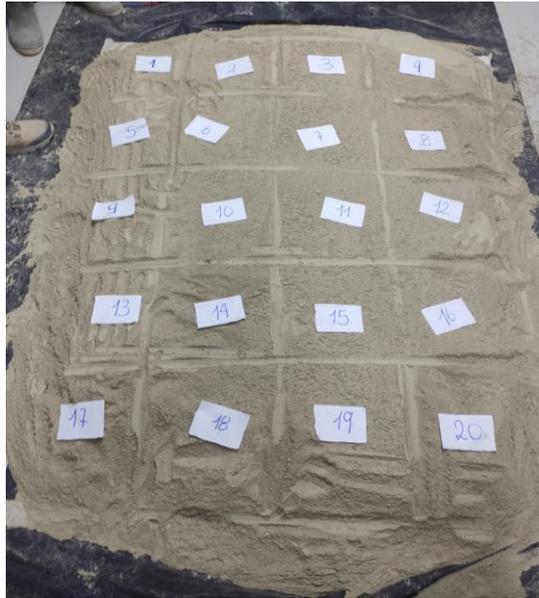
Figura 2.2 (a) Reducción de tamaño de partículas. (b) Cribado de relave. (c) Acondicionamiento de lote de relave homogeneizado.

### - Métodos de muestreo y preparación de muestras

Tomando en consideración que la cantidad de relave disponible no representa grandes cantidades, se puede emplear métodos manuales para la toma de muestras. Por tanto, la metodología empleada para la obtención de muestras se basó en métodos manuales como: división por incrementos y muestreo aleatorio, los cuales se detallan a continuación:

#### División por incrementos

Esta metodología manual, se caracterizó por formar un rectángulo con el material a muestrear. Se realizaron particiones o incrementos a lo largo y ancho de la figura formada. Para este caso en particular, se realizaron 5 particiones a lo largo del rectángulo y 4 a lo ancho del mismo, posteriormente, se enumeró cada uno de los arreglos obtenidos. La siguiente imagen, presenta las particiones realizadas al lote de relave.



**Figura 2.3 Lote homogeneizado con 20 arreglos.**

### **Muestreo aleatorio.**

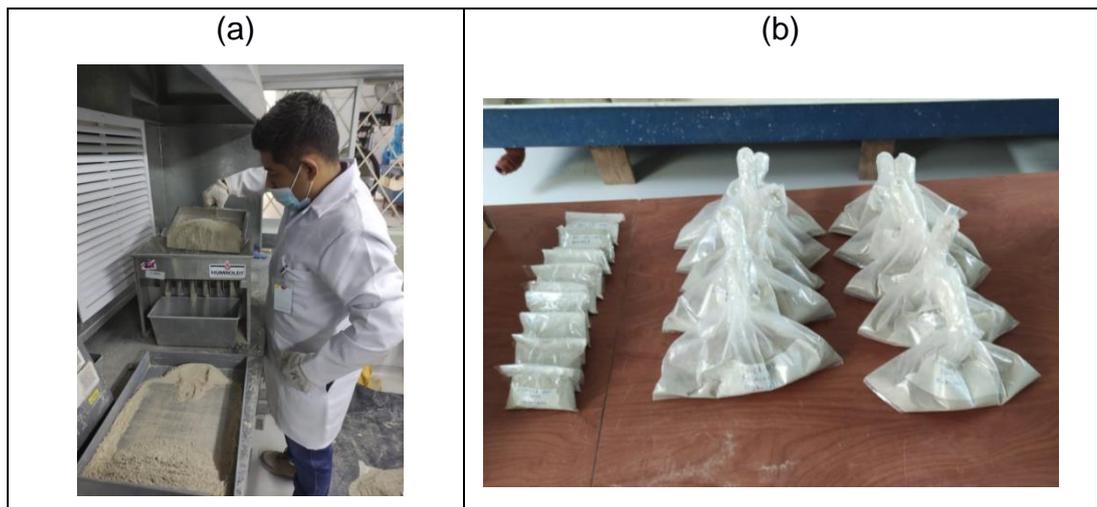
En base al criterio de muestreo aleatorio, se procedió a elegir 10 de las 20 particiones obtenidas en la etapa previa. Las particiones seleccionadas fueron: 15, 3, 14, 16, 10, 20, 8, 12, 7, 17, mismas que fueron tomadas en forma horizontal con una pala manual. Luego, se pesó cada una de las submuestras tomadas, registrando un peso total de 96.82 kg.



**Figura 2.4 Pesaje de las particiones seleccionadas.**

### **Reducción de tamaño de muestra**

Cada una de las diez muestras codificadas que se presentan en el Anexo 1, pasaron por el proceso de reducción de tamaño con la utilización de un divisor de muestra para obtener 500 g de relave, de los cuales, 400 g fueron utilizados para análisis de laboratorio y los 100 g restantes fueron destinados para análisis de lixiviados. Finalmente, se prepararon 10 muestras de 400 g que fueron enviadas para análisis de laboratorio y 10 muestras de 100 g que fueron destinadas para pruebas de lixiviación.



**Figura 2.5 (a) Reducción de tamaño de muestras. (b) Muestras preparadas y etiquetadas.**

## 2.2 Caracterización de las muestras de relaves

Los análisis para la caracterización fisicoquímica y mineralógica de las muestras de relave se realizó en el Laboratorio Químico del IIGE en la ciudad de Quito, Ecuador. Cada una de las 10 muestras de 400 g se sometieron a ensayos de laboratorio que son explicados en los siguientes apartados.

### 2.2.1 Análisis físico

Las muestras ingresadas fueron analizadas por granulometría y densidad real y densidad aparente.

#### - Granulometría

El análisis granulométrico consiste en la separación de partículas en diferentes tamaños ya sea de forma manual o mediante equipos dejando pasar el material por mallas o tamices de diferentes aberturas. En este caso, la granulometría fue realizada en húmedo en base a la Norma ASTM C 117, dejando pasar el relave por las mallas Nro.18, 35, 60, 80, 120, 170, 230, 400. En donde, se tomaron mediciones del pasante y retenido. En el Anexo 2 se presentan los porcentajes promedio de relave pasante según el tamaño de abertura.

#### - Densidad real

El criterio empleado para determinar la densidad real del relave se basó en el método del picnómetro, siendo una metodología sencilla y rápida de aplicar para evaluar la porosidad del material (Ortiz, 2016). La densidad real viene determinada por la siguiente ecuación:

$$\rho_r = \frac{\rho_w * (M_b - M_a)}{(M_b - M_a) - (M_c - d)} \quad \frac{g}{mL} \quad (2.1)$$

Donde:

$\rho_r$ : densidad real en  $\frac{g}{mL}$

$\rho_w$ : densidad del agua a 4°C en  $\frac{g}{mL}$

$M_a$ : peso de picnómetro vacío.

$M_b$ : peso de picnómetro más relave.

$M_c$ : peso de picnómetro más relave y agua.

$M_d$ : peso del picnómetro más agua.

Como parte de la metodología, se secó las 10 muestras por aproximadamente 2 horas y 30 minutos. Luego, se las dejó enfriar a temperatura ambiente por 15 minutos. A continuación, se detallan los equipos y reactivos empleados.

#### **Equipos y reactivos:**

- 1 picnómetro GAILUSSAC BOECO de 25 mL
- 1 balanza analítica.
- 1 cuchara de laboratorio.
- 1 embudo de vidrio.
- Agua destilada.

#### **Procedimiento:**

- Se pesó el picnómetro GAILUSSAC BOECO vacío y seco con su tapón capilar cuya capacidad es de 25 mL, y se registró la masa como  $M_a$ .
  - En un crisol, se pesó 1 g de masa muestra de relave y se trasvasó la muestra al picnómetro mediante un embudo para posteriormente pesar y registrar como  $M_b$ .
  - Se llenó el picnómetro con agua destilada hasta su máxima capacidad, posteriormente, se colocó el tapón y se secó el excedente de agua producto del rebose. Se pesó la masa total y se registró como  $M_c$ .
  - Luego, se desechó la muestra, se lavó el picnómetro y se llenó con agua destilada, se colocó el tapón y se secó el excedente de agua por rebose. Se pesó el picnómetro con agua y se registró su masa como  $M_d$ .
- Se repitió el procedimiento para las 10 muestras.

Los valores de las mediciones y resultados obtenidos para densidad aparente se muestran en el Anexo 3.



**Figura 2.6 (a) Peso del picnómetro seco y vacío. (b) Picnómetro, muestra y agua destilada.**

**- Densidad aparente:**

La densidad aparente es una característica física de fácil cuantificación (De la Torre, 2019) y viene descrita por la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \quad \frac{g}{mL} \quad (2.2)$$

Donde:

$\rho_a$ : densidad aparente  $\frac{g}{mL}$

$M_1$ : masa de la probeta vacía g.

$M_2$ : masa del sólido g.

$V_r$ : volumen de la probeta mL.

El proceso que se siguió consistió en secar aproximadamente 21 kg de relave por 12 horas. Posteriormente, se dejó enfriar las muestras a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 20 minutos. A continuación, se explica el paso a paso para obtención de datos en el cálculo de la densidad aparente.

- Se empleó una probeta de 1000 mL capacidad ( $V_r$ ).
- Se registró la masa de la probeta vacía ( $M_1$ ).
- Se llenó la probeta de la muestra de relave hasta su capacidad máxima.
- Mediante golpes se redujo espacios entre partículas.
- Se pesó y registró la masa del sólido que ocupó el volumen máximo de la probeta ( $M_2$ ).

- El proceso se repitió 10 veces.

En el Anexo 4 se presentan los valores de densidad aparente obtenidos para las 10 muestras.

## **2.2.2 Análisis mineralógico**

El análisis mineralógico del relave se realizó mediante XRD, cuya finalidad fue determinar los minerales presentes en las muestras tomadas. Esto fue posible mediante la identificación de la estructura cristalográfica que caracteriza a cada especie mineral tomando en consideración que, la difracción es un fenómeno producto de la incidencia de ondas de longitudes definidas sobre la superficie de la especie mineral originando que, el haz de luz emitido por los RX sufra una desviación en diferentes direcciones sin producir cambios en la longitud de onda emitida inicialmente lo cual, genera que en ciertas direcciones las ondas se encuentren en la misma fase (Miramira et al., 2016). A esto se conoce como interferencia constructiva, siendo este, el principio en el cual se basa la XRD.

## **2.2.3 Análisis químico**

### **2.2.3.1 Fluorescencia de RX**

Las muestras fueron analizadas por fluorescencia de rayos X mediante el equipo Bruker S8 Tiger. La técnica consistió en emitir energía mediante la emanación de RX hacia las muestras, dicha energía fue transferida y receptada por los átomos de los elementos contenidos lo que originó cambios en los mismos, pasando de estado fundamental a excitado y generando rayos fluorescentes que fueron cuantificados (Requena et al., 2021).

El análisis constó de 3 etapas: calcinación, en donde, las muestras fueron sometidas a temperaturas alrededor de los 1000 °C por un periodo de 2 horas; la siguiente etapa fue de fundición con  $Ba_4Li_2O_7$  dando como resultado un producto para la etapa de perlado en donde se obtuvo una perla como resultado de las etapas anteriores, la cual, fue analizada para determinar la presencia de

elementos mayores. Es importante mencionar que esta técnica permite determinar elementos cuyos rayos emitidos son de alta energía.

#### **2.2.3.2 Análisis de elementos traza**

Los elementos traza fueron analizados mediante ICP-OES por digestión de 4 ácidos por digestión de 4 ácidos. Esta técnica se caracteriza por su alta exactitud y sensibilidad lo que permitió determinar los elementos químicos presentes en los relaves incluyendo tierras raras en bajas concentraciones (Zamora, 2017).

#### **2.2.3.3 Ensayo al fuego**

Se realizó ensayo al fuego para determinar la presencia de oro, esto fue posible mediante la utilización de reactivos específicos que facilitaron la fundición de la muestra que inicialmente se encontró en estado sólido (IIGE, 2020). Se analizó la presencia de oro contenido en el plomo producto de la fundición, aplicando la técnica de absorción atómica (AA) (SGS América Latina, 2021), la cual, se basa en la captación de la radiación de ondas de longitud específica por parte de los átomos. La Ley de Beer cuantifica este proceso a través de la energía que fue captada por la presencia de elementos absorbentes; a mayor energía absorbida mayor es la concentración de elementos absorbentes (Pérez-López & Vargas-Vargas, 2017). Para la determinación de mercurio se empleó vapor frío. Los análisis antes mencionados se realizaron en el Laboratorio Químico del IIGE.

#### **2.2.3.4 Pruebas de lixiviación**

En este estudio se aplicaron dos pruebas de lixiviación (a cada una de las 10 muestras de 100 g, para evaluar el potencial de toxicidad del relave bajo condiciones de laboratorio controladas (García et al., 2015). Los métodos ensayados fueron: método europeo (EN LLT) y método americano (USGS FLT). Con una matriz de agua destilada se simuló condiciones de campo para analizar el contacto del relave con fluidos de baja capacidad amortiguadora como el agua (Guzmán-Martínez et al., 2021). El lixiviado que se obtuvo como resultado en ambas pruebas fue analizado mediante ICP-MS para evaluar la presencia

elementos potencialmente tóxicos en las soluciones cuya matriz fue agua destilada.

Previo a las pruebas de lixiviación se realizó la preparación de los envases. Esto consistió en un lavado con agua destilada realizando 3 enjuagues por cada envase. Luego, los envases fueron secados y etiquetados para su identificación. Además, se realizó un enjuague con una mínima porción de muestra antes de ser introducida en su totalidad, con la finalidad de reducir errores en los resultados.

- **Método de lixiviación europeo (EN LLT)**

En esta metodología se debe mantener una proporción de 10:1 entre muestra de relave y agua destilada (CEN, 2002).

**Equipos y reactivos:**

- 1 balanza analítica.
- 11 vasos de precipitación de 500 mL.
- 1 probeta graduada de 250 mL.
- Multímetro portátil de 3 canales marca HACH.
- Electrodo de pH, conductividad eléctrica y potencial redox.
- Filtros de membrana de 0.45 µm.
- 1 bomba de vacío.
- 11 botellas de plástico de 500 mL.
- 2 embudos de vidrio.
- 4.8 L de agua destilada.
- Ácido nítrico para conservar muestras

**Procedimiento:**

Basados en la metodología planteada, se debe mantener la proporción 10:1 por tanto, la masa de muestra de relave a pesar fue de 40 g y el volumen de agua destilada utilizada fue de 400 mL. En base a esto, se describe la metodología empleada.

Se pesó 40 g de muestra de relave mismas que fueron colocadas dentro de las botellas de plástico con ayuda de un embudo. Después, se midió 400 mL de agua destilada en una probeta misma que fue vertida lentamente en las botellas. Seguidamente, se tapó cada botella y se las llevó a la mesa de agitación a 120 rpm por 24 horas. Posteriormente, se utilizó la bomba al vacío y filtros de 0.45 µm para filtrar los 400 mL de lixiviado de cada una de las botellas en donde, se tomaron mediciones de pH, CE y Eh antes y después de la filtración. Luego, el total de muestra filtrada fue distribuida en botellas de la siguiente manera: 200 mL de lixiviado filtrado destinados para análisis de aniones y los 200 mL restantes fueron conservados con ácido nítrico y enviados a laboratorio para análisis de metales.

- **Metodología de lixiviación americana (USGS FLT)**

En esta metodología se debe mantener una proporción de 20:1 entre muestra de relave y agua destilada (Hageman, 2007).

**Equipos y reactivos:**

- 1 balanza de laboratorio capaz de pesar 50 g de muestra.
- 11 botellas plásticas de boca ancha de 1L.
- 1 probeta graduada de 1000 mL.
- Multímetro portátil de 3 canales marca HACH.
- Electrodo de pH, conductividad eléctrica y potencial redox.
- 11 vasos de precipitación de 500 mL.
- 1 bomba de vacío.
- 2 embudos de vidrio.
- 1000 mL de agua destilada
- Ácido nítrico para conservar muestras.

**Procedimiento:**

Basados en la metodología planteada, se debe mantener la proporción 20:1 por tanto, la masa de muestra de relave a pesar fue de 50 g y el volumen de agua

destilada utilizada fue de 1000 mL. En base a esto, se describe la metodología empleada.

Se pesaron 50 g de muestra de relave mismas que fueron colocadas dentro de las botellas de plástico con ayuda de un embudo. Después, se midió 1000 mL de agua destilada en una probeta misma que, fue vertida lentamente en las botellas. Seguidamente, se tapó cada botella y se agitaron manualmente por 5 minutos, una vez transcurrido este tiempo, se dejaron reposar las muestras por 10 minutos. Posteriormente, se utilizó la bomba al vacío y filtros de 0.45  $\mu\text{m}$  para filtrar los 400 mL de lixiviado de cada una de las botellas en donde, se tomaron mediciones de pH, CE y Eh antes de la filtración. Luego, el total de muestra filtrada fue distribuida en botellas de la siguiente manera: 500 mL de lixiviado filtrado destinados para análisis de aniones y los 500 mL restantes fueron conservados con ácido nítrico y enviados a laboratorio para análisis de metales.

#### - **Parámetros medidos en los lixiviados**

Durante el desarrollo de las pruebas de lixiviación tanto USGS FLT como EN LLT, se utilizó un multímetro portátil de 3 canales para electrodos de pH, conductividad eléctrica (CE) y potencial redox (Eh). Las mediciones fueron tomadas in situ en condiciones de temperatura ambiente.

Previo a la utilización del equipo, se realizó la calibración de los electrodos de pH y CE a través de soluciones estándar. Una vez que se verificó el adecuado funcionamiento de los electrodos, se procedió a tomar mediciones en medio acuoso en cada una de las 10 muestras.

- **pH:** permitió evaluar el grado de acidez, basicidad o neutralidad que presentaron las muestras en cada método de lixiviación. Los valores de pH que se encuentran entre 1 y 6 son considerados básicos, para valores entre 8 y 14 se denominan básicos y para valores muy cercanos a 7 se habla de neutros (Vásquez & Rojas, 2016).
- **Conductividad eléctrica (CE):** fue medida en medio líquido donde se determinó la capacidad de conducción de corriente eléctrica (Sanabria, 2006). Este parámetro está relacionado con la temperatura por lo que, en

este estudio, todas las mediciones fueron realizadas a temperatura ambiente.

- **Potencial REDOX (Eh):** permitió establecer la capacidad de oxidación y reducción de las muestras. Este parámetro estuvo relacionado directamente con el pH medido (Ríos-Mendoza et al., 2003).

### 2.3 Elaboración de adoquines

A continuación, se detalla los materiales y el procedimiento que se siguió para la fabricación de adoquines.

#### **Materiales utilizados:**

- Cemento portland puzolánico Tipo IP.
- Arena de tipo polvo azul
- Agua

#### **Equipos:**

- Vibro prensadora de 2 HP.
- Mezcladora de 10 HP.
- Carretillas
- Palas manuales.

#### **Procedimiento**

Se mezcló 240 kg de polvo azul junto con 25 kg de cemento y aproximadamente 20 litros de agua, para luego ser mezcladas a 33.3 rpm durante 8 minutos. Luego, utilizando palas manuales, se colocó la mezcla en los moldes dentro de la vibro prensadora procurando que todos los espacios sean cubiertos. Posteriormente, se puso en funcionamiento el equipo por 6 segundos distribuidos de la siguiente manera: 2 segundos para asentamiento de material y 4 segundos de prensado para formación de adoquines. Una vez transcurrido ese tiempo, se procedió a sacar los palets con los adoquines elaborados para el proceso de secado. La etapa de secado se distribuyó de la siguiente manera:

- Curado: se humedecieron los adoquines tres veces al día durante 5 días (el número de veces de humedecimiento depende de la humedad presente en el ambiente).

- Fraguado: se dejaron secar los adoquines al ambiente por un periodo de 23 días.

Por tanto, el proceso de secado tuvo una duración de 28 días como lo establece la normativa ecuatoriana NTE INEN 1855-2 (INEN, 2015). Con base en lo descrito, se establecieron variaciones en la cantidad de arena utilizada, ya que esta fue reemplazada por relave como se muestra en la Tabla 2.1. Finalmente, bajo el procedimiento descrito, se obtuvieron 7 palets de 14 adoquines al 50 % cada uno y 5 palets de 14 adoquines al 70% cada uno con medidas de: 22 cm de largo un ancho de 10 cm y 6.5 cm de espesor (Ver Figura 2.7).

**Tabla 2.1 Variación de cantidad de materiales en la fabricación de adoquines.**

		Materiales				
		Arena (kg)	Ripio (kg)	Cemento (kg)	Relave (kg)	Agua (L)
Adoquín tradicional		240	0	25	0	20
Adoquín con relave	50%	40	40	12,5	40	10
	70%	24	28	12,5	56	6.5



**Figura 2.7 Palet de adoquines con relave.**

### **2.3.1 Pruebas de resistencia mecánica**

Los adoquines obtenidos fueron ensayos en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en donde, se utilizaron los equipos de (ver figura 2.8):

- Máquina de ensayos universal marca SHIMADZU
- Prensa de compresión.
- Balanza 6000 marca OHANS SCOUTPRO.

Las pruebas que se aplicaron estuvieron fundamentadas en las normativas:

- NTE INEN 3040 Anexo E. Para resistencia a la tracción indirecta.
- NTE INEN 3040 Anexo D. Para absorción.
- ASTM C140. Para resistencia a la compresión.

En total, se analizó la resistencia de 42 adoquines con composiciones entre 50% y 70% de relave bajo condiciones que rigen en cada normativa.



**Figura 2.8 (a) Ensayo de resistencia a la tracción indirecta. (b) Ensayo de resistencia a la compresión. (c) Ensayo de absorción.**

### **2.3.2 Determinación del potencial contaminante**

Para la determinación del potencial contaminante, se ensayaron 5 adoquines con 50% de relave y 5 adoquines con 70% de relave, los mismos que, fueron triturados hasta un tamaño de partícula menor a 2mm y luego fueron sometidos a pruebas de lixiviación para analizar el potencial contaminante. Para esto se aplicó la metodología EN LLT cuyos materiales y procedimiento se encuentran descritos en el apartado 2.2.3.4.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En los ítems posteriores, se presenta el resultado para cada prueba realizada:

### 3.1 Caracterización física

#### 3.1.1 Granulometría

Las características granulométricas del material de relave fueron definidas sobre las mallas #35, #60, #80, #120, #170 y #230, cuyos resultados de porcentaje pasante y retenido se presentan en el Anexo 2, en donde, según el sistema de clasificación de suelos USCS (ASTM, 1993), se encontraron arenas finas y limo arenosas. Además, el análisis granulométrico permitió construir la curva granulométrica, como se muestra en la Figura 3.1, mediante la cual fue posible determinar el diámetro de partícula ( $d_{80}$ ) que fue igual a 79.75  $\mu\text{m}$ .

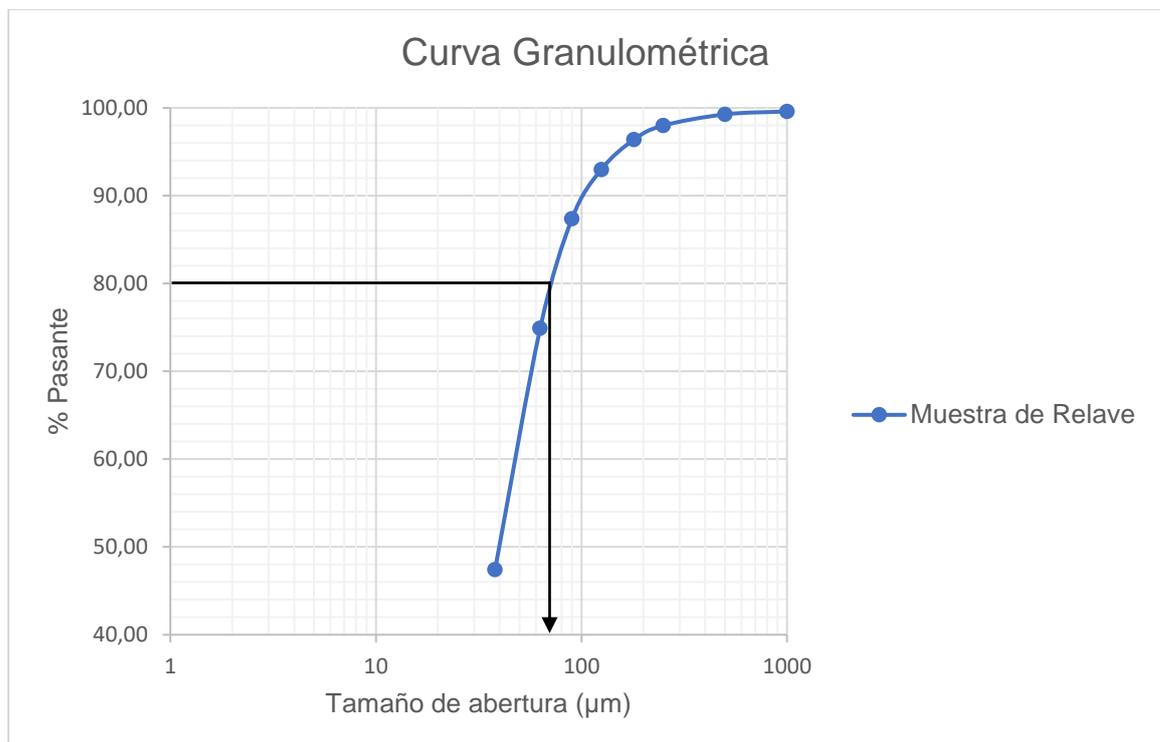


Figura 3.1 Curva granulométrica resultante.

### 3.1.2 Densidad real y aparente

Se determinó la densidad real del relave en muestras secas, encontrándose que se presenta en un rango de 2.23 – 2.68 g/mL con una media igual a 2.40 g/mL y una desviación estándar igual a 0.13 g/mL, mientras que, la densidad aparente se encontró en un rango de 1.73 – 1.58 g/mL con una media igual a 1.69 y una desviación estándar igual a 0.04 g/mL. La densidad aparente se encontró en un rango de 1.73 – 1.58 g/mL con una media igual a 1.69 g/mL y una desviación estándar igual a 0.04 g/mL.

### 3.2 Caracterización mineralógica

El análisis de minerales por XRD permitió visualizar una importante presencia de cuarzo (35.87 %) debido a que, las muestras de relave provienen de yacimientos cuya geología es de tipo skarn. Lo mismo ocurre con la albita y anortita - pertenecientes al grupo de las plagioclasas- y con la andradita, que son minerales característicos en este tipo de yacimientos. En menor porcentajes se encontraron: grupo de epidota, calcita, grupo de K-feldespatos, nontronita, clorita, vermiculita y montmorillonita. En la Figura 3.2 se presenta la distribución de los minerales en las muestras analizadas.

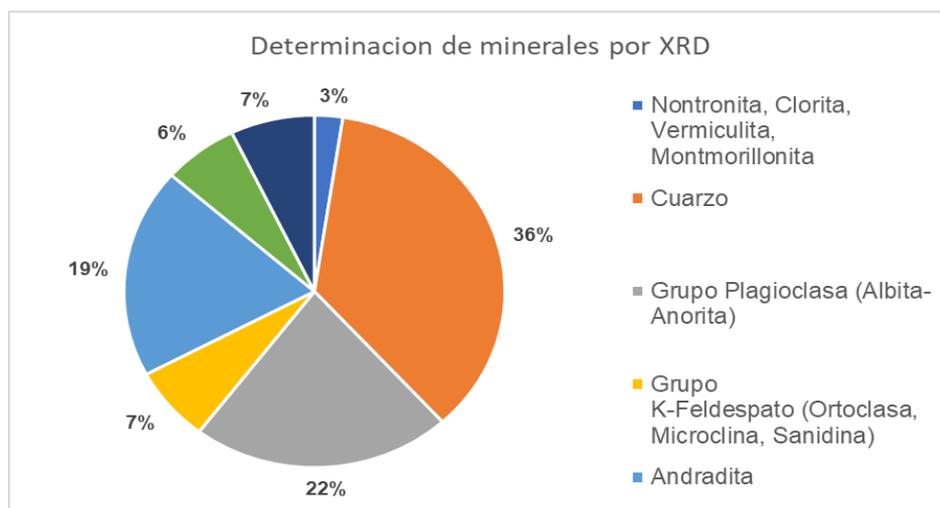


Figura 3.2 Determinación de minerales por XRD.

### 3.3 Caracterización química

Los análisis de caracterización química que se consideraron fueron: contenido de elementos traza, XRF y pruebas de lixiviación bajo la metodología americana y

Europea. En los siguientes ítems, se desarrolla cada uno de los análisis mencionados.

### 3.3.1 Contenido de elementos traza

Los resultados obtenidos permitieron determinar la concentración de los elementos presentes en las muestras de relaves, de los cuales, se obtuvo un promedio que equivale al valor representativo para cada uno de los elementos analizados (ver Tabla 3.1), mismos que fueron comparados en base al Libro VI de Calidad Ambiental TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2015), así como también, la normativa mexicana

Como resultados se obtuvo que solo el Ba, Cr, Cu, Pb y V fueron determinados por el equipo de medición. El contenido del resto de los elementos se encontró por debajo del límite de detección del equipo, siendo estos: As, Cd, Be, Ni y Se. Como se puede observar en la Tabla 3.1 los valores de la concentración de: Ba, Cr, Cu, Pb, V y Zn de las muestras de relave se encuentran por debajo del límite máximo permisible para el uso de suelo industrial, según las concentraciones establecidas en la normativa mexicana en las cuales sólo se considera Ba, Cr, Pb y V. Para el caso del TULSMA, se encontró que los elementos determinados estuvieron por debajo del límite máximo permisible según la normativa, por lo tanto, las muestras no presentan un riesgo potencial.

**Tabla 3.1 Comparación de los contenidos de metales pesados con los valores máximos permisibles en la normativa.**

<b>Límites máximos permisibles para uso de suelo industrial</b>			
Elemento	Concentración, mg/kg	Normativa mexicana, mg/kg	TULSMA, mg/kg
Ba	341.45	67000	2000
Cr	77.27	510	90
Cu	33.47	-	91
Pb	32.83	800	150
V	70.57	1000	130
Zn	164.04	-	360

### 3.3.2 Fluorescencia de rayos X (XRF)

La Tabla 3.2 presenta los resultados del análisis de XRF. Se obtuvieron elementos mayoritarios como:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Para el caso del  $\text{SiO}_2$ , como se esperaba, se obtuvo una alta concentración, ya que en XRD se detectó cuarzo en altas concentraciones. Por otro lado, la concentración de  $\text{CaO}$  se debió a la presencia de calcita detectada por XRD con un 6.38, la misma que al ser sometida a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  sufrió un proceso de descomposición originando  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$  con un 4.36 % de pérdidas por calcinación. Finalmente, la presencia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pudo deberse a la alta concentración de andradita  $(\text{SiO}_4)_3\text{Fe}_2\text{Ca}_3$  (19.27 %) hallada en el relave mediante XRD.

**Tabla 3.2 Determinación de elementos mayoritarios por XRF**

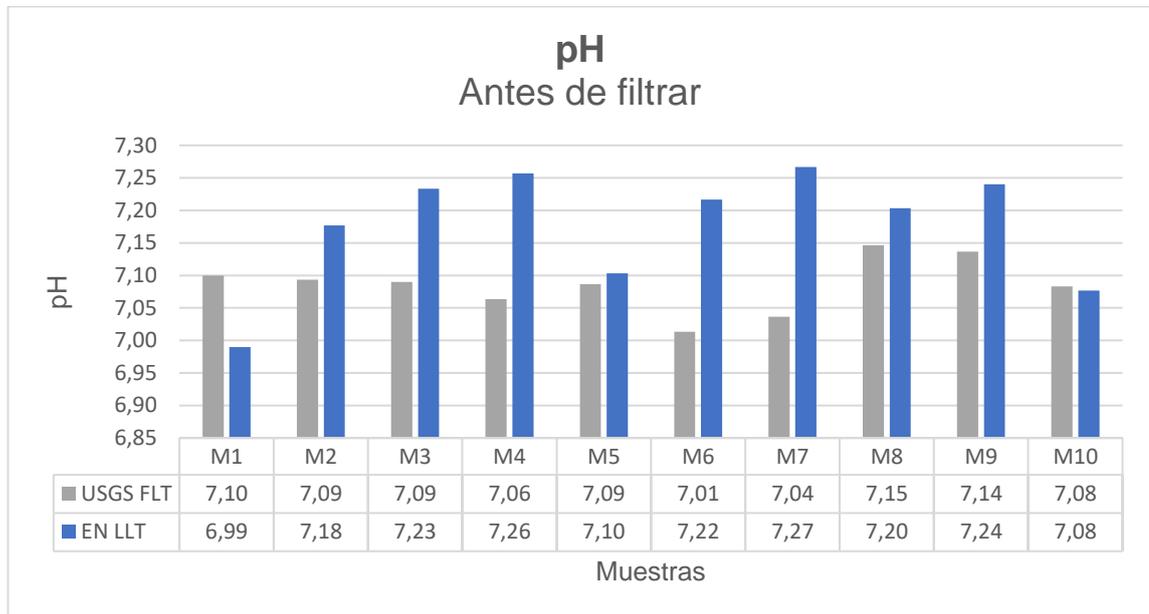
Elemento	Concentración (%)
$\text{Na}_2\text{O}$	0.76
$\text{MgO}$	1.28
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9.09
$\text{SiO}_2$	56.76
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.15
$\text{SO}_3$	0.08
$\text{K}_2\text{O}$	1.91
$\text{CaO}$	12.59
$\text{TiO}_2$	0.65
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11.12
PPC**	4.36

PPC: porcentaje de pérdidas por calcinación a  $1000^\circ\text{C}$

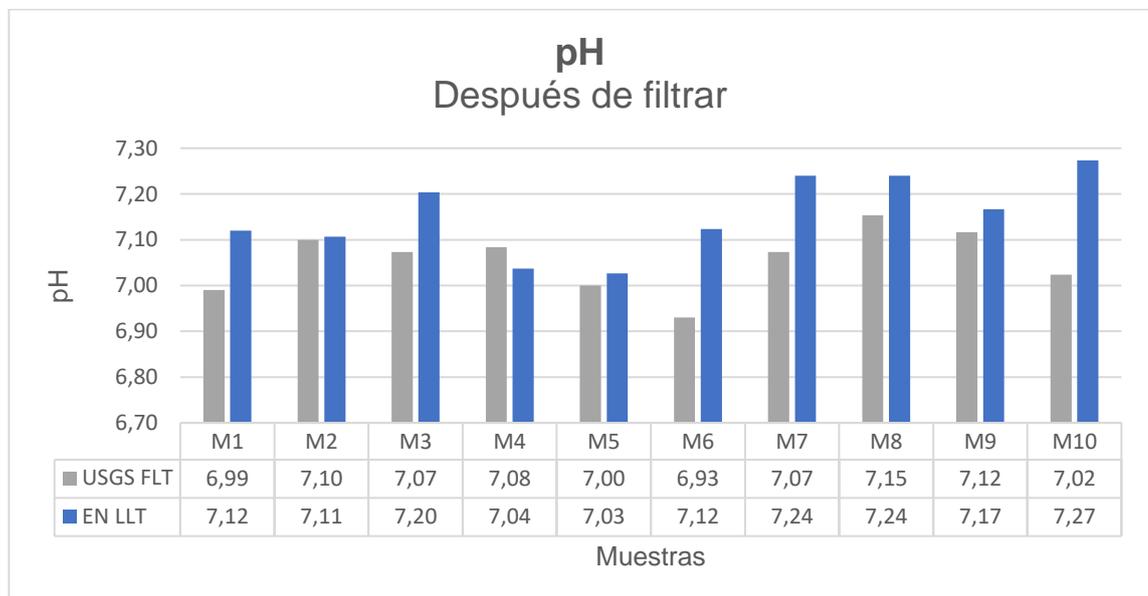
### 3.3.3 Pruebas de lixiviación

Las muestras de relave analizadas arrojaron valores de pH que se encuentran dentro del rango neutral. Además, al comparar los valores de pH antes y después de filtrar entre la metodología USGS FLT y EN LLT (Ver Figura 3.3 y 3.4) se halló un ligero incremento en los resultados obtenidos por el método EN LLT. La explicación a esto podría deberse al tiempo de contacto (agitación) entre el relave y el agua destilada ya que para la metodología EN LLT las muestras permanecieron 24 horas en agitación alcanzando el equilibrio químico, siendo esto, lo que podría haber generado la suspensión de un mayor porcentaje de partículas de relave ocasionando la variación a diferencia de la metodología USGS FLT cuyo tiempo de agitación fue de 5 minutos; sin embargo, los valores que se obtuvieron son menores

a 8 por lo que, se trataron de muestras con pH neutro para las dos metodologías desarrolladas.



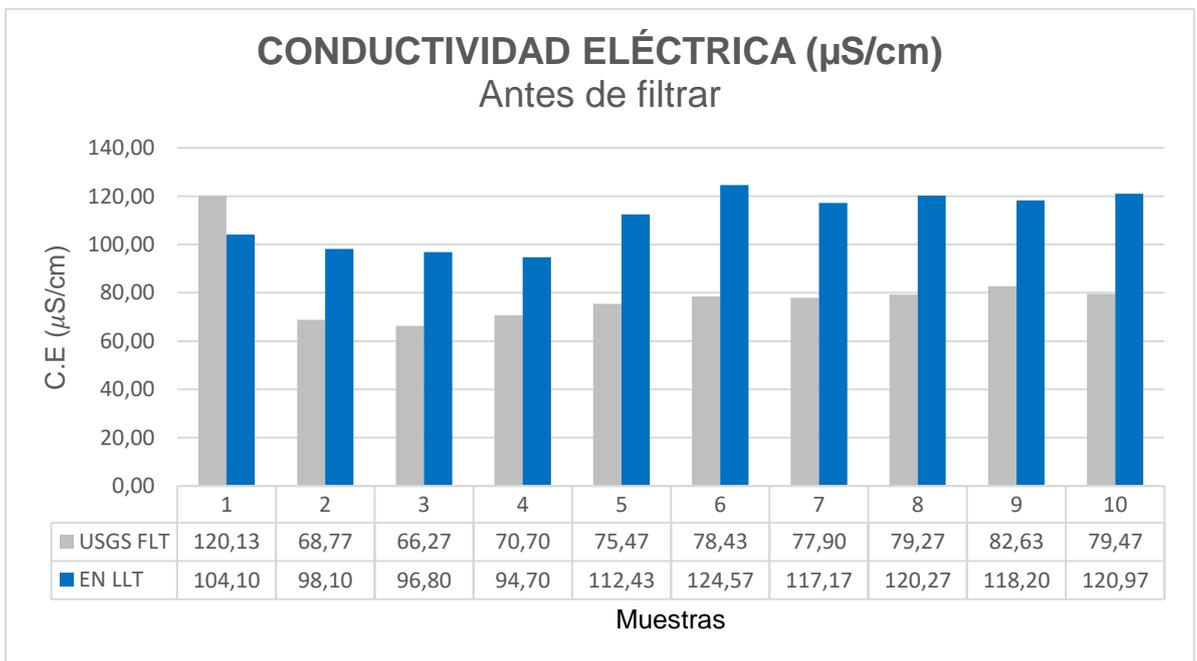
**Figura 3.3 Resultados de pH de las metodologías de lixiviación, antes de filtrar.**



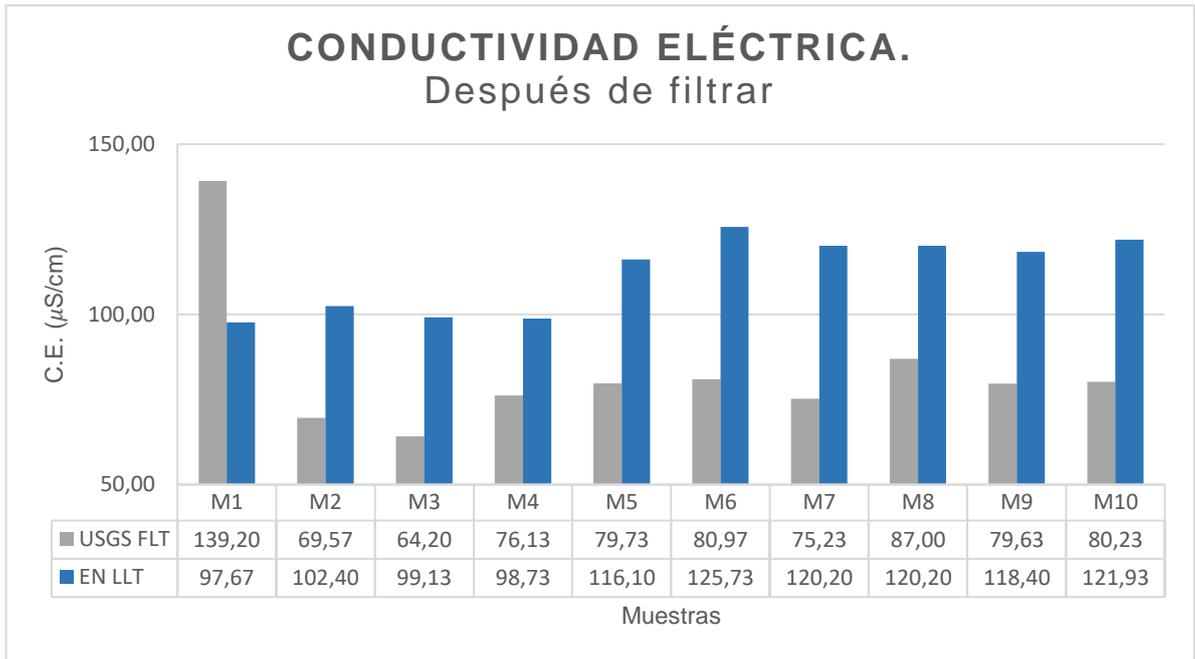
**Figura 3.4 Resultados de pH de las metodologías de lixiviación, después de filtrar.**

Para la conductividad eléctrica, se encontró un hallazgo significativo al comparar los resultados entre las metodologías empleadas. Antes y después de filtrar se obtuvieron valores similares. En la USGS FLT la conductividad eléctrica se

encontró oscilando entre los 68 y 80  $\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$  a excepción de la muestra M1 cuya conductividad eléctrica fue mayor a 120  $\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$  (antes y después de filtrar) mientras que en la metodología EN LLT la conductividad eléctrica alcanzó valores superiores a los 100  $\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$  (Ver Figura 3.5 y Figura 3.6). Al igual que el pH esto podría deberse al tiempo de contacto entre el sólido (relave) y el líquido (agua destilada).

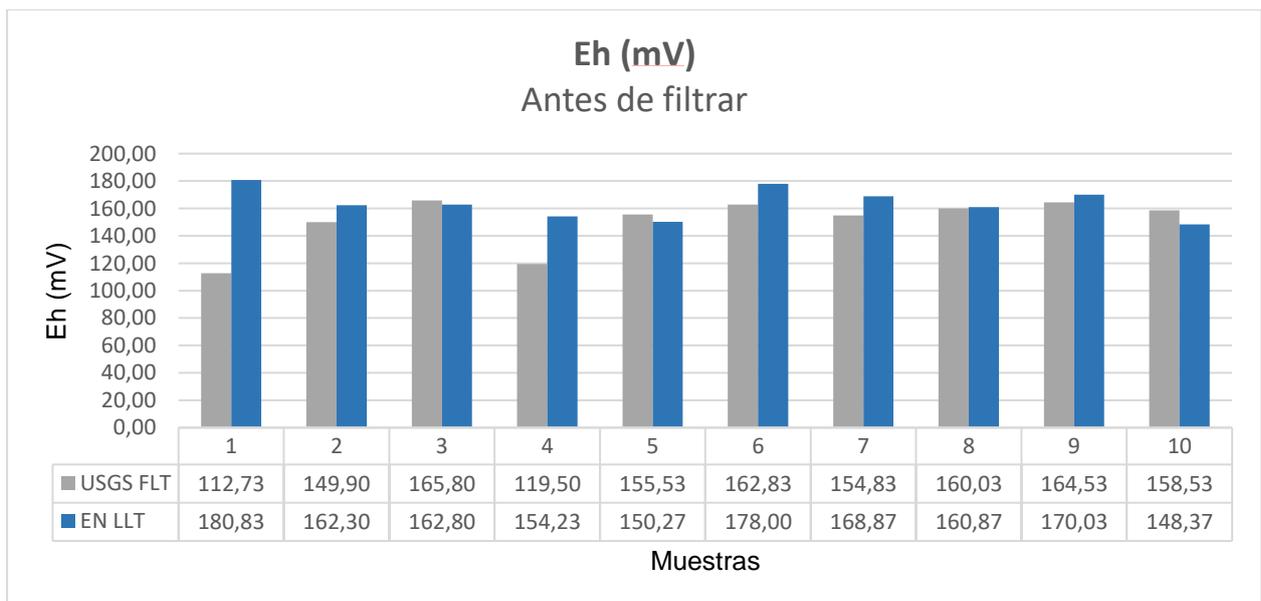


**Figura 3.5 Comparación de resultados de conductividad eléctrica en pruebas de lixiviación, antes de filtrar.**

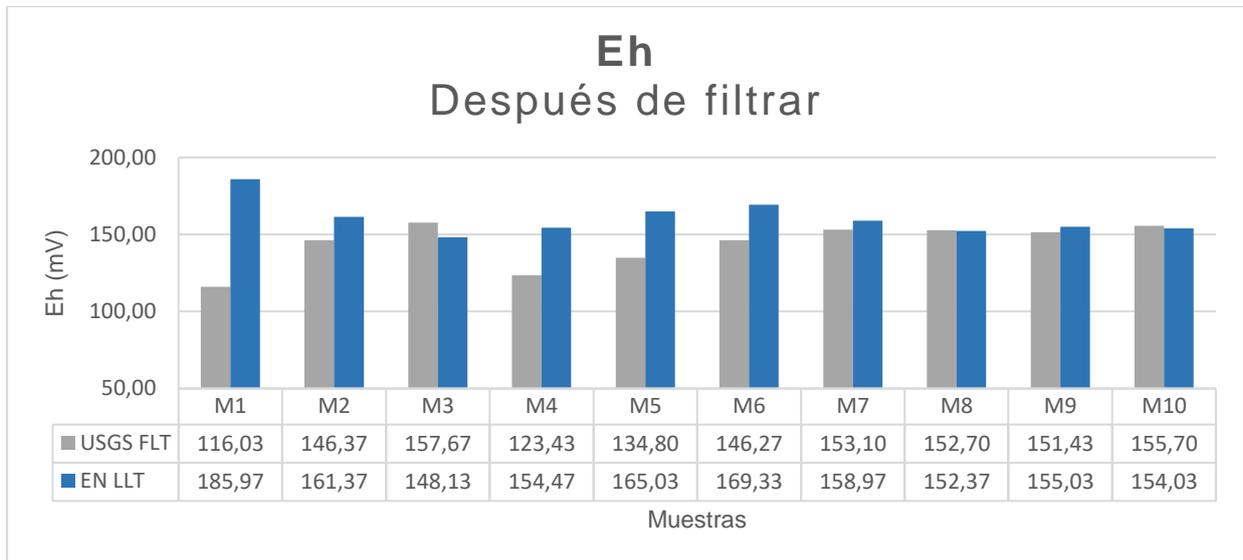


**Figura 3.6 Comparación de resultados de conductividad eléctrica en pruebas de lixiviación, después de filtrar.**

De igual manera, los resultados de Eh para las dos metodologías presentaron similitudes en sus resultados (Ver Figura 3.7 y Figura 3.8), con valores entre 110 mV y 160 mV para la metodología americana tanto antes y después de filtrar y con valores entre 140 mV y 180 mV para la metodología europea. Por tanto, estos valores no varían significativamente con la metodología.



**Figura 3.7 Comparación de resultados de potencial redox en metodologías de lixiviación, antes de filtrar.**



**Figura 3.8 Comparación de resultados de potencial redox en metodologías de lixiviación, después de filtrar.**

Finalmente, el análisis de metales por ICP-MS y determinación de aniones por cromatografía iónica, demostraron que las concentraciones obtenidas tanto para lixiviados por el método USGS FLT y por EN LLT, se hallaron por debajo de los valores límite fijados por la normativa europea para residuos inertes por lo que, no son potencialmente tóxicos. Los resultados de estos análisis se encuentran en el Anexo 5 y Anexo 6.

### 3.4 Elaboración de adoquines

#### 3.4.1 Pruebas de resistencia mecánica

Previo a la realización de los ensayos de resistencia mecánica en los adoquines, se tomaron mediciones de las dimensiones de cada adoquín. En el Anexo 7 se muestra a detalle cada una de las mediciones realizadas. A continuación, los resultados de estos ensayos son mostrados:

- **Resistencia a la tracción indirecta**

El criterio de conformidad para ensayos de tracción indirecta establecido en la normativa NTE-INEN 3040 donde, la resistencia a la tracción indirecta de los adoquines debe ser mayor a 2.90 mega pascales al 0.1 MPa más cercano. Como se puede observar en la Tabla 3.3, los adoquines compuestos por 70% de relave presentan resultados por debajo de la normativa mientras que, dos de los tres adoquines con 50% de relave cumplen con el criterio. Además, la resistencia promedio (2.85 MPa) también se encuentra dentro del rango aceptable en este ensayo en base a lo establecido por la normativa. El detalle de los resultados se muestra en el Anexo 7.

**Tabla 3.3 Resultados de resistencia a la tracción indirecta en adoquines.**

COMPOSICIÓN	CÓDIGO	P (N)	T (MPa)	F (N/mm)
50%	P1	69566.30	2.96	342.69
	P2	66966.20	2.92	329.07
	P3	61468.40	2.67	303.55
PROMEDIO		66000.30	2.85	325.10
70%	P4	37166.10	1.51	183.99
	P5	46177.50	1.97	228.60
	P6	37209.30	1.56	183.30
PROMEDIO		40184.30	1.68	198.63
Sin relave (original)	P17	42981.5	1.8147	212.254
	P18	53753.1	2.2606	264.794
	P19	61802.8	2.6171	305.199

P: carga de tracción indirecta

T: resistencia a la tracción

F: carga a la tracción indirecta por unidad de longitud.

#### - Resistencia a la compresión

La normativa ASTM C140 no establece valores o criterios de conformidad de resistencia a la compresión de adoquines, sino que, establece las condiciones bajo las cuales se deben realizar los ensayos mecánicos. Por tanto, la normativa que se utilizó para la comparación de resultados fue ASTM C936 donde se mencionan los requerimientos físicos para el esfuerzo de rotura, es así como, los adoquines deben presentar valores de compresión mayores a los 55 MPa, sin embargo, como se puede observar en la Tabla 3.4 los adoquines ensayados

presentaron valores por debajo de este criterio. El detalle de estos resultados se muestra en el Anexo 8.

**Tabla 3.4 Resultados de compresión en adoquines**

COMPOSICIÓN	CÓDIGO	Esfuerzo rotura (MPa)
50%	P10	31.59
	P11	22.17
	P12	22.50
70%	P13	20.34
	P14	20.56
	P15	21.01
Sin relave (original)	P16	25.55
	P17	23.52
	P18	19.42

- **Índice de absorción**

Se encontraron valores de índice de absorción por encima del criterio de conformidad establecido en la normativa NTE INEN 3040 (ver Tabla 3.5) donde se fija, como aceptable, valores menores al 6% para el índice de absorción. El detalle de estos resultados se muestra en el Anexo 9.

**Tabla 3.5 Resultados de índice de absorción en adoquines**

COMPOSICION	CÓDIGO	We (%)
50%	P19	7.9
	P20	7.8
	P21	8.2
70%	P22	9.4
	P23	9.6
	P24	9.7
Sin relave (original)	P25	8.0
	P26	7.5
	P27	7.9

We: índice de absorción

Finalmente, los resultados obtenidos tanto para la resistencia a la compresión como el índice de absorción no cumplieron con los criterios de conformidad establecidos en las normativas, esto pudo deberse a una homogenización (mezcla) de los materiales al momento de elaborar los adoquines sumado a un procedimiento empírico ya que, en Ecuador, no existe una normativa que especifique una metodología adecuada para fabricar adoquines, por lo que, este proceso queda sujeto a variaciones.

### 3.4.2 Determinación de potencial contaminante

Como parte de la metodología de lixiviación que se utilizó, se realizaron mediciones de pH, C.E y Eh antes de filtrar cada una de las muestras, cuyos resultados se muestran a continuación:

**Tabla 3.6 Resultados de pH, CE y Eh para lixiviados en adoquines**

% Relave	Método	Código	pH	CE	Eh
50 %	EN LLT	A1	12.09	1424	-41.8
		A2	12.08	1467	-48.37
		A3	11.99	1200.33	-36.07
		A4	12.08	1454.33	-35.97
		A5	11.65	561.00	-8.97
70 %		A6	12.08	1240	-28.17
		A7	12.28	2170.33	-30.2
		A8	11.66	694	-16.73
		A9	12.00	1103.67	-16.83
		A10	11.39	386.33	-1.1

Como se puede observar en la Tabla 3.6 los valores obtenidos en las mediciones para lixiviados de adoquines con relave presentan una notable variación en comparación con las mediciones obtenidas para lixiviados de relaves que se presentan en el apartado anterior. Para el caso del pH se pasó de un rango neutro a uno básico, esto se produjo debido a la presencia de cemento portland que fue empleado para la fabricación de adoquines ya que, está compuesto por portlandita misma que al entrar en contacto con la matriz agua del lixiviado, otorgaba un medio alcalino atribuyéndose también, la alta conductividad y potencial redox negativo ya que se efectuó una reacción de reducción. Sin embargo, estos

resultados no son determinantes para evaluar el potencial contaminante de los lixiviados.

Los resultados de análisis de lixiviados por ICP-MS y cromatografía iónica para analizar el potencial contaminante en los adoquines, se encontraron por debajo del límite máximo permisible por la normativa europea, como se puede observar en la Tabla 3.7 y 3.8, lo que significa que los adoquines pueden sin ocasionar contaminaciones al medio por generación de lixiviados al contacto con agua lluvia.

**Tabla 3.7 Resultados de concentración de metales pesados en lixiviados y comparación con normativa europea**

<b>Concentración de metales en lixiviados por ICP-MS</b>		
<b>Metal</b>	<b>Concentración, mg/l</b>	<b>Valores límite, mg/L</b>
Cr	0.195	0.1
Zn	0.071	1.2
Mo	0.006	0.2
Ba	0.034	4

**Tabla 3.8 Resultados de concentración de aniones por cromatografía iónica**

<b>Concentraciones de aniones por cromatografía iónica</b>		<b>Valores límite, mg/L</b>
<b>Anión</b>	<b>Concentración, mg/l</b>	
<b>F<sup>-</sup></b>	0.096	2,5
<b>Cl<sup>-</sup></b>	1.222	460
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	9.246	1500

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

En este proyecto de investigación, las características físicoquímicas y mineralógicas de relaves mineros provenientes de procesos gravimétricos de la concesión minera “Campanillas” permitieron evaluar la factibilidad de utilizar los relaves como agregados de construcción en la fabricación de adoquines: evaluando el potencial generador de drenaje ácido y la resistencia mecánica del producto final concluyendo lo siguiente:

- La caracterización física de las muestras de relave analizadas, corresponden a arenas finas y limo arenosas con tamaños de partícula típicos de los depósitos de relave. Además, los resultados de difracción de rayos X mostraron un 36% de cuarzo presente en las muestras, siendo esta la especie mayoritaria. En menor proporción se encontraron: grupo plagioclasa, grupo k-feldespato, nontronita, clorita, vermiculita, montmorillonita, calcita y andradita cuyas concentraciones fueron bajas. Sin embargo, la calcita a pesar de encontrarse en bajas concentraciones influyó en la presencia de óxido de calcio y junto con el cuarzo, en la determinación de pH en las muestras de relave.
- Los resultados de las pruebas de lixiviación bajo las metodologías USGS FLT y EN LLT para relaves y adoquines demostraron bajas concentraciones de metales pesados en los lixiviados, incluso se reflejaron metales con concentraciones que no pudieron ser detectadas por los equipos ya que eran muy bajos, por lo que, el material de relave no es tóxico. Además, estos resultados no reflejaron variaciones significativas entre ambas metodologías en torno a las mediciones de pH, conductividad eléctrica y potencial redox, siendo la metodología USGS FLT la más sencilla de aplicar debido a su corto tiempo de agitación.
- De acuerdo con los resultados de resistencia mecánica, los adoquines con 50% de relave cumplen con la normativa NTE INEN 3040 para la resistencia a la tracción

indirecta, sin embargo, se encuentran fuera de los criterios de conformidad de compresión y absorción. A pesar de esto, los adoquines con 50% presentan resultados óptimos en comparación con los adoquines originales (sin relave) con valores de resistencia, compresión y absorción similares, esto, sumado a que no son tóxicos los convierte en materiales aptos para ser empleados en la industria de la construcción.

- El desarrollo de esta investigación demuestra la factibilidad técnica y ambiental en torno a la reutilización de relaves mineros producto del procesamiento mineral para ser empleados en la elaboración de adoquines como una solución al problema de disposición final de los residuos mineros. De esta manera, se logra una reducción de generación de relaves mineros, sin causar alteraciones en el medio ambiente, incentivando una economía circular y fomentando una industria minera sostenible.

#### **4.2 Recomendaciones**

- En la fabricación del adoquín, se sugiere homogeneizar completamente los materiales para lograr la compactación y evitar su separación en el producto final.
- En cuanto al porcentaje de relave a utilizar, se recomienda emplear porcentajes menores al 50% para adoquines rectangulares con la finalidad de obtener mejores resultados en cuanto a las propiedades mecánicas.
- Se sugiere considerar la misma composición de relave utilizadas en este proyecto para fabricar adoquines de forma diferente (no rectangular) con la finalidad de aumentar el área de tracción y analizar la variación de propiedades mecánicas.

# BIBLIOGRAFÍA

Appleton, J., Carrasco, M., Maldonado, R., & Orbea, H. (1996). *Assessment of mercury contamination in the Ponce Enriquez artisanal gold mining area, Ecuador.*

ASTM. (1993). *Clasificación de suelos para propósitos de Ingeniería.*

Barba , J., Aguilar , S., Flores , M., Angamarca, D., Rendón , M., Tipantiza , L., . . . Valencia , D. (2017). *Estudio de impacto ambiental ex post y plan de manejo ambiental para la fase de exploración y explotación simultánea bajo el régimen de pequeña minería de la concesión minera Campanillas.* Estudio de Impacto Ambiental.

BCE (2019). *Reporte de Minería.*  
<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero072019.pdf>

Calderón, J. F. (2020). *Desarrollo de adoquines, a partir de relaves de mina de la empresa minera “Agro-Industrial el Corazón.”*  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21255>

Carling, G. T., Diaz, X., Ponce, M., Perez, L., Nasimba, L., Pazmino, E., Rudd, A., Merugu, S., Fernandez, D. P., Gale, B. K., & Johnson, W. P. (2013). Particulate and dissolved trace element concentrations in three southern Ecuador rivers impacted by artisanal gold mining. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(2).  
<https://doi.org/10.1007/s11270-012-1415-y>

Cerón, A. M., & Gutiérrez, C. (2019). *Elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto utilizando relaves provenientes de la minería de agregados.*

CEN. (2002). *Characterization of waste-leaching-compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. - Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction).*

Diario La Hora. (2019, April 11). *El 88% de las plantas de beneficio minero han sido inspeccionadas en todo el país.* Noticia. <https://lahora.com.ec/noticia/1102235693/el-88-de-las-plantas-de-beneficio-minero-han-sido-inspeccionadas-en-todo-el-pais>

Escobar-Segovia, K., Jiménez-Oyola, S., Garcés-León, D., Paz-Barzola, D., Chávez Navarrete, E., Romero-Crespo, P., & Salgado, B. (2021). Heavy Metals in rivers affected by mining activities in Ecuador: pollution and human health implications. *WIT Transactions on Ecology and the environment*, 250.

García Arreola M.E., Soriano-Pérez S.H., Flores Vélez L.M., Cano Rodríguez I., and Alonso Dávila P.A. 2015. "COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN ESTÁTICOS DE ELEMENTOS TÓXICOS EN RESIDUOS MINEROS." *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14 (October): 109–17.

Guzmán-Martínez, Fredy, Julio C. Arranz-González, María J. García-Martínez, Marcelo F. Ortega, Virginia Rodríguez-Gómez, and Samantha Jiménez-Oyola. 2021. "Comparative Assessment of Leaching Tests According to Lixiviation and Geochemical Behavior of Potentially Toxic Elements from Abandoned Mining Wastes." *Mine Water and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00800-3>.

Hageman, P. L. (2007). *U.S. Geological Survey Field Leach Test for Assessing Water Reactivity and Leaching Potential of Mine Wastes, Soils, and Other Geologic and Environmental Materials Techniques and Methods 5-D3*. <http://www.usgs.gov/pubprod>

Huacho, S. R., & la Fuente, J. A. J. (2021). *Modelo de mejora del sostenimiento con shotcrete mediante la activación alcalina de relaves en una mina subterránea del Perú*. <http://hdl.handle.net/10757/656610>

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2020). "Análisis químico para la determinación de oro" por el método de ensayo al fuego. In *Dirección de Servicios Especializados* (pp. 1–14). [https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/instructivo\\_analisis\\_quimico\\_para\\_la\\_determinacion\\_de\\_oro\\_por\\_el\\_metodo\\_de\\_ensayo\\_al\\_fuego\\_2020.pdf](https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/instructivo_analisis_quimico_para_la_determinacion_de_oro_por_el_metodo_de_ensayo_al_fuego_2020.pdf)

INEN. (2015). *Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos*.

Litherland, M. , A., & J. A. & Jemielita, R. A. (1997). The Metamorphic Belts of Ecuador. *Geological Magazine*, 134(6), 877–883. <https://doi.org/10.1017/s0016756897297657>

Jiménez-Oyola, S., García-Martínez, MJ., Ortega, M.F. et al. Ecological and probabilistic human health risk assessment of heavy metal(loid)s in river sediments affected by mining activities in Ecuador. *Environ Geochem Health* 43, 4459–4474 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00935-w>

Ministerio de Minería. (2002). *Gestión de Residuos Industriales Sólidos Mineros y Buenas Prácticas*.

Ministerio de Energía y Minas Ecuador. (1998). *Monitoreo ambiental de las áreas mineras en el sur de Ecuador*.

Miramira, B., Vilcapoma, L., & Jacay, J. (2016). *Caracterización mineralógica y elemental de sedimentos sólidos de la laguna de Yantac, departamento de Junín, provincia de Yauli, distrito de Marcapomacocha, por difracción y fluorescencia de rayos X Mineralogical characterization and elementary sediment solid lake Yantac department Junín, province Yauli, Marcapomacocha district xy ray diffraction by x-ray fluorescence*. 19, 91–96.

Ortiz, D. (2016). *Fundamentos y procedimientos para análisis físico morfológicos de suelos* (Zambrano Lozano Karina, Herrera Borja Amarilis, & Cabezas Samanta, Eds.; Primera edición). Ediciones UTMACH.

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/10690/1/FUNDAMENTOS%20Y%20PROCEDIMIENTOS.pdf>

Paladines, J. P. (2016). *Fabricación de ladrillos a base de lodos de relaves de minas*. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/15897>

Pérez-López, E., & Vargas-Vargas, A. (2017). Indagación de dos metodologías analíticas para cuantificar oro en soluciones cianuradas, en industria de dispositivos electrónicos en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 30(2), ág. 105-127. <https://doi.org/10.18845/TM.V30I2.3202>

Requena, A., Cruz, C., Bastida, A., & Zúñiga, J. (2021). *La Aventura del Láser*. <https://www.um.es/LEQ/laser/index.htm>

Ríos-Mendoza, L. M., Macías-Zamora, J. V., & Zirino-Weiss, A. R. (2003). Iridio: Una opción para medir el potencial redox. *Ciencias Marinas*, 29(4), 509–520. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-38802003000400013&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802003000400013&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de La Facultad de Ingeniería Industrial*, 75–82.

Sanabria, D. (2006). *Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas*.

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4#:~:text=La%20conductividad%20es%20una%20medida,la%20temperatura%20de%20la%20medici%C3%B3n>

SEMARNAT. (2007). *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004*.

SGS América Latina. (2021). *Au, Pt, Pd mediante ensayos con fuego* | SGS América Latina. <https://www.sgs-latam.com/es-es/mining/analytical-services/geochemistry/precious-metals/au-pt-pd-by-fire-assay>

Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Fredriksson, G., Lane, S., Lundberg, B., & Sangfors, O. (2000). Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador: Implications for the setting of environmental standards and for the management of small-scale mining operations. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(8), 484. [https://doi.org/10.1639/0044-7447\(2000\)029\[0484:eiossa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1639/0044-7447(2000)029[0484:eiossa]2.0.co;2)

Vásquez, E., & Rojas, T. G. (2016). *pH: Teoría y 232 Problemas* (Universidad Autónoma Metropolitana, Ed.; Primera edición). Universidad Autónoma Metropolitana.

<http://www.cua.uam.mx/pdfs/conoce/libroselec/17pHTeoriayproblemas.pdf>

Veiga Simão, F., Chambart, H., Vandemeulebroeke, L., & Cappuyens, V. (2021). Incorporation of sulphidic mining waste material in ceramic roof tiles and blocks. *Journal of Geochemical Exploration*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106741>

Velasco Valarezo, J. (2016). *Proyecto Minero "Nory Gold" Código 501412*.

Zamora, R. (2017). Ventajas y desventajas del análisis por ICP-MS de metales pesados en muestras biológicas. In *BOLETÍN INSTITUCIONAL Bol Inst Nac Salud* (Vol. 23, Issue 8, pp. 54–59). <https://boletin.ins.gob.pe/wp-content/uploads/2017/A%C3%B1o23N7-8/6Articulo.pdf>

# **ANEXOS**

### Anexo 1. Datos de muestreo por incrementos y aleatorio

Código	Peso del incremento kg	Peso para análisis de laboratorio g	Fecha de muestreo	Peso de muestreo para lixiviados	Fecha de muestreo
M1	13,08	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M2	9,54	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M3	9,06	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M4	13,06	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M5	9,66	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M6	10,16	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M7	11,36	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M8	7,00	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M9	7,70	400	8/11/2021	100	9/11/2021
M10	6,20	400	8/11/2021	100	9/11/2021

### Anexo 2. Porcentaje retenido y pasante de relave

Nro. De malla según ASTM	Tamaño de abertura (µm)	% Retenido	% Pasante
# 18	1000	0.30	99.60
# 35	500	0.33	99.27
# 60	250	1.27	98.00
# 80	180	1.60	96.40
# 120	125	3.39	93.01
# 170	90	5.60	87.40
# 230	63	12.50	74.90
# 400	38	26.86	47.45
Fondo	-38		

### Anexo 3. Mediciones de densidad real

Código	Densidad g/mL
M1	2.29
M2	2.37
M3	2.45
M4	2.27
M5	2.48
M6	2.47
M7	2.54
M8	2.69
M9	2.23
M10	2.27

#### Anexo 4. Mediciones de densidad aparente

Código	Densidad
M1	1.73
M2	1.59
M3	1.74
M4	1.66
M5	1.72
M6	1.62
M7	1.70
M8	1.71
M9	1.73
M10	1.73

#### Anexo 5. Comparación de resultados de concentraciones de metales en lixiviados

Concentraciones de metales en lixiviados por ICP-MS			Valores límite de lixiviación para residuos inertes
Metal	Método americano (USGS)	Método europeo (EN LLT)	
		Concentración, mg/l	Concentración, mg/l
Mn	0.375	0.3533	-
Cu	-	0.0069	0.6
Zn	0.028	0.0266	1.2
Sr	0.011	0.0172	-
Ba	0.004	0.0059	4
Na	1.038	1.9783	-
Mg	0.331	0.5646	-
K	1.288	2.6154	-
Ca	14.663	17.0669	-

#### Anexo 6. Comparación de resultados de concentración de aniones en lixiviados.

Determinación de iones por cromatografía iónica			Valores límite de lixiviación para residuos inertes
Anión	Método americano (USGS)	Método europeo (EN LLT)	
		Concentración, mg/l	Concentración, mg/l
F <sup>-</sup>	0.124	0.1207	2.5
Cl <sup>-</sup>	8.394	14.4635	460
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5.787	15.3549	1500

**Anexo 7. Resultados de ensayo de tracción indirecta realizada en adoquines**

<b>ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (REF: NTE-INEN 3040 ANEXO E)</b>													
<b>COMPOSICIÓN</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>l1 (mm)</b>	<b>l2 (mm)</b>	<b>l (mm)</b>	<b>t1 (mm)</b>	<b>t2(mm)</b>	<b>t3 (mm)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>S (mm²)</b>	<b>k</b>	<b>P (N)</b>	<b>T (MPa)</b>	<b>F (N/mm)</b>
50%	P1	201	205	203	68	66.6	67	67.2	13641.60	0.91	69566.30	2.96	342.69
	P2	202	205	203.5	65.6	65.4	64.8	65.3	13288.60	0.91	66966.20	2.92	329.07
	P3	201	204	202.5	65.5	65.6	66.7	65.9	13344.80	0.91	61468.40	2.67	303.55
<b>PROMEDIO</b>		<b>201.333</b>	<b>204.67</b>	<b>203</b>	<b>66.3667</b>	<b>65.86667</b>	<b>66.167</b>	<b>66.13333</b>	<b>13425.00</b>	<b>0.91</b>	<b>66000.30</b>	<b>2.85</b>	<b>325.10</b>
70%	P4	200	204	202	70.4	69.6	71.3	70.4	14220.80	0.91	37166.10	1.51	183.99
	P5	200	204	202	68.7	66.8	66.3	67.3	13594.60	0.91	46177.50	1.97	228.60
	P6	201	205	203	68.4	67.8	68.6	68.3	13864.90	0.91	37209.30	1.56	183.30
<b>PROMEDIO</b>		<b>200.333</b>	<b>204.33</b>	<b>202.333</b>	<b>69.1667</b>	<b>68.06667</b>	<b>68.733</b>	<b>68.65556</b>	<b>13893.43</b>	<b>0.91</b>	<b>40184.30</b>	<b>1.68</b>	<b>198.63</b>
Sin relave (original)	P7	200	205	202.5	67.9	67.9	67.7	67.8	13729.50	0.91	42981.50	1.81	212.25
	P8	202	204	203	67,9	67.7	68.2	67.9	13783.70	0.91	53753.10	2.26	264.79
	P9	202	203	202.5	67.1	67.9	67.8	67.6	13689.00	0.91	61802.80	2.62	305.20
<b>PROMEDIO</b>		<b>201.3</b>	<b>204.0</b>	<b>202.7</b>	<b>67.6</b>	<b>67.8</b>	<b>67.9</b>	<b>67.8</b>	<b>13734.1</b>	<b>0.9</b>	<b>52845.8</b>	<b>2.2</b>	<b>260.7</b>

t: ancho; l: largo; S: área de tracción; K: factor de corrección; P: carga a la tracción indirecta; T: resistencia a la tracción indirecta; F: carga a la tracción por unidad de longitud

**Anexo 8. Resultados de ensayo de compresión realizada en adoquines**

<b>ENSAYO DE COMPRESIÓN (REF: ASTM C140, ASTM C936)</b>
---

COMPOSICIÓN	CÓDIGO	a1 (mm)	a2 (mm)	a3 (mm)	a (mm)	l1 (mm)	l2(mm)	l3 (mm)	l (mm)	Área (mm²)	Carga de rotura (kN)	Esfuerzo rotura (MPa)	Esfuerzo rotura (kg/cm²)
50%	P10	100.5	100.9	100.4	100.6	202	204	203	203.0	20421.80	645.10	31.59	322.11
	P11	101	102.3	102	101.8	203	202	202	202.3	20590.79	456.40	22.17	226.02
	P12	101.2	102.8	103.1	102.4	201	202	202	201.7	20643.94	464.40	22.50	229.39
70%	P13	101.3	102.7	102.9	102.3	203	204	204	203.7	20835.10	423.70	20.34	207.36
	P14	101.4	103.1	101.6	102.0	203	202	202	202.3	20644.74	424.50	20.56	209.67
	P15	100.9	102.9	102.9	102.2	202	204	204	203.3	20787.44	436.80	21.01	214.27
Sin relave (original)	P16	100.6	100.8	100.9	100.8	202	203	203	202.7	20422.04	521.70	25.55	260.49
	P17	102.5	103.5	102.2	102.7	203	203	203	203.0	20854.87	490.60	23.52	239.88
	P18	100	101.2	101	100.7	201	201	201	201.0	20247.40	393.30	19.42	198.07

a: ancho; l: largo

### Anexo 9. Resultados de índice de absorción en adoquines

ENSAYO ÍNDICE DE ABSORCIÓN (REF: NTE INEN 3040)											
COMPOSICION	CÓDIGO	Mr (g)	M13 d (g)	M14d (g)	ΔM1 (g)	Comprobación M1(%) <0,1%	M23 d (g)	M24d (g)	ΔM2 (g)	Comprobación M2 (%) <0,1%	We (%)
50%	P19	2969.8	3098.5	3099.1	3098.8	0.019	2872.7	2871.5	2872.1	0.04	7.9

	P20	2979.9	3110.5	3110.9	3110.7	0.013	2886.2	2885.9	2886.05	0.01	7.8
	P21	3057.5	3169	3169.5	3169.25	0.016	2929.3	2928	2928.65	0.04	8.2
70%	P22	2915.7	3074.5	3074.3	3074.4	0.007	2811.9	2810.4	2811.15	0.05	9.4
	P23	2968.3	3116.9	3117	3116.95	0.003	2844.2	2843	2843.6	0.04	9.6
	P24	2914.4	3082.1	3081.9	3082	0.006	2810.7	2808.5	2809.6	0.08	9.7
Sin relave (original)	P25	2989.5	3145.8	3146.6	3146.2	0.025	2915.1	2913.5	2914.3	0.05	8.0
	P26	2842.3	2999	2999.4	2999.2	0.013	2789.6	2787.8	2788.7	0.06	7.5
	P27	2937.8	3109.5	3110.5	3110	0.032	2881.8	2881.2	2881.5	0.02	7.9

Mr: masa como recibe; M1: masa saturada; M2: masa seca; We: índice de absorción