



1859

UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales
no Renovables.

Maestría en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

**Aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de
adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio
Alto Vizcaya.**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Magíster en
Minas, Mención Mineralurgia y
Metalurgia Extractiva.

AUTOR:

Ing. Diego Esteban Morocho Piedra.

DIRECTOR:

Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg. sc.

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 25 de abril de 2023

Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya**, de autoría del estudiante **Diego Esteban Morocho Piedra**, previo a la obtención del título de **Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Diego Esteban Morocho Piedra**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación del Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1105007353

Fecha: 02 de mayo de 2023

Correo electrónico: diegomorocho091@gmail.com

Teléfono: 0988473774

Carta de autorización por parte del autor, para la consulta, reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Diego Esteban Morocho Piedra**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya**. como requisito para optar el título de **Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los dos días del mes de mayo del dos mil veintitrés.

Firma:

Autor: Diego Esteban Morocho Piedra

Cédula: 1105007353

Dirección: Calle Sucre y Miguel Vaca (Saraguro)

Correo electrónico: diegomorocho091@gmail.com

Teléfono: 0988473774

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc.

Dedicatoria

A Dios por ser quien guía e ilumina mi vida, a mi esposa e hijos por darme el tiempo necesario e inspirarme para seguirme profesionalizando en la rama de las geociencias, a mi padre Jorge Rodrigo Morocho Mendoza quien sigue siendo mi apoyo incondicional y estar pendiente de la prosperidad de su hijo, a mi madre Gladys Azucena Piedra Silva (+) por guiar mi camino desde el reino celestial y no dejarme de bendecir en todo lo que hago, a mis hermanos por el cariño y respaldo mutuo para lograr mis objetivos.

Diego Esteban Morocho Piedra

Agradecimiento

El agradecimiento reiterado a la Universidad Nacional de Loja, a la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, especialmente a la carrera de Ingeniería en Geología Ambiental y Minas por haber impulsado y creado el programa de Maestría en Minas con mención en Mineralurgia y Metalurgia Extractiva dirigida por el Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo, Mg. Sc, a sus docentes de planta y contratados los cuales nos han permitido perfeccionar nuestros conocimientos técnicos en el campo de la minería extractiva. De manera especial al Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc, por haber dirigido y orientado la realización del presente proyecto, a la Ing. María José Valarezo Ulloa, PhD por haberme ayudado en la preparación y análisis químicos de aguas.

Al representante legal y demás socios de la empresa minera GOLDMINS que por intervención del Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo se me dio la apertura y facilidades para poder obtener las muestras de relave punto primordial para la derivación de todo el proyecto investigativo.

A nuestros familiares, compañeros y amigos que con su apoyo y ánimo impulsaron a la culminación de mi Trabajo de Titulación de posgrado.

Diego Esteban Morocho Piedra



Índice de Contenido

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de Contenido	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiii
Índice de anexos	xv
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. Abstract	4
3. Introducción	6
4. Marco Teórico	8
4.1. Gestión de los relaves mineros	8
4.1.1. Monitoreo y seguimiento de los relaves	8
4.1.2. Tratamiento de relaves	10
4.1.2.1. Tratamiento de aguas cianuradas	10
4.1.2.2. Tratamiento de aguas ácidas	10
4.1.2.3. Factores que influyen en el proceso de formación de aguas ácidas en presas y escombreras	12
4.1.3. Disposición final de los relaves	13
4.2. Muestreo	14
4.2.1. Toma de muestras	14
4.2.2. Número y masa de las muestras in situ	14
4.2.3. Cantidades de suelo alterado	15
4.2.4. Instrumentos	16
4.2.5. Muestreo en remediación de suelos	16
4.2.5.1. Para áreas de contaminación de forma regular menores a 1000 m ²	16
4.2.5.2. Número mínimo de puntos de muestreo	17
4.3. Técnicas de análisis mineralógico	17
4.3.1. Difracción de rayos x	17
4.3.2. Fluorescencia de rayos x	18
4.3.3. Espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES)	18

4.3.4.	Criterios de remediación según el uso de suelo	19
4.3.5.	Cálculo del índice de geoacumulación (I-geo)	19
4.4.	Análisis granulométrico	20
4.4.1.	Método del hidrómetro	20
4.4.2.	Clasificación de los suelos por su textura	20
4.5.	Adoquines de hormigón	21
4.5.1.	Dimensiones nominales	22
4.5.2.	Ensayo a la compresión en adoquines	22
4.5.2.1.	Cálculo de la resistencia característica.....	23
4.5.3.	Calidad de los adoquines	23
4.6.	Análisis químico de aguas	24
4.6.1.	Espectroscopía de absorción atómica	24
4.6.2.	Pruebas de lixiviación en muestras monolíticas o granulares	25
4.6.3.	Límites de descarga en cuerpos de agua dulce	25
5.	Metodología	27
5.1.	Ubicación	27
5.2.	Materiales y Equipos.....	28
5.3.	Procedimiento.....	29
5.3.1.	Muestreo sistemático	30
5.3.2.	Análisis mineralógicos de las muestras de relave en laboratorio	32
5.3.2.1.	Muestreo de laboratorio.....	33
5.3.2.2.	Fluorescencia de rayos x.....	33
5.3.2.3.	Espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES)	34
5.3.2.4.	Difracción de rayos x.....	34
5.3.2.5.	Evaluación mineralógica cuali – cuantitativa.....	34
5.3.2.6.	Cálculo del índice de geoacumulación (I-geo)	35
5.3.3.	Fabricación de adoquines con un 30% de relave	36
5.3.3.1.	Cálculo de dosificación empleada	36
5.3.3.2.	Fabricación de adoquines con 30% de relave	38
5.3.4.	Ensayo a la compresión de adoquines y granulometría de relave realizados en laboratorio	40
5.3.4.1.	Método de ensayo a la compresión en laboratorio	42
5.3.4.2.	Resistencia característica del adoquín	42
5.3.4.3.	Análisis de las dimensiones nominales	43
5.3.4.4.	Granulometría del relave mediante tamizado y sedimentación	44

5.3.5.	Análisis químico de aguas en laboratorio	45
5.3.5.1.	Preparación de las muestras de agua	46
6.	Resultados	49
6.1.	Establecer el método apropiado de muestreo en el depósito de relaves para obtener muestras ideales que permitan la evaluación mineralógica representativa.	49
6.2.	Interpretar la viabilidad mineralógica y ambiental del relave, como elemento constitutivo en la fabricación de adoquines.	51
6.2.1.	Fluorescencia de rayos x.....	52
6.2.2.	Espectroscopía de emisión óptica	53
6.2.3.	Difracción de rayos x.....	54
6.2.4.	Incidencia ambiental en el factor agua	58
6.2.4.1.	Parámetros y elementos metálicos localizados en la muestra de lavado de relave.....	58
6.2.4.2.	Parámetros y elementos metálicos localizados en la muestra del adoquín sumergido.....	59
6.2.4.3.	Parámetros finales del adoquín con 30% de relave después del método de lixiviación.....	59
6.2.4.4.	Comparación de parámetros y elementos analizados	60
6.3.	Comparar los resultados de la resistencia a la compresión de los adoquines piloto con las normas estándares de calidad aplicadas en el país.	63
6.3.1.	Resistencia característica de adoquines sin relave	64
6.3.1.1.	Cálculo del promedio (f_m), la suma de cada una de sus resistencias (f_i) y sus cuadrados (f_i) ²	65
6.3.1.2.	Cálculo de la desviación estándar (S)	65
6.3.1.3.	Cálculo de la resistencia característica (f_k).....	66
6.3.2.	Resistencia característica de adoquines con 30% de relave minero.....	67
6.3.2.1.	Cálculo del promedio (f_m), la suma de cada una de sus resistencias (f_i) y sus cuadrados (f_i) ²	67
6.3.2.2.	Cálculo de la desviación estándar (S)	67
6.3.2.3.	Cálculo de la resistencia característica.....	68
6.3.3.	Relación de pesos alcanzados	70
6.3.4.	Dimensión nominal del adoquín con 30% de relave	71
6.3.5.	Granulometría del relave	73
7.	Discusión	75
8.	Conclusiones	82
9.	Recomendaciones	84
10.	Bibliografía	86



11. Anexos..... 89

Índice de figuras:

Figura 1. Diagrama de selección del tratamiento por método pasivo según el drenaje ácido de aguas de mina.....	11
Figura 2. Ubicación geográfica planta de beneficio Alto Vizcaya código 390356.....	27
Figura 3. Diagrama de flujo procedimiento aplicado en muestreo de relaves.	32
Figura 4. Cálculo de dosificaciones de los componentes que integran el adoquín fabricado asociando un 30% de relave minero.	37
Figura 5. Diagrama de flujo, procedimiento para obtener adoquines con 30% de relave en su composición.....	40
Figura 6. Ensayo a la compresión de adoquines sin relave minero.	41
Figura 7. Ensayo a la compresión de adoquines con 30% de relave en su composición....	41
Figura 8. Medición de espesores en adoquines con relave.	44
Figura 9. Insumos utilizados y aplicación del ensayo de densidades por hidrometría para determinar la granulometría del relave	45
Figura 10. Diagrama de flujo, preparación de muestra de agua obtenida del lavado de relave minero.....	46
Figura 11. Diagrama de flujo, preparación de muestra lixiviada desde el adoquín.....	48
Figura 12. Ubicación de puntos y malla de muestreo en la relavera 2, planta de beneficio Alto Vizcaya.	49
Figura 13. Concentración porcentual de los elementos mayoritarios determinados por fluorescencia de rayos x.....	52
Figura 14. Concentración de elementos químicos traza determinados por espectroscopía de emisión óptica	53
Figura 15. Identificación de minerales por semicuantificación en su forma cristalina mediante la técnica de difracción de rayos x.	54
Figura 16. Difractograma obtenido desde el programa HighScore Plus.....	55
Figura 17. Tendencia de crecimiento del índice de geoacumulación calculado con las concentraciones traza que poseen valores de fondo.....	57
Figura 18. Comparación de concentraciones identificadas en análisis químico de muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín.....	61
Figura 19. Comparación de parámetros identificados en análisis químico de muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín.....	62
Figura 20. Comparación de concentraciones de elementos químicos con los límites máximos permisibles de la tabla 9 del AM- 097A	63

Figura 21. Comparación de la resistencia característica de los adoquines ensayados, con la norma INEN 1488	69
Figura 22. Diferencia de pesos promedios de adoquines con y sin relave.....	71
Figura 23. Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro aplicado a 50gr de relave minero	74

Índice de tablas:

Tabla 1. Variables que afectan la generación de aguas ácidas en escombreras y presas de relave.....	13
Tabla 2. Tamaño del árido y cantidad de masa a muestrear.....	15
Tabla 3. Cantidad de muestras de suelo alterado.....	16
Tabla 4. Criterios de remediación, según el uso de suelo, consideraciones de límites máximos permisibles.....	19
Tabla 5. Clasificación del grado de contaminación de suelos de acuerdo al cálculo del I-geo.	20
Tabla 6. Clasificación granular de los suelos finos según la ASSHTO.....	21
Tabla 7. Dimensiones nominales de los adoquines.	22
Tabla 8. Factores de corrección.....	23
Tabla 9. Resistencia a la compresión característica de los adoquines y su uso.....	24
Tabla 10. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.	25
Tabla 11. Materiales y equipos usados en el desarrollo del trabajo de campo y oficina.	28
Tabla 12. Dosificaciones utilizadas en 2 tableros de 16 adoquines, incluyendo un 30% de relave minero.	38
Tabla 13. Datos técnicos obtenidos de las diferentes zonas identificadas en campo con respecto a la relavera 2.....	50
Tabla 14. Ubicación geográfica y profundidades alcanzadas en los 9 puntos muestreados a partir de una malla sistemática regular.....	50
Tabla 15. Cantidades obtenidas de relave para ensayos, análisis de laboratorio, y dosificaciones para elaboración de adoquines.	51
Tabla 16. Determinación de elementos mayoritarios (> 1%) por la técnica de fluorescencia de rayos x.	52
Tabla 17. Determinación de elementos traza ($\leq 0,1\%$) por la técnica de espectroscopía de emisión óptica.....	53
Tabla 18. Determinación de minerales por semicuantificación (%) en función de la estructura cristalina de la muestra de relave por la técnica de difracción de rayos x.....	54
Tabla 19. Valores de concentración de elementos traza y valores de fondo en relación a la tabla 2 del acuerdo ministerial 097 A referente a criterios de remediación, según el uso de suelo.....	56
Tabla 20. Determinación de los niveles de contaminación del relave de la planta de beneficio Alto Vizcaya.	57

Tabla 21. Valores de parámetros físicos y elementos metálicos identificados en el agua de lavado de relave minero.....	58
Tabla 22. Valores de parámetros físicos y elementos metálicos identificados en el agua tomada del adoquín sumergido.....	59
Tabla 23. Medidas registradas de peso del adoquín y agua resultante después de 14 días, en la prueba de lixiviación.....	60
Tabla 24. Comparación de resultados con los límites máximos permisibles referente a descarga en cuerpos de agua dulce acorde a la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A.....	60
Tabla 25. Corrección de las resistencias a la compresión netas obtenidas de adoquines sin relave y con un 30% de relave minero en su composición.....	64
Tabla 26. Cálculo del promedio, sumatoria de cada resistencia a la compresión y de sus cuadrados.....	65
Tabla 27. Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón sin relave minero.....	66
Tabla 28. Resultados finales del cálculo de la resistencia característica de adoquines sin relave minero.....	67
Tabla 29. Cálculo del promedio, sumatoria de cada resistencia a la compresión y de sus cuadrados.....	67
Tabla 30. Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón con 30% de relave minero.....	68
Tabla 31. Resultados finales del cálculo de la resistencia característica de adoquines con 30% de relave minero.....	69
Tabla 32. Resultados comparativos de las resistencias características obtenidas con los ensayos a la compresión y las resistencias características establecidas por la norma INEN 1488.....	70
Tabla 33. Pesos medidos en cada una de las piezas de adoquines con y sin relave para su análisis de promedio comparativo.....	70
Tabla 34. Mediciones de sus dimensiones a los adoquines con un 30% de relave minero..	71
Tabla 35. Diferencia entre dos de sus dimensiones opuestas.....	72
Tabla 36. Características técnicas obtenidas del estudio físico - mecánico del adoquín fabricado con 30% de relave minero.....	72
Tabla 37. Clasificación granulométrica del relave por el método del hidrómetro.....	73

Índice de anexos:

Anexo. 1 Resultados análisis mineralógicos otorgados por el laboratorio de geoquímica analítica de la Universidad Técnica Particular de Loja.	89
Anexo. 2 Análisis químico de muestras de agua del lavado de relave y lixiviado de adoquín	93
Anexo. 3. Resultados ensayos de resistencia a la compresión de adoquines y granulometría del relave otorgados por el laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja.	97
Anexo. 4 Representaciones cartográficas.	101
Anexo. 5 Certificado de traducción.....	104

1. Título

Aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya.

2. Resumen

El presente trabajo investigativo de posgrado tiene como propósito evaluar qué viable es aprovechar los relaves mineros de la planta de beneficio Alto Vizcaya de manera sustentable conociendo su condición mineralógica y poniendo en análisis la resistencia a la compresión y la incidencia en el factor agua al integrar un 30% de relave en los agregados que constituyen los adoquines de hormigón. Para ello se estableció un muestreo sistemático donde se obtuvieron 9 muestras representativas de relave a diferentes sitios y profundidades no menores a 70cm, análisis mineralógico del relave con métodos de fluorescencia de rayos x para elementos mayoritarios ($> 1\%$) de silicio, aluminio, azufre, hierro, calcio, potasio, espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES) para elementos traza ($\leq 0,1\%$) como el magnesio, cobre, mercurio, plata, arsénico y difracción de rayos x con lo que se determinó semicuantificaciones de cuarzo, pirita, clorita, titanomagnetita, biotita, además se evaluó el nivel cuali - cuantitativo de contaminación del relave acoplado el índice de geoacumulación obteniendo una rango de no contaminado a moderado y fuertemente contaminado, se llevó a cabo la fabricación artesanal de adoquines a escala menor con un 30% de relave en su sustitución por arena de los cuales se derivó las pruebas a la compresión y un ensayo de lixiviación como acciones primordiales de la investigación, al analizar la incidencia en el factor agua mediante la prueba de lixiviación por 14 días acoplado el método 1315 provisto por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y comparando con muestras de agua a partir del lavado de relave por 12 horas se determinó que los iones liberados especialmente de los elementos químicos y parámetros con mayor control ambiental que poseen valores de fondo son: aluminio (Al) (1,29mg/l), arsénico (As) ($< 0,001\text{mg/l}$), cianuro (CN^-) (0,005mg/l), cobre (Cu) ($< 0,05\text{mg/l}$), hierro (Fe) ($< 0,10\text{mg/l}$), manganeso (Mn) ($< 0,11\text{mg/l}$), mercurio (Hg) ($< 0,001\text{mg/l}$), plata (Ag) (0,09 mg/l), potencial de hidrógeno (PH) (11,92), sólidos totales (972 mg/l), sólidos suspendidos totales (30mg/l), sulfatos (SO_4^{-2}) (47,61mg/l) y sulfuros (S^{-2}) ($3,00\mu\text{g/l}$), la mayoría no sobrepasan los límites máximos permisibles para descarga a cuerpos de agua dulce que establece el Acuerdo Ministerial 097 – A, como: aluminio (Al) (5,00 mg/l), arsénico (As) (0,10mg/l), cianuro (CN^-) (0,10mg/l), cobre (Cu) (1,00mg/l), hierro (Fe) (10mg/l), manganeso (Mn) (2,00mg/l), mercurio (Hg) (0,005mg/l), plata (Ag) (0,1mg/l), potencial de hidrógeno (PH) (6 a 9), sólidos totales (1600mg/l), sólidos suspendidos totales (130mg/l), sulfatos (SO_4^{-2}) (1000mg/l) y sulfuros (S^{-2}) (0,5mg/l), por otra parte se demuestra que la dosificación empleada en la elaboración de adoquines con 30% de relave modifica el PH del agua volviéndola alcalina; al aplicar la norma INEN 1488 se obtuvieron las resistencias características a la compresión de los adoquines normales (sin relve) de 31,15Mpa, mientras que para los adoquines con 30% de relave se obtuvo 30,56Mpa con una reducción de 0,59

Mpa (1,89%), determinando que la composición mineralógica no mejora la resistencia del adoquín a los 28 días de fraguado, sin embargo al ser construidos de manera artesanal cumplen con la norma INEN 1488 en lo que respecta a uso para tránsito peatonal así como para estacionamientos y calles residenciales cuyo decrecimiento de la resistencia a la compresión se le atribuye principalmente a la granulometría muy fina del relave semejante a un suelo de grano limo – arcilloso (A – 4 a A – 7) según la ASSHTO ya que los porcentajes de las proporciones pasantes son el 63,04% limos y 22,26% dentro de una arcilla.

Palabras clave: *relaves mineros, composición mineralógica, adoquines de hormigón, prueba de lixiviación.*

2.1. Abstract

The purpose of this postgraduate research project is to evaluate the feasibility using mining tailings from the Alto Vizcaya beneficiation plant in a sustainable way, by assessing their mineralogical condition and analyzing their compression resistance and the incidence on the water factor when integrating 30% of tailings into the mixtures which make up the concrete paving stones. To this end, a systematic sampling was established, obtaining 9 representative samples of tailings from different sites and depths not less than 70cm. The mineralogical analysis of the tailings was performed using; X-ray fluorescence methods for major elements (> 1%) of silicon, aluminum, sulfur, iron, calcium, potassium; optical emission spectroscopy (ICP-OES) for trace elements ($\leq 0,1\%$) such as magnesium, copper, mercury, silver, arsenic; and, X-ray diffraction to semiquantify quartz, pyrite, chlorite, titanomagnetite, biotite. Additionally, the qualitative-quantitative level of tailings contamination was also evaluated by coupling the geoaccumulation index, resulting in a range from non-contaminated to moderately and heavily contaminated. Handmade paving stones were manufactured on a small scale, replacing 30% of sand with tailings, and then compression tests and a leaching test were carried out as primary research actions. By analyzing the incidence on the water factor through the leaching test for 14 days using the 1315 method provided by the Environmental Protection Agency (EPA) and comparing it with water samples obtained from tailing washing for 12 hours, it was determined that the ions released, especially those with greater environmental control, were: aluminum (Al) (1,29mg/l), arsenic (As) (<0,001mg/l), cyanide (CN⁻) (0,005mg/l), copper (Cu) (<0,05mg/l), iron (Fe) (<0,10mg/l), manganese (Mn) (<0,11mg/l), mercury (Hg) (<0,001mg/l), silver (Ag) (0,09mg/l), potential hydrogen (PH) (11,92), total solids (972mg/l), total suspended solids (30mg/l), sulfates (SO₄⁻²) (47,61 mg/l) and sulfides (S⁻²) (3,00 μ g/l). Most do not exceed the maximum permissible limits for discharge into fresh water bodies established by Ministerial Agreement 097-A, such as; aluminum (Al) (5,00 mg/l), arsenic (As) (0,10 mg/l), cyanide (CN⁻) (0,10 mg/l), copper (Cu) (1,00mg/l), iron (Fe) (10mg/l), manganese (Mn) (2,00mg/l), mercury (Hg) (0,005mg/l), silver (Ag) (0,1mg/l), potential hydrogen (PH) (6 to 9), total solids (1600mg/l), total suspended solids (130mg/l), sulfates (SO₄⁻²) (1000mg/l) and sulfides (S⁻²) (0,5mg/l). On the other hand, it was revealed that the dosage used in the production of paving stones with 30% tailings alters the PH of the water, making it alkaline. When applying the INEN 1488 standard, the characteristic compression strengths of the normal paving stones (without tailings) were determined to be 31,15MPa, while for the paving stones with 30% tailings, it was 30,56 MPa, with a reduction of 0,59 MPa (1,89%), determining that the mineralogical composition does not improve the strength of the paving stone after 28 days of hardening. However, as they are built in an

artisanal manner, they comply with the INEN 1488 standard regarding use for pedestrian traffic as well as for parking lots and residential streets. The decrease in compressive strength is mainly attributed to the very fine grain size of the tailings, similar to a silt-clay soil (A – 4 to – 7) according to the AASHTO, since the percentage of passing proportions is 63,04% silt and 22,26% within a clay fraction.

Keywords: *mine tailings, mineralogical composition, concrete pavers, leaching test.*

3. Introducción

El trabajo investigativo está orientado hacia el aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya. Los procesos tecnológicos y productivos que posee la planta de beneficio demandan la necesidad de proponer nuevos mecanismos de aprovechamiento racional de estos residuos mineros mejorando y aportando el adecuado manejo de los grandes volúmenes que se generan debido a la extracción metalúrgica de menas polimetálicas ya que comúnmente la cantidad de desechos sólidos mineros es mayor que el volumen del mineral de interés económico.

“Los relaves provenientes del proceso metalúrgico tienen que ser almacenados, adecuadamente, aplicado tecnología ecológicamente racional, económicamente viable, a fin de proteger la integridad física de las personas, el ambiente y medio socio cultural circundante”. (Reid, 2008, como se citó en Espín et ál, 2017, pág. 2).

Las técnicas de manejo, gestión y tratamiento de las relaveras o piscinas de relave no solo deben tener un enfoque desde el componente ambiental, biofísico, biológico, geométrico, hidrogeológico, civil, o geotécnico, sino que se debe mirar más allá en razón de que utilidad sustentable podemos darle adentrándonos a su disposición final en si como material aprovechable, considerando esencialmente sus características mineralógicas en su estado como tal siendo o no de gran utilidad para la generación de nuevos productos que de alguna manera aporten al desarrollo de las sociedad civil, alternativa propuesta en este caso en la planta de beneficio Alto Vizcaya; ayudando así a mitigar el desequilibrio químico como es la generación de lixiviados, por otra parte la sobrecarga de la capacidad de las relaveras afectando en ocasiones la estabilidad física, problemas con los niveles freáticos por infiltración de metales disueltos, o con los sistemas de drenajes superficiales por efectos de la lluvia, y finalmente el impacto geográfico al tratar de ubicar nuevos sitios adecuados para su disposición inclusive alterando, restituyendo el terreno de acuerdo a su topografía, donde muchas de las veces estas relaveras incluso están próximas a lugares poblados.

El manejo o gestión sustancial de estos residuos mineros ha despertado la necesidad de realizar trabajos concretos orientados al aprovechamiento adecuado de los mismos, en este caso con la realización de este proyecto se da a conocer el uso de técnicas de muestreos representativos, caracterización de la composición mineralógica de los relaves y sobre todo demostrando la factibilidad mecánica y ambiental de este desecho como parte de agregados en la fabricación de nuevos elementos usados en las obras civiles como son los adoquines.

Los objetivos planteados para cumplir con el tema investigativo se han propuesto dependientes uno del otro para guiar los resultados y obtener coherencia en su tratamiento:

❖ **Objetivo General:**

- Evaluar cualitativa y cuantitativa la composición mineralógica de los relaves en la Planta de Beneficio Alto Vizcaya código 390356.

❖ **Objetivos Específicos:**

- Establecer el método apropiado de muestreo en el depósito de relaves para obtener muestras ideales que permitan la evaluación mineralógica representativa.
- Interpretar la viabilidad mineralógica y ambiental del relave, como elemento constitutivo en la fabricación de adoquines.
- Comparar los resultados de la resistencia a la compresión de los adoquines piloto con las normas estándares de calidad aplicadas en el país.

La evaluación de los componentes mineralógicos en los relaves mineros generados por los procesos de beneficio de mineral aurífero en la empresa minera Alto Vizcaya código 390356 permitió evaluar si son o no aprovechables estos residuos de manera sustentable estudiando las alternativas esenciales tanto mineralógicas, mecánicas y ambientales aplicando los ensayos respectivos, para comprobar la factibilidad y comportamiento como parte o proporción de un 30% de relave en los elementos constitutivos que suelen usarse dentro de la fabricación de adoquines dándole un uso razonable en su elaboración, mitigando el tiempo prematuro de vida útil de las piscinas de relaves y coadyuvando a atenuar los impactos ambientales que condicionan el manejo, gestión y tratamiento de los depósitos de relaves.

4. Marco teórico

4.1. Gestión de los relaves mineros

Dávila (2004, como se citó en Espín et ál, 2017, pág. 4) menciona que “La Gestión Ambiental se refiere a todos los aspectos de la función gerencial (incluyendo la planificación) que desarrollen, implementen y mantengan la política ambiental”; entendiéndose así a las acciones que debe optar la empresa para mantener un equilibrio económico, social y ambiental de su proceso productivo buscando mejorar cada vez los impactos negativos y enfocarse en la mejora continua en sus procesos con una buena estrategia administrativa comprometida con la cadena productiva y el medio ambiente, es así que el manejo racional de los relaves en procesos metalúrgicos es un punto relevante a considerarlo dentro de las estrategias de gestión.

La Planta de Beneficio Aurífero Alto Vizcaya código 390356 comprometida con el manejo sustentable de los desechos mineros derivados de los procesos mineralúrgicos y metalúrgicos muestra interés y brinda apertura para realizar investigaciones de carácter cuali – cuantitativas a las arenas de relave con el propósito de conocer las condiciones geoquímicas y buscar la manera de proporcionar un uso adicional para mejorar la gestión productiva, disminuir el riesgo ambiental de los efectos colaterales y alargar la vida útil de las piscinas de relaves.

Bajo estos principios se ha propuesto estudiar que tan factible es el uso del relave como parte proporcional en los agregados que se utilizan comúnmente en la fabricación de adoquines, para ello la presente investigación se direcciona en analizar las condiciones mineralógicas, ambientales y mecánicas que muestra el producto final.

4.1.1. Monitoreo y seguimiento de los relaves

La implementación de un plan de monitoreo y seguimiento para el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición de relaves, a fin de determinar las características físico – químicas de suelo, sedimentos y agua residual. Además, los muestreos de calidad determinarán las condiciones hidráulicas y de estabilidad del depósito y dique de la relavera. Todas estas consideraciones permitirán tomar las medidas y acciones correspondientes, según el caso (Rojas, 2010, como se citó en Espín, et ál, 2017, pág. 6).

El monitoreo y seguimiento de los depósitos de relave deben de estar siempre encaminados a identificar y analizar la estabilidad física (resistencia al corte del muro de la

presa o contorno de la balsa) y química (que no generen contaminantes que lleguen al medio ambiente cercano), que permitan mantener un buen manejo de los mismos y que a largo plazo no represente un potencial riesgo ambiental.

Para (Odelcop y Rodríguez, 2007, pág. 181) los principales fallos y accidentes en presas de relaves ya sea en operación o en abandono están asociados a:

- deslizamiento del talud
- terremoto
- sobrepaso
- problemas de fundación
- tubificación
- falla por problemas en las estructuras auxiliares
- erosión del dique
- subsidencias o colapso del terreno.

El primordial inconveniente para que se presenten fallas es la presencia de altos grados de saturación que se deriva de los residuos mineros retenidos en las presas o balsas de relave, como resultado de estos fenómenos se pueden presentar considerables pérdidas económicas, degradación y contaminación al medio ambiente y en muchos de los casos pérdidas humanas.

Como una de las alternativas para mejorar las buenas prácticas ambientales y operacionales de las piscinas de relave en la planta de beneficio Alto Vizcaya y que puedan formar parte de las actividades rutinarias de monitoreo y seguimiento es evaluar el estado mineralógico de los mismos ante la posibilidad de utilizarlos como materia prima para la generación de nuevos productos que permitan revalorizarlos cuya alternativa fundamental es optimizar la capacidad operativa de la balsa de relaves disminuyendo de esta forma la segregación de metales pesados, y en el peor de los casos fallas en la infraestructura que puedan llevar a consecuencias graves.

4.1.2. Tratamiento de relaves

4.1.2.1. Tratamiento de aguas cianuradas

Según (Espín et ál, 2017, pág. 8) mencionan que existen varios métodos para la depuración del agua usada en los procesos de beneficio las cuales se depositan como parte de la pulpa en las relaveras, estos procesos se enfocan para contrarrestar los problemas comunes como son las aguas ácidas y cianuradas. Dentro de los métodos que proponen para la disolución del cianuro se pueden establecer:

- degradación natural
- oxidación química
- biodegradación

Por otra parte, indican que la fitorremediación es una de las técnicas de tratamiento fijadas que permiten bloquear la actividad de los relaves hacia el futuro, es decir los minerales pesados podrán ser absorbidos o metabolizados por especies vegetales.

4.1.2.2. Tratamiento de aguas ácidas

Para (Aduvire , 2006) los métodos para tratar las aguas ácidas se dividen en:

Métodos activos, se basan principalmente en procedimientos químicos utilizando sustancias alcalinas, se caracterizan por ser muy costosos cuando se quieren tratar grandes cantidades de aguas ácidas, cuya instalación requiere de un mantenimiento especialmente en la fase de aireación y mezclado, entre ellos podemos destacar:

- tratamiento con cal
- tratamiento con caliza/cal
- tratamiento con sosa cáustica
- tratamiento con carbonato sódico.

Métodos pasivos, la mano del hombre es mínima en estos procedimientos como en el caso de humedales y drenajes anóxicos calizos, entre los principales tratamientos podemos mencionar los siguientes:

- humedales aerobios
- humedales anaerobios o balsas orgánicas
- drenaje anóxico calizo (ALD)
- canal o drenaje óxido calizo (OLC ó OLD).

El propósito fundamental de estos dos métodos cual sea su aplicación es la disminución de la acidez de las aguas que se encuentran como parte de la pulpa de relaves, el descenso de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes como sólidos en suspensión, arseniatos, antimoniatos, otros.

En la figura 1 podemos comparar los diferentes tratamientos por métodos pasivos que pueden aplicarse en función de las características del drenaje ácido de mina:

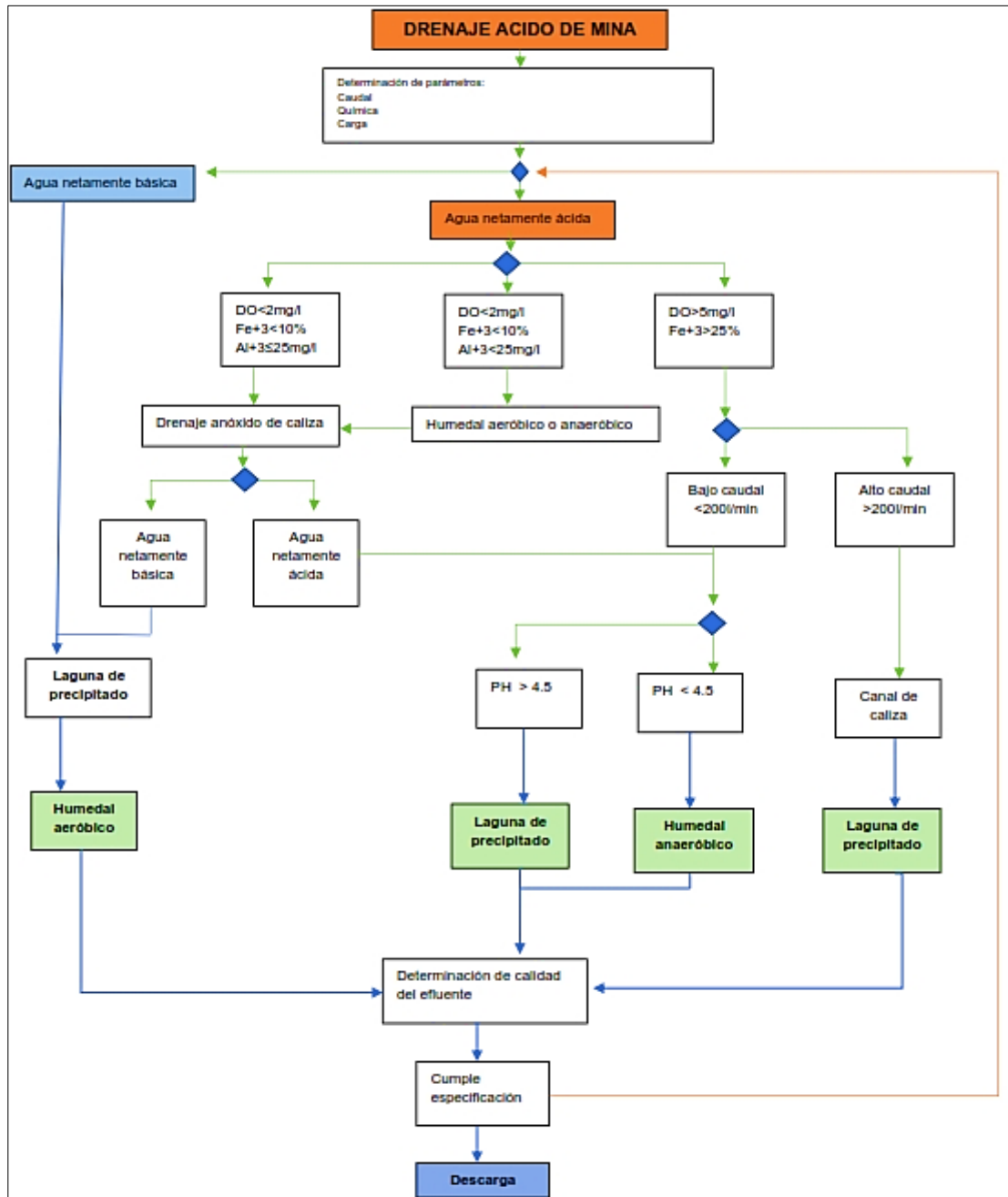


Figura 1. Diagrama de selección del tratamiento por método pasivo según el drenaje ácido de aguas de mina.

Nota. Adaptado de *Drenaje Ácido de Mina* (pág.113), Osvaldo Aduvire, 2006.

Podemos destacar que los métodos activos son eficaces en tratar grandes volúmenes de agua ácida cualquiera que sea su fuente emisora (bocamina, escombrera, relavera), sin embargo, resulta de grandes inversiones económicas, es por eso que la planta de beneficio aurífero Alto Vizcaya opta por recircular el agua utilizada en el proceso.

Aunque se trate de recircular la mayor cantidad de agua usada en el proceso de beneficio aurífero la pulpa de relave contiene una gran cantidad de agua que una vez que se asienta el relave esta drena por el sistema de canalización en las piscinas de relave, este contacto directo del agua con los metales pesados comúnmente libres facilita la formación de acidez y la liberación de sólidos en suspensión, por eso es esencial evaluar que tan beneficioso resulta encapsular el relave como parte de un hormigón de composición simple y evaluar su transferencia de masa con pruebas de lixiviación para comparar la proporción o cantidad de elementos químicos que puedan liberarse en este nuevo escenario.

4.1.2.3. Factores que influyen en el proceso de formación de aguas ácidas en presas y escombreras

Para (Zamora y Meza, 2022) el mecanismo de formación de drenaje ácido de roca, comienza con la oxidación de minerales de sulfuros de hierro más abundantes y vulnerables a meteorizarse, como en el caso de la pirita, al respecto el sulfuro se desprende para formar acidez y el hierro como Fe^{+2} al contacto con el aire se oxida a Fe^{+3} ; esta reacción tiende a bajar el pH de la solución, finalmente el $Fe(OH)_3$ precipita, liberando iones H^+ , situación que acrecienta la velocidad de reacción.

La generación del drenaje ácido en las operaciones mineras de metálicos sea en el propio depósito, en la fase de explotación o en el beneficio, depende inicialmente del contacto directo de estos minerales de hierro en cantidades óptimas con el flujo de agua sea natural o a veces inducido, de ahí que se asocian o benefician algunos componentes en la aceleración de la formación de aguas ácidas los cuales van a actuar esencialmente en la cinética y desarrollo de la reacción de formación,

De acuerdo a (Aduvire , 2006) entre los principales factores que influyen en el proceso de formación de aguas ácidas podemos relacionar:

- $eh - ph$
- temperatura
- cantidad y tamaño de los granos del mineral
- contenido y presión parcial de oxígeno
- composición y mineralogía del medio (actividad química del ion férrico)

- concentración de bacterias
- contenido de nutrientes
- contenido en tóxicos y grado de saturación del agua
- área de la superficie expuesta de los sulfuros metálicos
- energía de activación química requerida para iniciar la generación ácida.

A continuación, se indica la correlación de los variables que afectan la generación de aguas ácidas en las actividades mineras auríferas:

Tabla 1. Variables que afectan la generación de aguas ácidas en escombreras y presas de relave.

Factores	Estériles de escombreras	Residuos de presas
Contenido de sulfuros	Distribución variable, Concentración variable (en poca distancia existe alta y bajas cantidades de sulfuros).	Condiciones mucho más uniformes con altos contenidos de sulfuros.
Tamaño de partículas	Tamaño de roca variable, predomina valores superiores a 20cm.	Tamaño uniforme, casi el 100% tiene tamaño inferior a 0,2mm.
Variación de ph	Grandes variaciones de ph en pequeñas distancias.	Por capas predomina un ph Uniforme.
Facilidad de oxidación	Después del vertido se inicia de inmediato la oxidación.	La oxidación se inicia al final de la vida de la mina, de la planta o presa colmada.
Entrada de oxígeno	Rápida a través de los espacios vacíos, Disminuye con la compactación del material.	Flujo bajo y uniforme, Disminuye con la consolidación de los residuos.
Liberación de drenajes ácidos	Alta infiltración produce flujos en pie de escombrera y el subsuelo, Rápida liberación en drenajes neutralizados y ácidos.	Baja infiltración, En presas de grandes superficies el drenaje ácido fluye poco, Liberación gradual en drenajes neutralizados.

Potencial de hidrógeno (ph); centímetros (cm); milímetros (mm); porcentaje (%)

Nota. Adaptado de *Drenaje Ácido de Mina*, (pág. 12), Brodie.1991, como se citó en Aduvire, 2006.

4.1.3. Disposición final de los relaves

“La disposición final de relaves mineros permitirá almacenar adecuadamente los relaves provenientes del proceso metalúrgico, aplicando tecnología ecológicamente racional, económicamente viable, para proteger la integridad física de las personas, el ambiente y el aspecto sociocultural circundante”, (Espín et ál, 2017, pág. 10), además indican que la utilización de residuos mineros producto del proceso metalúrgico de flotación en la fabricación de ladrillos y baldosas es una manera de *destinar su utilidad final* sin embargo se carece de estudios o investigaciones respecto a la temática.

Ventajosamente la industria minera peruana tiene años de adelanto en aspectos técnicos referentes a la explotación, beneficio, manejo, gestión y disposición final de

relaves mineros; y para el efecto se cuenta con una investigación realizada que estableció las técnicas de fijación y micro encapsulación de los metales pesados en los relaves mineros, con el propósito de estabilizar los metales peligrosos y contaminantes que se encuentran en los relaves, anulando así el proceso natural de disponibilidad y movilidad de los metales pesados que se caracterizan por causar contaminación cuando están en estado inestable y por lo tanto migran hacia al medio físico, suelo y agua. (Romero, 2010, como se citó en Espín, et ál, 2017, pág.10).

4.2. Muestreo

Los conceptos citados a continuación de alguna manera han orientado a la formalización de un muestreo sistemático, aunque los mismos en su mayoría no están dirigidos para tomar muestras en relaves mineros sin embargo se mencionan las siguientes nociones.

4.2.1. Toma de muestras

Cuando sea posible, las muestras a ser ensayadas para control de calidad deben ser tomadas del producto terminado. En la preparación de los ensayos para abrasión, las muestras del producto terminado a ser ensayadas no deben ser objeto de posterior trituración o reducción manual del tamaño de las partículas, a menos que el tamaño del producto terminado sea tal que necesite una reducción complementaria para la realización de los ensayos. (NTE INEN 695, 2010, pág. 2).

Las muestras de relave obtenidas han sido recolectadas directamente de la balsa de relaves es decir de su disposición final, las mismas que no han sido alteradas en su composición granulométrica ya que poseen tamaños de granos inferiores a la malla 200.

4.2.2. Número y masa de las muestras in situ

Según la norma (NTE INEN 695, 2010, pág. 3), el número de muestras depende de las características a ser medidas y su variabilidad, por lo tanto, la cantidad de muestras en sitio debe garantizar resultados confiables cuando se realicen los ensayos. Por otra parte, la cantidad de la muestra debe relacionar la clase y el número de ensayos que el árido va a ser puesto a prueba, asegurándose de tener material disponible que permita la realización de las mismas.

Tabla 2. Tamaño del árido y cantidad de masa a muestrear.

Tamaño del árido mm ^A	Masa mínima de la muestra in situ ^B kg	Volumen mínimo de la muestra in situ L
	Áridos finos	
2,36	10	8
4,75	10	8
	Áridos gruesos	
9,5	10	8
12,5	15	12
19,0	25	20
25,0	50	40
37,5	75	60
50	100	80
63	125	100
75	150	120
90	175	140

^A Para los áridos procesados, utilizar el tamaño máximo nominal que se indica en la norma respectiva o en la descripción. Si la norma o descripción no indican un tamaño máximo nominal (por ejemplo, una abertura de tamiz que contemple un pasante del 90% al 100%), utilizar el tamaño máximo (la abertura de tamiz que pase el 100%).

^B Para áridos gruesos y finos combinados (por ejemplo, áridos para bases y subbases) la masa mínima debe ser la masa mínima del árido grueso más 10kg.

Milímetros (mm); Kilogramos (kg); Litros (L); porcentaje (%)

Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 4), NTE INEN 695, 2010.

Si consideramos al relave como un árido fino podemos relacionar que se han tomado alrededor de 2kg por punto de muestreo, teniendo una cantidad final que sobrepasa los 10kg de acuerdo a la presente norma, considerada para los análisis mineralógicos, análisis químico de aguas y granulometría.

4.2.3. Cantidades de suelo alterado

Según la norma (NTE INEN 686, 1982, pág. 2), "Si el muestreo se efectúa en un pozo a cielo abierto, la muestra se tomará directamente del estrato seleccionado en cantidad suficiente para el propósito requerido".

Al respecto se muestreó directamente en cada uno de los pozos excavados por lo tanto las cantidades de masa recolectadas está dentro de los rangos establecidos para el propósito de la muestra, especialmente para ensayos químicos y ensayos de compresión tomando en cuenta como tipo de suelo cohesivos y arenas, cuya textura se relaciona con el material muy fino que posee el relave debido a su homogeneidad granulométrica relativa:

Tabla 3. Cantidad de muestras de suelo alterado.

Propósito de la muestra	Tipo de suelo	Masa kg
Ensayos de identificación, contenido natural de agua, y ensayos químicos.	Suelos cohesivos y arenas	1
	Suelos gravosos	5
Ensayos de compactación	Suelos cohesivos y arenas	20
	Suelos gravosos	30
Exámenes de compresión de materiales de construcción, incluyendo suelos estabilizados Kilogramo (kg)	Suelos gravosos	25 - 50
	Suelos gravosos	50 - 100

Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 2), NTE INEN 686, 1982.

4.2.4. Instrumentos

Según la norma (NTE INEN 686, 1982, pág. 1) de mecánica de suelos en muestras alteradas es indispensable tener herramientas de perforación para obtener muestras de suelo, entre las que podemos enunciar de acuerdo a las sugerencias son:

- Barrenas helicoidales.
- Barrenas de cucharón.
- Barrenas o cucharas posteadoras.
- Barrenas de disco.
- Sondas simples.
- Sondas con diafragma.
- Cucharón raspador.
- Son necesarios, además de lo indicado anteriormente, palas, picos, palustres y recipientes adecuados, fundas de polietileno o sacos para guardar las muestras.

Para el muestreo hemos hecho uso de palas manuales de capacidad máxima de 11kg para extraer 9 muestras a profundidades desde 70cm hasta 1m destinadas para ensayos de laboratorio y a 60cm para la fabricación de los adoquines, las mismas que han sido almacenadas en fundas de polietileno y sacos de polipropileno para su buena conservación hasta ser homogenizadas y posteriormente usadas para los ensayos y análisis respectivos.

4.2.5. Muestreo en remediación de suelos

4.2.5.1. Para áreas de contaminación de forma regular menores a 1 000 m²

“Cuando el área de contaminación tenga forma regular de un cuadrado, el número de muestras y distribución, será de una muestra en cada pared (4) y una en el fondo (1), total 5 muestras”, (Ministerio del Ambiente del Perú, 2014, pág. 14).

“Cuando el área de contaminación tenga forma regular de un rectángulo, el número de muestras y distribución, será de una muestra en cada pared corta (2), dos en cada pared larga (4) y dos en el fondo (2), total 8 muestras”, (Ministerio del Ambiente del Perú, 2014, pág. 15).

Para alcanzar la muestra deseada se correlacionó el área muestreada que conformó la malla final cuya superficie se encuentra dentro de una forma regular y cuadrada menor a 1000m², mientras que la toma de la muestra fresca fue considerada solamente en el fondo y no sobrepasó en su mayoría el metro de profundidad esto se debe principalmente a la homogeneidad del relave en la zona a muestrear y a la dificultad de excavación, ya que a mayor profundidad el relave se torna más compacto, determinando 9 puntos muestreados.

4.2.5.2. Número mínimo de puntos de muestreo

“Para el muestreo de suelos contaminados cuyas superficies estén comprendidas entre menores a 0,1Ha y mayores a 30Ha se debe aplicar la siguiente ecuación” (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015):

$$y = (x)^{0,3} \cdot (11,71)$$

Donde:

(Y) es el número mínimo de puntos de muestreo, y (X), es la superficie del suelo de la zona de estudio expresada en hectáreas.

4.3. Técnicas de análisis mineralógico

4.3.1. Difracción de rayos x

Según (Tuesta y Vásquez, 2013), “entre las diversas técnicas aplicadas en el campo de la caracterización mineralógica, la técnica de difracción de rayos x (DRX) ocupa un lugar importante debido a la información que proporciona en las investigaciones geológicas, mineras y metalúrgicas”,

Dicho así es una de las técnicas muy indispensables para caracterización mineralógica de relaves, cuya técnica nos permite identificar y cuantificar clases de minerales considerando las fases cristalinas mayoritariamente policristalinas y amorfas, su técnica se basa en la proyección de un haz de rayos x que incide sobre muestras de polvo por lo general, los rayos dispersos en los átomos que conforman la red cristalina llegan a presentar un cierto

desfase, distorsionándose en su trayectoria de refracción, llegando a presentar solo algunos de ellos una interferencia constructiva.

4.3.2. Fluorescencia de rayos x

Según (De la Cruz, 2018) esta técnica permite “la identificación de elementos en una muestra a partir de la lectura de la emisión de rayos x secundarios o fluorescentes que son emitidos desde la muestra luego de que ésta haya sido expuesta a la irradiación de rayos X primarios”, considera 3 fases dentro de su proceso:

- Excitación de los átomos.
- Emisión de los rayos x característicos de la muestra.
- Detección de los rayos x emitidos.

Con la técnica de espectrometría de rayos x se busca identificar o determinar la concentración de elementos químicos mayoritarios presentes en los relaves, es decir concentraciones mayores al 1%, los elementos pesados en esta fase son detectados como óxidos.

4.3.3. Espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES)

Para (Jiménez et ál, 2020), “La ICP-OES se basa en la emisión espontánea de fotones de los átomos que han sido excitados por un plasma de argón de alta temperatura (6800 K)”, propiedad de cada elemento químico y a veces relacionado directamente con su concentración, la tecnología actual de estos equipos permite medir cantidades mayores a 70 elementos al mismo tiempo, el principal propósito de esta técnica es determinar una gran cantidad de elementos de la tabla periódica a condiciones de traza, la muestra a ser analizada es diluida sea por ácido nítrico o clorhídrico, entre otros, misma que es llevada a un nebulizador donde cambia su estado a gaseoso por efectos del argón, cuyo gas a su vez pasa a un área de ionización que consiste en un plasma dentro del cual se pueden llegar a elevadas temperaturas hasta los 8000k, llegando a excitar a los átomos que contienen la muestra, los cuales transmiten una longitud de onda que es característico de cada elemento obtenido así los resultados característicos de cada elemento químico.

Esta técnica resultó útil para poder detectar minerales de bajas concentraciones, es decir donde la técnica de fluorescencia de rayos x no los ha podido identificar, ya que el ICP – OES puede llegar a encontrar concentraciones de hasta ppb (partes por billón).

4.3.4. Criterios de remediación según el uso de suelo

Para la evaluación cualitativa de la mineralogía y composición química de algunos de los elementos pesados que se ha detectado en los relaves a través de las técnicas anteriormente descritas es importante considerar los criterios de la tabla 2 del Acuerdo Ministerial 097 – A, donde se establecen los límites máximos permisibles en suelos contaminados de acuerdo al uso de suelo respecto a parámetros en este caso inorgánicos, como se había indicado en enunciados anteriores las referencias teóricas no están direccionadas directamente a tratamiento de relaves, sin embargo es importante correlacionar con la legislación ambiental vigente los elementos metálicos identificados que se pueden relacionar, a continuación podemos exponer los siguientes valores: (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

Tabla 4. Criterios de remediación, según el uso de suelo, consideraciones de límites máximos permisibles.

Parámetro	Unidades	Uso del Suelo			
		Residencial	Comercial	Industrial	Agrícola
Parámetros inorgánicos					
Arsénico	mg/kg	12	12	12	12
Sulfuro	mg/kg	-	-	-	500
Bario	mg/kg	500	2000	2000	750
Boro (soluble en agua caliente)	mg/kg	-	-	-	2
Cadmio	mg/kg	4	10	10	2
Cobalto	mg/kg	50	300	300	40
Cobre	mg/kg	63	91	91	63
Cromo total	mg/kg	64	87	87	65
Cromo VI	mg/kg	0,4	1,4	1,4	0,4
Cianuro	mg/kg	0,9	8	8	0,9
Estaño	mg/kg	50	300	300	5
Fluoruros	mg/kg	400	2000	2000	200
Mercurio	mg/kg	1	10	10	0,8
Molibdeno	mg/kg	5	40	40	5
Níquel	mg/kg	100	100	50	50
Plomo	mg/kg	140	150	150	60
Selenio	mg/kg	5	10	10	2
Talio	mg/kg	1	1	1	1
Vanadio	mg/kg	130	130	130	130
Zinc	mg/kg	200	380	360	200

Nota. Adaptado de *Acuerdo Ministerial 097 A*, (pág. 17), Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015.

4.3.5. Cálculo del índice de geoacumulación (I-geo)

Según (Muller, 1969, como se citó en Pérez, 2020, pág 41), el cálculo del índice de geoacumulación es aplicado para analizar la contaminación a partir de la relación de concentración de un analito en la matriz de interés de estudio en referencia a los valores de control, se aplica la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 \cdot B_n}$$

Donde:

(C_n) es la concentración medida del metal contaminante en mg/kg en el suelo, mientras que (B_n) es el valor de fondo geoquímico mg/kg del elemento en la muestra control.

Tabla 5. Clasificación del grado de contaminación de suelos de acuerdo al cálculo del I-geo.

Valor I - geo	Clasificación I - geo	Nivel de contaminación
< 0	0	No contaminado
0-1	1	No contaminado a moderadamente contaminado
1-2	2	Moderadamente contaminado
2-3	3	De moderado a fuertemente contaminado
3-4	4	Fuertemente contaminado
4-5	5	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
> 5	6	Extremadamente contaminado.

Índice de geoacumulación (I – geo)

Nota. Evaluación del índice de geoacumulación, (pág 41), Muller, 1969, como se citó en Pérez, 2020.

4.4. Análisis granulométrico

Para granulometrías menores a la malla 200 (0,075mm) cuyos diámetros son particulares en los relaves mineros, un método apropiado para calcular los porcentajes de material pasante es el método del hidrómetro.

4.4.1. Método del hidrómetro

El hidrómetro es un instrumento que permite medir la densidad de la solución en la cual se suspende el material granulométrico a cuantificar. El método del hidrómetro calcula la distribución cuantitativa de los tamaños de particular de las fracciones muy finas de suelos, siendo así las partículas mayores de 0.075mm es decir retenidas en la malla 200 suelen determinarse por tamizado mientras que la distribución de las partículas menores al diámetro descrito se determina por sedimentación usando el equipo indicado. (Jiménez S. , 2016).

4.4.2. Clasificación de los suelos por su textura

De acuerdo a la clasificación de suelos por su textura tomada de (USDA 1889, como se citó en Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2023), los límites del tamaño de partículas se clasifican de la siguiente manera:

- Arena: 2,0 a 0,05mm
- Limo: 0,05 a 0,005mm
- Arcilla: menores a 0,002mm

Para propósitos de ingeniería el sistema de clasificación de suelos tomado de la AASHTO propone la siguiente clasificación según el tamaño de grano de la partícula:

- Grava: fracción de material que pasa el tamiz 75mm y es retenido en el tamiz 10 (2mm)
- Arena: Fracción que pasa el tamiz 10 y es retenido por el tamiz 200 (0,075mm)
- Limo y arcilla: fracción que pasa el tamiz 200.

Tabla 6. Clasificación granular de los suelos finos según la ASSHTO.

Clasificación	Material limo – arcilla (más del 35% del total de la muestra pasa el tamiz 200).			
	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 _a A - 7 6 _b
Grupo				
Porcentajes que pasa:				
Tamiz 10				
Tamiz 40				
Tamiz 200	36 mínimo	36 mínimo	36 mínimo	36 mínimo
Caracterización de la fracción que pasa el tamiz 200:				
Limite liquido	40 máximo	41 mínimo	40 máximo	41 mínimo
Índice de plasticidad	10 máximo	10 máximo	11 mínimo	11 mínimo
Tipos usuales de materiales constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Porcentaje (%)				

Nota. Adaptado de *Clasificación de Suelos*, (pág 41), Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2023.

4.5. Adoquines de hormigón

La norma (NTE INEN 3040, 2016, pág. 1), está dirigida a “los materiales, propiedades, requisitos y métodos de ensayo de los adoquines prefabricados de hormigón no armados y sus accesorios complementarios, para ser instalados en cubiertas o áreas sometidas a tránsito de personas y vehículos”, usaremos dicha norma para comparar algunos parámetros ya que la misma puede ser aplicada tanto para adoquines normales y permeables.

Además, esta norma señala algo muy importante: *Los elementos fabricados de manera similar a los adoquines y que no cumplan con las características geométricas señaladas, pueden ser sometidos a esta norma; de común acuerdo entre el cliente y el fabricante. Sin embargo, debe asegurarse de que estos elementos trabajen a compresión*, (NTE INEN 3040, 2016, pág. 1).

4.5.1. Dimensiones nominales

Según la (NTE INEN 3040, 2016, pág. 5) la discrepancia entre dos dimensiones de espesor de un mismo adoquín tiene que ser $\leq 3\text{mm}$. Los límites admisibles bajo las dimensiones nominales informadas por el fabricante deben estar en los siguientes rangos:

Tabla 7. Dimensiones nominales de los adoquines.

Espesor de adoquín mm	Longitud mm	Ancho mm	Espesor mm
<100	± 2	± 2	± 3
≥ 100	± 3	± 3	± 4

Milímetros (mm)

Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 5), NTE INEN 3040, 2016.

La norma (ASTM C936/C936M - 16, 2016) dentro de los requerimientos físicos que deben poseer las unidades para pavimentación con hormigón sólido requiere de espesores mínimos de 60mm.

4.5.2. Ensayo a la compresión en adoquines

De acuerdo a la norma (NTE INEN 1 485, 1986, pág. 1), “establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión en adoquines”, se puede ejecutar para cualquier tipo de adoquín ya sea para uso peatonal, de vehículo liviano como pesado. El proceso consiste en ingresar un adoquín a la aplicación de una tensión creciente de compresión hasta provocar el fallamiento.

Las muestras deben estar húmedas para realizar el ensayo, después de haber sido expuestas al agua por 24 horas, con una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, el adoquín debe ser ubicado en el equipo con la cara de desgaste hacia arriba de tal forma que el eje vertical como horizontales de la muestra queden alineados con las placas que realizan la presión. La aplicación de las presiones debe ser constante a una presión de 15MPa en un tiempo de 1 minuto hasta que se supere la resistencia del adoquín.

La resistencia a la compresión de cada muestra deberá calcularse, dividiendo la carga máxima para el área total de la cara de contacto del adoquín, representado por A_s , y multiplicando el resultado por el factor de corrección, tomado de la Tabla 2 de la (NTE INEN 1488, 1986, pág. 3). Dicha resistencia se expresará con una precisión de 1MPa. (NTE INEN 1 485, 1986, pág. 2).

Tabla 8. Factores de corrección.

Espesor del adoquín mm	Tipo de adoquín	
	Liso	Biselado
60	1,00	1,06
80	1,04	1,11
100	1,08	1,16
Milímetros (mm)		

Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 3), NTE INEN 1 488, 1986.

4.5.2.1. Cálculo de la resistencia característica

En relación a la norma (NTE INEN 1485, 1986, pág. 2) la resistencia característica se determina considerando los valores de la resistencia que obtuvieron los adoquines con cierto porcentaje de relave que conforman la muestra ensayada, la desviación estándar se calcula con la siguiente fórmula escogida:

$$S = \frac{\sqrt{\sum (fi)^2 - \frac{(\sum fi)^2}{10}}}{9}$$

Donde:

- (S) = desviación estándar en Mpa,
- (fi) = la resistencia a la compresión de cada una de las muestras en Mpa,
- (fm) = media aritmética (promedio) de la resistencia a la compresión de todas las muestras en Mpa,
- (fk) = resistencia característica.

La resistencia característica se obtiene de la siguiente manera:

$$fk = (fm - 1,64S)$$

4.5.3. Calidad de los adoquines

Para (Vila et ál, 2017) la normativa internacional vigente para el control de calidad de adoquines de hormigón (ASTM C936, 2016; BS EN 1338, 2003; IRAM 11656, 2010; ICONTEC 2017, 2004; NTON 12 009, 2010), solamente la ASTM C936 (según los procedimientos de ensayos indicados en la ASTM C140, 2017) y la NTON 12 009 *consideran la resistencia a la compresión*.

La norma ecuatoriana (NTE INEN 1 488, 1986, pág. 3) establece la resistencia a la compresión característica para los adoquines:

Tabla 9. Resistencia a la compresión característica de los adoquines y su uso.

Tipo de uso	No. de vehículos por día mayores de 3 Tn brutas	Equivalente total de repeticiones de eje estándar después de 20 años de servicio	Forma recomendada de adoquín	Resistencia característica (Mpa) compresión a los 28 días
Peatonal	0	0	A,B,C	(20)
Estacionamiento y calles residenciales	0 - 150	0 - 4,5 x 10 ⁵	A,B,C	(30)
Caminos secundarios y calles principales	150 - 1500	4,5 x 10 ⁵ - 4,5 x 10 ⁶	A	(40)

Toneladas (Tn); Megapascales (MPa)

Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 3), NTE INEN 1 488, 1986.

4.6. Análisis químico de aguas

El análisis químico de aguas y sólidos en suspensión que se derivan de las muestras del lavado del relave y la prueba de lixiviación en muestras monolíticas por el método 1315 de la Agencia de Protección Ambiental para el adoquín, se determinan mediante la espectroscopía de absorción atómica con la finalidad de detectar iones de elementos químicos que pueden estarse liberando en ambas muestras de agua.

4.6.1. Espectroscopía de absorción atómica

“Para (Pérez et ál, 2018, pág. 7) la técnica se basa en absorber la radiación propagada de una longitud de onda, los átomos son aquellos que recogen de manera selectiva la radiación que tengan ciertos niveles energéticos cuya discrepancia en energía corresponde a los fotones que inciden en la muestra.

Estos fotones detectados están determinados por la ley de Beer que indica la disminución de poder radiante con la concentración de la clase absorbente y este a su vez con el espesor de la celda que contienen los átomos de la muestra.

El funcionamiento del equipo inicia con emitir radiación indispensable para excitar a los átomos, mediante un nebulizador se genera gotas para mejorar la dispersión, luego con un quemador se logra la combustión de la muestra favoreciendo la formación de átomos, finalmente un monocromador separa la radiación de longitud de onda el cual es interpretado en un sistema de lectura que indica la intensidad de corriente para poderlo interpretar.

4.6.2. Pruebas de lixiviación en muestras monolíticas o granulares

Según la (EPA, 2017) este método comprende la lixiviación de material monolítico o granular compactado continuamente saturado de agua en un tanque lleno de eluyente. Las dimensiones del recipiente y de la muestra se eligen de manera que la muestra se sumerja completamente en la solución de lixiviación. Se describe que las muestras pueden estar representadas por un solo material constituyente conocidas como monolíticas cuyas formas pueden tomar una geometría cilíndrica o paralelepípeda, mientras que para materiales granulares estos se pueden moldear en recipientes cilíndricos con un cierto contenido de humedad. El agua utilizada para el proceso de lixiviación puede ser cambiada por nuevas proporciones en nueve intervalos predeterminados, estos intervalos individuales pueden ser de 14 días para obtener resultados de liberación de elementos inorgánicos a largo plazo.

4.6.3. Límites de descarga en cuerpos de agua dulce

Las muestras de agua de los metales solubles que provienen del relave, así como de la prueba de lixiviación y en base a los elementos químicos obtenidos por ICP y fluorescencia de rayos x que se optaron por analizarlos, fueron comparados con algunos parámetros que contiene la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A el cual hace referencia a los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Tabla 10. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. Soluble en hexano	mg/l	30,0
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. Carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100ml	2 000
Color real ¹	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fosforo total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno total kjedahl	N	mg/l	50,0
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial del hidrógeno	pH	mg/l	6 - 9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	1 000
Sulfuros	S ⁻²	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ±3
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

Nota. Adaptado de Acuerdo Ministerial 097 A, (pág. 24), Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015.

5. Metodología

A continuación, se describen los procedimientos y técnicas que se han utilizado de manera ordenada y sistemática para llevar a cabo el desarrollo del proyecto investigativo orientado por cada uno de los objetivos planteados, donde se expone la forma de cómo se generó, recabó, ordenó y se analizó los datos colectados tanto bibliográficos como propios del estudio.

5.1. Ubicación

La presente investigación orientada a demostrar la factibilidad para aprovechar de manera sustentable los relaves mineros como agregados en la fabricación de adoquines tiene su origen de estudio en los desechos mineros almacenados en la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya, cuya empresa está ubicada en la provincia de El Oro, Distrito Minero Zaruma – Portovelo, a 3 kilómetros de la cabecera urbana del cantón Zaruma en la vía estatal que nos dirige hacia la cabecera parroquial Malvas, cuya referencia geoespacial pertenece a las coordenadas UTM WGS 84 zona 17 sur, Este= 652861,50m; Norte= 9594190,14m, el sitio donde se encuentra ubicada la planta de beneficio pertenece al sector rural del cantón Zaruma donde aún se conservan rasgos naturales de bosque nativo y de relieves colinados altos de origen volcánico.

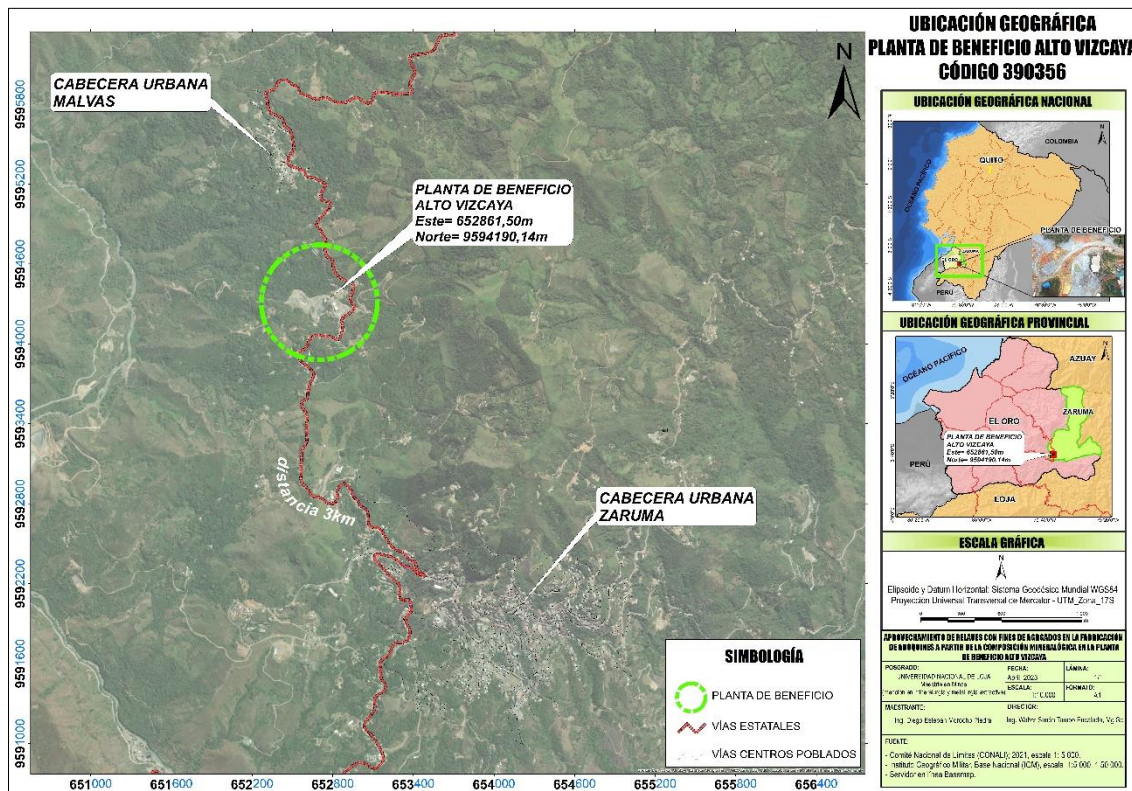


Figura 2. Ubicación geográfica planta de beneficio Alto Vizcaya código 390356.

5.2. Materiales y Equipos

Para llevar a cabo el desarrollo de las actividades tanto de campo como de laboratorio hemos conjugado el uso de algunos materiales, herramientas, equipos e instrumentos propios como ajenos, tomando en cuenta que los análisis de laboratorio y ensayos respectivos fueron encargados a laboratorios de la academia universitaria privada como pública; los mismos que podemos describir acorde a la sucesión de actividades desarrolladas.

Tabla 11. Materiales y equipos usados en el desarrollo del trabajo de campo y oficina.

Actividad	Materiales, herramientas y/o equipos
Muestreo sistemático de relave	<p>Equipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Computador portátil - Drone (RPAs) - Gps navegador marca garmin 64 sc - EPP (casco, chaleco, botas, guantes) <p>Herramientas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cinta métrica de 50m - Pala manual - Balanza colgante mecánica de capacidad 100kg marca Camry <p>Insumos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fundas de polietileno con cierre hermético de capacidad ± 5lb - Sacos de polipropileno de 25lb - Marcadores - Cartulina
Análisis mineralógico de la muestra de relave	<p>Equipos:</p> <p>Fluorescencia de rayos x:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Espectrómetro portátil marca Bruker S1 turbo SD <p>Espectroscopía de emisión óptica ICP – OES:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Espectómetro de emisión óptica con plasma acoplado marca Perkin Elmer <p>Difracción de rayos x:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Difractómetro Bruker D8 Advance - Software Highscore Plus
Fabricación de adoquines	<p>Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2kg de relave muestreado - Reactivos químicos usados por el laboratorio <p>Equipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mezcladora mecánica - Prensa hidráulica - 8 moldes de adoquín tipo cruz - Tableros de capacidad 8 unidades <p>Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 20kg de cemento hidráulico marca guapan tipo IP - 121kg de arena mal gradada (arena gravosa) - 20kg de relave - 8L de agua
Ensayo a la compresión de adoquines y granulometría de relave	<p>Equipo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Máquina de prueba a la compresión modelo shimadzu X2000. - Horno <p>Materiales:</p>

Actividad	Materiales, herramientas y/o equipos
	<ul style="list-style-type: none"> - 8 adoquines sin relave - 8 adoquines con relave al 30% - 2kg de relave muestreado - Hexametafosfato de sodio usado por el laboratorio - Agua destilada <p>Herramientas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Calibre - Tamiz malla 200 - Balanza analítica - Vaso de vidrio (Beaker) - Varilla de vidrio - Cilindro de vidrio de 1000ml - Cronómetro - Termómetro - Hidrómetro <p>Equipo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Espectrómetro de absorción atómica - Agitador magnético
<p>Análisis químico de agua</p>	<p>Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adoquín fabricado con un 30% de relave - 2kg de relave muestreado - Reactivos químicos usados por el laboratorio - Agua destilada y desionizada - Recipiente plástico de $\pm 7000\text{cm}^3$ - Envases de 1000ml color ámbar <p>Equipo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Computador portátil - Disco duro de 1,81Tb
<p>Formulación del informe final</p>	<p>Insumos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Material bibliográfico de publicaciones, artículos científicos, tesis, revistas, normas de calidad, legislación ambiental vigente y guías técnicas relacionadas a la temática de investigación - Resultados de laboratorio - Registro fotográfico - Información levantada en campo <p>Kilogramo (kg); libra (lb); metro (m); centímetro cubico (cm^3); litro (L); aeronaves pilotadas a distancia (RPAs); Terabyte (Tb); por ciento (%)</p>

5.3. Procedimiento

La metodología aplicada es de carácter cuali – cuantitativa y experimental en la cual se describe los procedimientos y las técnicas aplicadas para poder alcanzar cada uno de los objetivos planteados en la formulación del proyecto de investigación siendo la base fundamental para poder alcanzar los resultados deseados.

5.3.1. Muestreo sistemático

Se realizó un recorrido de campo por las inmediaciones de las piscinas de relave que posee la planta de beneficio Alto Vizcaya con el propósito de ir delimitando la superficie a muestrear en función de las condiciones actuales en las que se encontraron, las cuales obedece a ciertas limitaciones como la presencia de maquinaria pesada haciendo limpieza de exceso de material de relave especialmente en el sitio de la relavera 1, cuya situación nos permitió optar por la piscina de relave 2 contigua a esta.

Con la ayuda de una ortofoto obtenida a partir de un sobrevuelo con dron previamente planificado se logró divisar la condición situacional de la relavera 2 (326,10m²) pudiendo evidenciar claramente 2 zonas condicionantes, la una identificada por un relave completamente saturado (78,75m²) de difícil acceso, mientras que la otra zona se divisó un material heterogéneo (70,79m²) de granulometría y procedencia diferente cuyas situaciones no fueron las ideales para la toma de muestras.

Estos parámetros descritos anteriormente nos permitieron definir una zona ideal para poder obtener las muestras de relave, considerando principalmente material relativamente seco y homogéneo el cual fue quien representó toda la población de interés, para ello se diseñó una malla de perímetro regular con 9 cuadrantes (área de 169,20m²) con dimensiones predominantes de 4,50m de largo por 4,50m de ancho llegando a alcanzar finalmente cuadrantes irregulares de 4,50m de largo por 3,50m de ancho esto por las limitaciones que representa la vía de ingreso en el sector norte de la relavera 2.

Para orientar de mejor manera el número ideal de muestras a recolectar y tener un criterio más acertado nos apoyamos en el concepto definido en el Acuerdo Ministerial 097 – A: “Para el muestreo de suelos contaminados cuyas superficies estén comprendidas entre menores a 0,1Ha y mayores a 30Ha se debe aplicar la siguiente ecuación” (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015):

$$y = (x)^{0,3} \cdot (11,71)$$

Donde:

(Y) es el número mínimo de puntos de muestreo, y (X), es la superficie del suelo de la zona de estudio expresada en hectáreas.

Con la ortofoto levantada y la malla diseñada recurrimos al sitio de interés para el muestreo respectivo, con la ayuda de una cinta métrica y un gps navegador garmin 64sc, se fueron localizando el punto más próximo al centroide de cada cuadrante.

Una vez calculados y ubicados los 9 puntos (uno por cada cuadrante) se procedió a excavar con la ayuda de una pala manual llegando a profundidades mínimas de 70cm (centímetros) y máximas de 1m (metro), la profundidad alcanzada en cada uno de los puntos fue establecida por la homogeneidad del relave en la zona a muestrear y la dificultad de excavación, ya que a mayor profundidad el relave se tornó más compacto.

Por cada pozo excavado en la profundidad máxima alcanza se extrajo 2kg (kilogramos) de muestra fresca cuyo material ha sido utilizado en los análisis mineralógicos, análisis químico de aguas y granulometría previa homogenización, mientras que a los 60cm (centímetros) de cada pozo excavado se recolectó una muestra de aproximadamente 4kg (kilogramos) para poderlas utilizar posteriormente en la dosificación para la fabricación de los adoquines.

Las muestras de relave de 2kg (kilogramos) obtenidas en la máxima profundidad alcanzada en cada pozo excavado fueron homogenizadas a los 12 días cuando el relave se secó en su totalidad, el tiempo de homogenización o mezcla de material de relave perteneciente a cada uno de los 9 puntos fue por 25min (minutos) para finalmente ser llevado en las cantidades solicitadas por cada uno de los laboratorios para los análisis respectivos.

Finalmente, para sistematizar y representar los datos referentes a coordenadas de los puntos de muestreo, profundidades alcanzadas, áreas, mediciones de los cuadrantes de la malla, entre otros aspectos, se diseñó un mapa el cual se puede evidenciar en el ítem de los resultados, a continuación, en la figura 3 podemos observar todo el protocolo a seguir para la obtención final de la muestra representativa:

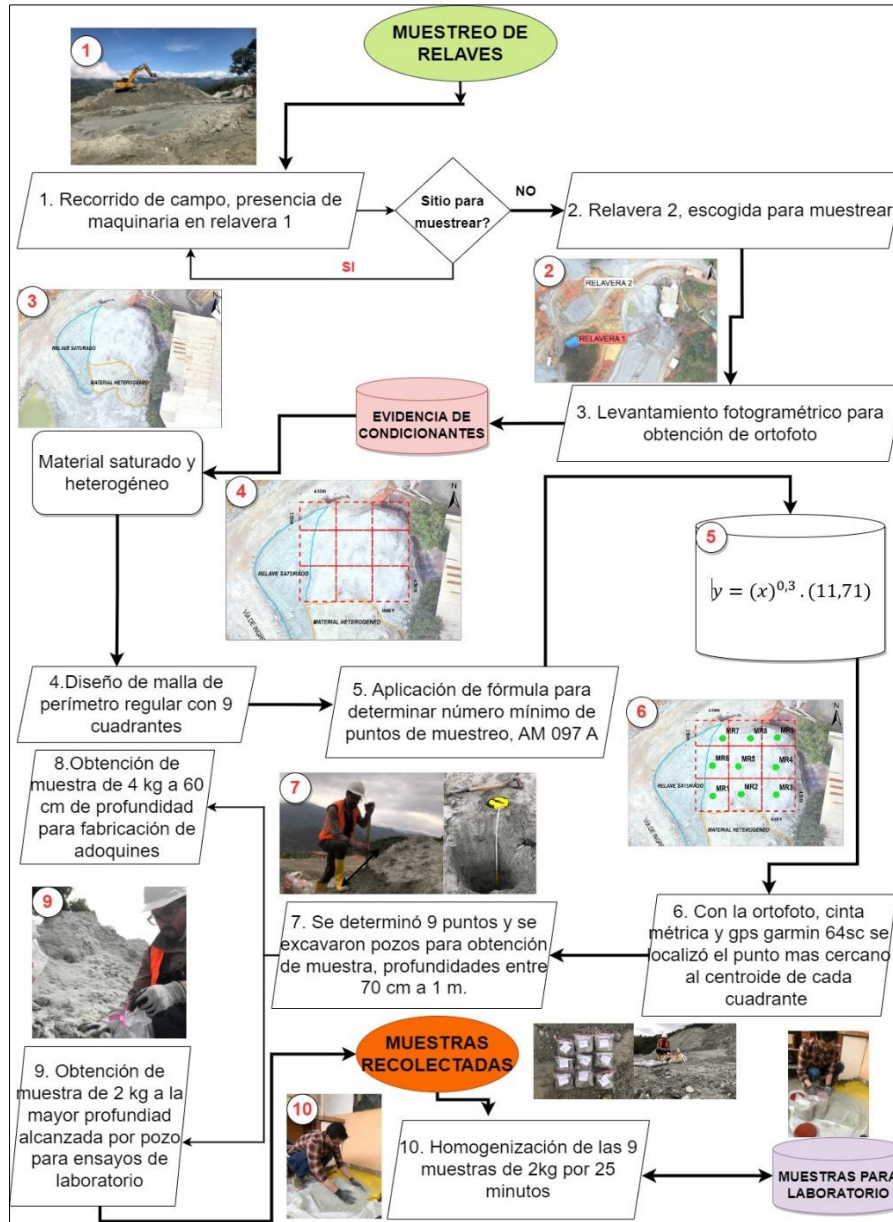


Figura 3. Diagrama de flujo procedimiento aplicado en muestreo de relaves.

5.3.2. Análisis mineralógicos de las muestras de relave en laboratorio

De la muestra total homogenizada se tomó una cantidad de 2kg (kilogramos) de relave y se la dispuso en una funda de polietileno para llevarlo al laboratorio de geoquímica analítica de la Universidad Técnica Particular de Loja donde se solicitó previa coordinación se realicen los análisis de fluorescencia de rayos x, espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES) y difracción de rayos x para identificar los elementos químicos mayoritarios, elementos traza y minerales presentes.

Los elementos químicos seleccionados de los patrones mayoritarios que ofrece el laboratorio para los análisis respectivos fueron: Arsénico (As), Mercurio (Hg), Azufre (S), Magnesio (Mg), Cobre (Cu), Plata (Ag), Aluminio (Al), Silicio (Si), Potasio (K), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Plomo (Pb), principalmente por dos situaciones relevantes, aquellos elementos que puedan coadyuvar al endurecimiento hidráulico que proporciona el cemento tal es el caso del calcio, silicio, aluminio y el hierro así como elementos pesados que suelen ser parte de los mecanismos de formación de aguas ácidas y contaminantes regularizados por la autoridad ambiental nacional competente (límites permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce), entre ellos se encuentra el arsénico, hierro, cobre, mercurio, plomo, azufre, entre otros elementos.

5.3.2.1. Muestreo de laboratorio

Los 2kg (kilogramos) de muestra entregada es sometida a un proceso de **roleo** que consiste en mezclar por 20 veces la misma muestra en un plástico de polietileno de baja densidad levantando cada uno de sus extremos del mismo recipiente en intervalos opuestos hasta que se haya homogenizado por completo la muestra.

Una vez homogenizada la muestra de 2kg (kilogramos) es moldeada en forma de pastel hasta que adopte un espesor de 1cm (centímetro) cuyo espécimen ha sido dividido en cuadrantes regulares de 3cm por 3cm (centímetros).

Se recoge en cada cuadrante un incremento de muestra hasta llegar a alcanzar una muestra definitiva de 200mg (miligramos), la misma que ingresa posteriormente a un proceso de trituración hasta alcanzar la malla 325 (45 micras), finalmente de este material molido se ha tomado por los especialistas de laboratorio las siguientes cantidades para los diferentes ensayos:

- 3gr (gramos) para el ensayo de fluorescencia de rayos x
- 0,25gr (gramos) para espectroscopía de emisión óptica
- 3gr (gramos) para difracción de rayos x

5.3.2.2. Fluorescencia de rayos x

Esta técnica consiste en encontrar elementos químicos mayoritarios, es decir aquellos en concentraciones mayores al 1%, la muestra de 3gr (gramos) se coloca en el centro del haz de luz que posee el equipo portátil espectrómetro de fluorescencia de rayos x marca Bruker S1 Turbo SD, luego se realiza el disparo de luz fluorescente por el lapso de 30s

(segundos) y se obtiene automáticamente la composición química en porcentajes de los elementos mayoritarios, generalmente este método los identifica como óxidos.

5.3.2.3. Espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES)

Este método es apropiado para concentraciones bajas de elementos químicos, donde el equipo de fluorescencia de rayos x no los puede detectar fácilmente, pudiendo llegar a encontrar incluso elementos traza de hasta 1ppb (parte por billón), se recoge la muestra de unos 0,25gr (gramos) y se la coloca en vasos de teflón agregándole ácido fluorhídrico, sulfúrico y nítrico.

La muestra preparada es ingresada a una microonda digestor y se la deja calentar a una temperatura de 230°C por un tiempo de 30 minutos, para luego enfriarla por un lapso de 15 minutos.

La muestra enfriada se trasvasa a 2 balones aforados con cada uno a 25ml (mililitros) para luego ingresarlos al equipo espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente marca Perkin Elmer para poder detectar los elementos traza en partículas por millón (ppm).

5.3.2.4. Difracción de rayos x

Este análisis mineralógico semicuantitativo refleja la composición de la parte cristalina de la muestra, su técnica se basa en la proyección de un haz de rayos x que incide sobre muestras de polvo por lo general, los rayos dispersos en los átomos que conforman la red cristalina llegan a presentar un cierto desfase, distorsionándose en su trayectoria de refracción, llegando a presentar solo algunos de ellos una interferencia constructiva.

En este método de análisis mineralógico se utilizó 3gr (gramos) de muestra de relave empleando el difractor Bruker D8 advance y el programa Highscore plus para la determinación cualitativa y semicuantitativa de los resultados obtenidos en base al difractograma.

5.3.2.5. Evaluación mineralógica cuali – cuantitativa

Una vez obtenidos los resultados fueron sistematizados en matrices con los valores cuali – cuantitativos, con ello hemos podido ordenar de mayor a menor la concentración por cada uno de los métodos aplicados.

Para la evaluación cuali – cuantitativa se tomó en cuenta los datos obtenidos ya ordenados y se correlacionaron con los elementos químicos que posee la tabla 2 del Acuerdo Ministerial 097 – A (ver tabla 4) con respecto a los límites máximos permisibles en suelos contaminados de acuerdo al uso de suelo, para este caso uso industrial, esto nos permitió seleccionar solo aquellos metales que tiene valor de fondo en mg/kg (miligramos/kilogramos) en este caso arsénico (As) cobre (Cu) y mercurio (Hg) los cuales pertenecen a las concentraciones traza detectados por espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES), con la finalidad de poder calcular el nivel de contaminación por medio del índice de geoacumulación (I-geo).

El índice de geoacumulación (I-geo) es un método que se ha venido aplicando para determinar la concentración de metales pesados en muestras de sedimentos, y suelos en este caso lo hemos acoplado para determinar el nivel de contaminación que posee el relave y en si el depósito (relavera 2) de la planta de beneficio Alto Vizcaya donde se obtuvieron las muestras.

5.3.2.6. Cálculo del índice de geoacumulación (I-geo)

Según Muller, 1969 el cálculo del índice de geoacumulación es aplicado para analizar la contaminación a partir de la relación de concentración de un analito (elemento químico encontrado) en la matriz de interés de estudio en referencia a los valores de control (límites permisibles), para ello hemos aplicado la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 \cdot B_n}$$

Donde:

(C_n) es la concentración medida del metal contaminante en mg/kg (miligramos/kilogramos) en el suelo, mientras que (B_n) es el valor de fondo geoquímico mg/kg (miligramos/kilogramos) del elemento en la muestra control.

Se realizaron los cálculos respectivos tanto para arsénico (As) cobre (Cu) y mercurio (Hg) cuyos valores finales se fueron comparando con el rango del valor (I-geo) (ver tabla 5) para obtener consecuentemente la clasificación (I-geo), determinando finalmente el nivel de contaminación cualitativo que posee el relave.

5.3.3. Fabricación de adoquines con un 30% de relave

5.3.3.1. Cálculo de dosificación empleada

Para la elaboración de los adoquines se coordinó previamente el apoyo logístico con el personal de la fábrica municipal del cantón Saraguro, tomando en cuenta en primera instancia la cantidad de adoquines que realizan por cada lote y la cantidad de material utilizado para el mismo.

El lote que el personal operativo tienen como patrón de producción son 5 tableros de 8 adoquines cada uno, obteniendo un total de 40 adoquines fabricados en cada operación, información importante que sirvió de referencia para establecer el cálculo de sustitución con un 30% de relave a la mezcla de agregados que consiste básicamente en arena mal gradada (arena gravosa), cemento y agua.

Las cantidades de agregados utilizados para los 40 adoquines elaborados por lote operativo corresponde a 40 palas de arena mal gradada, 1 saco de cemento de 50kg (kilogramos) y agua a conveniencia de la viscosidad necesaria que se requiera para la mezcla por lo regular 20L (litros) aproximadamente.

El objetivo principal fue llegar a reemplazar un 30% de la arena común utilizada, por el relave minero, para ello se hizo una regla de 3 simple directa la cual nos permitió proporcionar cada una de las cantidades equivalentes conforme a las dosificaciones que utiliza comúnmente la fábrica municipal de adoquines, es decir tomando como patrón de referencia 5 tableros de 40 adoquines por lote operativo para cada uno de los materiales que se usa en este proceso particular, el cual lo especificamos con mayor detalle de la siguiente manera:

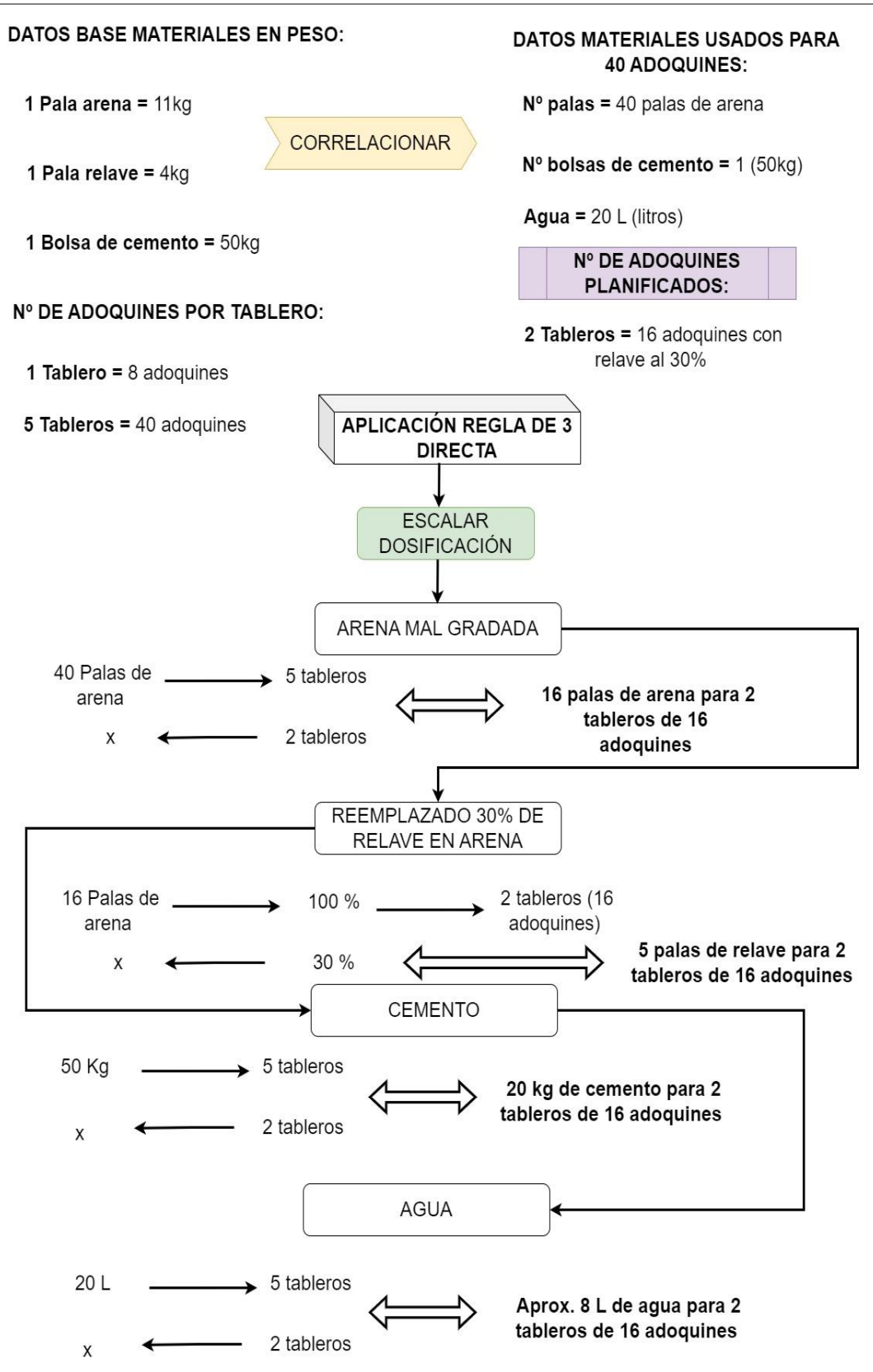


Figura 4. Cálculo de dosificaciones de los componentes que integran el adocquín fabricado asociando un 30% de relave minero.

De los cálculos establecidos se puede señalar que de las 16 palas de arena mal gradada calculadas se reemplazan 5 palas de relave quedando 11 palas de arena como parte de la dosificación final, para unificar las concentraciones en peso de los agregados se ha hecho uso del kilogramo, por lo que fue indispensable pesar la pala de arena y relave completamente llena y sacar los productos con el número de palas calculadas por cada componente.

Los resultados de las dosificaciones calculadas quedaron establecidos de la siguiente manera, los cuales fueron usados en la elaboración de los adoquines prueba para los ensayos consiguientes:

Tabla 12. Dosificaciones utilizadas en 2 tableros de 16 adoquines, incluyendo un 30% de relave minero.

Dosificación calculada con un 30 % de relave para la obtención de 2 tableros de 16 adoquines				
Material	Cantidad	Unidad /medida	Peso por pala kg	Dosificación final estimada
Arena mal gradada	11	Pala	11	121 kg
Relave	5	Pala	4	20 kg
Cemento	20	kg	-	20 kg
Agua	8	L	-	8 L
Kilogramos (kg); litro (L)				

5.3.3.2. Fabricación de adoquines con 30% de relave

El proceso de fabricación de adoquines con un 30% de relave minero ha sido el mismo que regularmente se aplica para elaborar los adoquines que suelen usarse en el ornato de las calles urbanas del cantón Saraguro, es decir no se ha modificado ninguna fase salvo el material constitutivo (relave) el cual fue tomado de las muestras obtenidas a 60cm (centímetros) de profundidad durante el proceso de muestreo, cuyo material ha sido debidamente homogenizado; su procedimiento combina técnicas manuales como mecanizadas y se agrupan en 4 sencillos pasos que se describen de la siguiente manera:

La arena utilizada no posee un diámetro característico, el único tratamiento que se realiza es clasificarla en una zaranda fija cuya apertura de la celda en el mallado es de 16mm² (milímetro cuadrado), esta particularidad ha permitido identificarla como una arena mal gradada (arena gravosa), el material pasante se lo acopla cerca de la mezcladora mecánica previo hacer incorporada con los demás componentes.

Se procedió a pesar los agregados, obteniendo así 20kg (kilogramos) de relave, 121kg (kilogramos) de arena gravosa, y 20kg (kilogramos) de cemento, todos estos materiales fueron incorporados a la mezcladora en el mismo orden conforme han sido pesados y se

procedió a mezclarlos por el lapso de 7min (minutos) añadiéndose paulatinamente los 8L (litros) de agua hasta que se verifique una viscosidad adecuada que permita la compactación del material homogenizado en la siguiente fase.

El material mezclado es depositado en el piso con palas, para luego irlo rejuntando e incorporándolo en los 8 moldes tipo cruz que posee la prensa hidráulica donde el material es compactado y vibrado a la vez por el lapso de 25s (segundos) hasta que salen los adoquines fabricados en series de 8, el compactado hidráulico se repitió por dos veces hasta obtener los 16 adoquines.

Finalmente, cada serie de 8 adoquines es receptada en tableros móviles para ser depositados en el piso hasta que puedan fraguar temporalmente, al día siguiente fueron retirados del área de almacenamiento y llevados a mi propiedad hasta que cumplan los 28 días de fraguado.

Cabe destacar que de los 16 adoquines fabricados se decidió escoger la mitad más uno (9 adoquines), debido a que no todos salen en buenas condiciones por defectos de fábrica en sus caras superior como inferior, esto se debe principalmente a la descompresión que se efectúa al momento de retirar los adoquines frescos de los moldes, cuya pérdida de masa puede afectar la resistencia a la compresión ya que no se estaría comportando el adoquín como un cuerpo completamente rígido, por lo tanto, se escogieron los ejemplares relativamente perfectos en su geometría.

De los 9 adoquines seleccionados, 8 de ellos fueron utilizados para realizarles el ensayo a la compresión, mientras que el adoquín restante se lo utilizó para realizar la prueba de lixiviación respecto al análisis químico de aguas.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de todo el proceso que se llevó a cabo para obtener los adoquines tipo cruz con un 30% de relave en su composición:



Figura 5. Diagrama de flujo, procedimiento para obtener adoquines con 30% de relave en su composición.

5.3.4. Ensayo a la compresión de adoquines y granulometría de relave realizados en laboratorio

Para la obtención de los resultados respecto a la resistencia a la compresión se optó por enviar a analizar las muestras de adoquines considerando dos escenarios esenciales para la interpretación de este parámetro desde el punto de vista comparativo, muy aparte de los índices estándar de la normas de calidad establecidas en el país, las muestras fueron ingresadas al laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja, para el análisis respectivo.

En primera instancia se solicitó se realice el ensayo a la compresión simple de 8 adoquines comunes, es decir sin la presencia de relave, a los 28 días de fraguado con el propósito de conocer el estado de la resistencia característica.



Figura 6. Ensayo a la compresión de adoquines sin relave minero.
Nota. Adaptado de *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

De la misma manera se solicitó se ejecute el ensayo a la compresión simple de los 8 adoquines con el 30% de relave a los 28 días de fraguado con el mismo método, técnica y parámetros aplicados en la fase anterior, como se había dado a conocer el propósito esencial adicional es saber si empeora, se mantiene o mejora la resistencia característica calculada.



Figura 7. Ensayo a la compresión de adoquines con 30% de relave en su composición.
Nota. Adaptado de *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Para el número de muestras a ensayar hemos tomado el criterio de la norma internacional ASTM C936/C936M - 16, 2016, la cual dentro de su ítem muestreo y pruebas considera que para la resistencia a la compresión como criterio de calidad se deben muestrear un mínimo de 3 especímenes, en este caso se han considerado los 8 adoquines por cada caso (con y sin relave).

En todas las muestras enviadas no fue conveniente humedecerlas en el transcurso de los 28 días de fraguado ya que se decidió mantener la condición de secado natural conforme lo realiza la fábrica municipal, es decir una vez que salen elaborados son puestos a la

intemperie hasta su disposición final sean en calles principales o secundarias, simplemente fueron humedecidas 24 horas antes del ensayo.

Los 16 adoquines con y sin relave fueron debidamente codificados con la finalidad de llevar una secuencia y tratamiento de los datos obtenidos dentro y fuera del laboratorio respecto a las dimensiones, peso, cargas aplicadas, resistencia, entre otros.

5.3.4.1. Método de ensayo a la compresión en laboratorio

El método que aplicó el laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja fue el establecido por la norma técnica ecuatoriana INEN 1485 sobre todo para la calibración del equipo modelo shimadzu X2000, ya que esta normativa es apta para cualquier tipo de adoquín ya sea para uso peatonal, de vehículo liviano como pesado.

El proceso consistió en ingresar cada adoquín a la aplicación de una tensión creciente de compresión hasta provocar el fallamiento.

Cada adoquín ha sido ubicado en el equipo con la cara de desgaste hacia arriba de tal forma que el eje vertical como horizontal de la muestra esté alineado con las placas que realizan la presión. La presión aplicada fue de 15Mpa (megapascales) por el tiempo de 1min (minuto) hasta que se supera la resistencia del adoquín.

En el equipo shimadzu X2000 se ingresa el área efectiva de la cara superior del adoquín previamente calculada, ya calibrado el equipo con el área y la presión aplicada por el tiempo de 1min (minuto) se obtiene directamente el valor de la resistencia a la compresión de cada uno de los adoquines ensayados, este resultado es multiplicado por el factor de corrección, tomado de la Tabla 2 de la norma INEN 1488 (ver tabla 7), en este caso el factor fue el valor de 1,11 con la finalidad de acoplar el efecto espesor – ancho y la influencia de sus bordes biselados que presenta el adoquín.

5.3.4.2. Resistencia característica del adoquín

Con los datos de la resistencia a la compresión otorgados por el laboratorio tanto de los adoquines comunes y de los adoquines con un 30% de relave se procedió a calcular por separado la resistencia característica acorde a lo que establece la norma INEN 1485, para ello hemos escogido la siguiente fórmula empezando a calcular la desviación estándar:

$$S = \frac{\sqrt{\Sigma(fi)^2 - \frac{(\Sigma fi)^2}{10}}}{9}$$

Donde:

- (S) = desviación estándar en Mpa,
- (fi) = la resistencia a la compresión de cada una de las muestras en Mpa,
- (fm) = media aritmética (promedio) de la resistencia a la compresión de todas las muestras en Mpa,
- (fk) = resistencia característica.

Finalmente, la resistencia característica se obtuvo aplicando la siguiente fórmula:

$$fk = (fm - 1,64S)$$

Como se había indicado el cálculo de la resistencia a la compresión característica fue aplicada para los dos tipos de adoquines por lo tanto se obtuvieron dos resultados comparativos sujetos a análisis de criterio, el resultado de la resistencia característica de los adoquines fabricados con un 30% de relave fueron comparados con la norma técnica INEN 1488 aplicada en nuestro país considerando la resistencia a la compresión según el tipo de uso para lo cual dicha normativa ha establecido sus rangos comparativos (ver tabla 9).

5.3.4.3. Análisis de las dimensiones nominales

Los 8 adoquines con presencia del 30% de relave objeto de estudio fueron sometidos a una evaluación de sus dimensiones nominales como parte de otro criterio de calidad tomando en cuenta lo establecido en la norma técnica INEN 3040 (ver tabla 7) la cual hace hincapié en la discrepancia que debe existir entre dos dimensiones de espesor de un mismo adoquín siendo esta $\leq 3\text{mm}$ (milímetros).

Así mismo tomando como referencia la norma ASTM C936/C936M - 16, 2016 dentro de los requerimientos físicos que deben poseer las unidades para pavimentación con hormigón sólido se requiere de espesores mínimos de 60mm, cuya especificación ha sido correlacionada con las dimensiones nominales medidas en los 8 adoquines con relave.



Figura 8. Medición de espesores en adoquines con relave.
Nota. Adaptado de *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

5.3.4.4. Granulometría del relave mediante tamizado y sedimentación

Para verificar el tamaño granulométrico característico de la malla 200 (0,075 mm) del relave y sus diámetros de partículas inferiores determinados por los porcentajes pasantes del tamiz N°200, se optó por enviar 2kg (kilogramos) de muestra al laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja, para que se realice el análisis de tamizado y sedimentación por hidrometría, cuyo procedimiento tomó como referencia la norma ASTM D 422-63 y AASHTO T88-00 aplicando el siguiente proceso:

De los 2kg de relave se obtuvo una muestra de 50gr (gramos) para el ensayo, como el propósito es medir el porcentaje de partículas muy finas es necesario que no se formen grumos, para ello se ha hecho uso de hexametáfosfato de sodio (NaPO_6) disuelto al 4% en agua destilada a 125ml con el objetivo de mantenerlas separadas. Esta concentración del 4% es colocada en la muestra seca de relave, se agita minuciosamente con una varilla de vidrio y se deja en reposo durante un período de 24 horas.

Debido a que no se puede realizar las lecturas de las suspensiones del suelo en el fondo del menisco, las lecturas se deben realizar en la parte superior (de la mezcla) por cuanto se aplica una corrección por defloculante o punto cero (C_d), y menisco (C_m), y se procede a calibrar el hidrómetro, conforme a los siguientes valores:

- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) = 18
- Defloculante (cd) = 7,91
- Menisco (cm) = 1

Pasada las 24 horas de haber estado sumergido el material en la disolución de hexametáfosfato, se procede a verterlo en el cilindro de sedimentación de 1000ml (mililitros) y se añade agua destilada percatándose de no pasarse la medida indicada para tener una lectura clara, y se ejerce una agitación por el lapso de 1 min (minuto).

Se deja la muestra preparada en un lugar plano donde no exista movimiento y se introduce el hidrómetro para comenzar a realizar las lecturas, finalmente se toma los datos de temperaturas y lectura de hidrómetro de acuerdo al tiempo expuesto en los resultados, tal como lo indica la norma antes mencionada.



Figura 9. Insumos utilizados y aplicación del ensayo de densidades por hidrometría para determinar la granulometría del relave.

Nota. Adaptado de *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

5.3.5. Análisis químico de aguas en laboratorio

Para sustentar parte del objetivo 2 respecto a la viabilidad ambiental del relave como elemento constitutivo en la fabricación de adoquines, se propuso enviar a analizar las muestras de agua que provienen del lavado del relave minero muestreado y de la prueba de lixiviación del adoquín fabricado con un contenido del 30% de relave en su composición, para ello como referencia se tomaron los elementos químicos traza y mayoritarios identificados en el análisis mineralógico del relave con especial atención al arsénico, cianuro, mercurio, plata, hierro, sulfuros y sulfatos, cuyos componentes son regulados por la autoridad ambiental nacional por su peligrosidad que representan y suelen ser parte de la formación y composición

de aguas ácidas, el propósito fue identificar las cantidades de aquellos elementos liberados como iones en el agua para los posteriores análisis comparativos respectivos.

Los parámetros y elementos químicos que se propusieron identificar fueron: Arsénico (As), Mercurio (Hg), Manganeso (Mn), Magnesio (Mg), Cobre (Cu), Plata (Ag), Aluminio (Al), Silicio (Si), Potasio (K), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Sodio (Na), Ph (potencial de hidrógeno), sulfatos (SO_4^{2-}), sulfuros (S^{2-}), cianuro (CN^-), sólidos suspendidos totales y sólidos totales.

5.3.5.1. Preparación de las muestras de agua

Para obtener las muestras de agua representativas estas fueron sometidas a dos pruebas las cuales su objetivo principal fue prepararlas adecuadamente recibiendo contacto directo por una parte con el relave minero y por otra con el adoquín elaborado con un 30% de relave.

- **Preparación de la muestra de agua con relave**

Esta técnica consistió en mezclar 500gr (gramos) de relave minero en 1000ml (mililitros) de agua destilada y desionizada por un tiempo de 12 horas, posteriormente fue filtrada al vacío para evitar mayores concentraciones de partículas en suspensión y obtener la solución final lista para el análisis químico la cual fue envasada en recipientes color ámbar de 1000ml (mililitros) de capacidad.



Figura 10. Diagrama de flujo, preparación de muestra de agua obtenida del lavado de relave minero.

- **Preparación de la muestra por lixiviación**

Este procedimiento lo hemos adaptado a partir del método 1315 provisto por la Agencia de Protección Ambiental el mismo que considera ensayar muestras monolíticas o granulares, para el presente caso al adoquín fabricado lo hemos identificado como elemento monolítico, se lo conoce también como procedimiento semidinámico de lixiviación, y se detalla en los siguientes pasos:

Este ensayo fue realizado a una temperatura ambiente de $\pm 18^{\circ}\text{C}$, iniciando en medir la masa del espécimen cuya variable fue monitoreada al inicio y al final del proceso.

En un recipiente plástico se colocó el adoquín elaborado con 30% de relave y se llenó con 4850 mililitros (ml) de agua desionizada de tal manera que cubra al adoquín en su totalidad, luego se cubrió con una tapa y fue colocado en un lugar seguro dejándolo reposar por 14 días. El propósito de este ensayo es notar el cambio de masa es decir la absorción del eluyente por la matriz (ganancia de masa) o erosión de la matriz (pérdida de masa).

En el caso de pérdida de masa esto está relacionado con la liberación de metales pesados o sólidos en suspensión que se han desprendido del adoquín, para verificar aquello se recogió una muestra de agua de 1000 mililitros (ml) a los primeros 14 días ya que el método 1315 establece el período de cambio del eluyente en el tiempo indicado para obtener información representativa.

La muestra fue recolectada en envases color ámbar de capacidad de 1000ml (mililitros) para llevarlos al laboratorio de análisis químico de aguas de la Universidad Técnica Particular de Loja para los respectivos estudios.

Finalmente se procedió a pesar el adoquín una vez sacado del recipiente en el que reposaba completamente sumergido para verificar si el mismo ha ganado peso por absorción, así como a medir la cantidad de agua resultante.



Figura 11. Diagrama de flujo, preparación de muestra lixiviada desde el adoquín.

Las muestras de aguas recolectadas fueron expuestas con los reactivos químicos respectivos que posee el laboratorio para poder revelar cada uno de los elementos químicos puestos a identificarlos mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica.

Los resultados obtenidos fueron interpretados de manera cuali – cuantitativa en base a los límites de descarga en cuerpos de agua dulce que se encuentran en la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente, donde se determinó la viabilidad ambiental del relave como parte del agregado en la fabricación de adoquines.

El establecimiento de los dos escenarios comparativos tanto de los resultados químicos del agua proveniente del lavado del relave como de la prueba de lixiviación son componentes clave para verificar y comparar la diferencia de concentración de elementos químicos pesados que existen al encontrarse el relave en diferentes disposiciones es decir libre como confinado en el adoquín.

6. Resultados

De los datos obtenidos durante todo el proceso de investigación podemos exponer los resultados que se describen en secuencia acorde a al cumplimiento de cada uno de los objetivos:

6.1. Establecer el método apropiado de muestreo en el depósito de relaves para obtener muestras ideales que permitan la evaluación mineralógica representativa.

Para haber obtenido muestras ideales que representen la composición mineralógica de todo el conjunto de relaves dispuestos en la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya se aplicó y se diseñó un muestreo sistemático de malla regular tal como se muestra en la figura 12, a continuación:

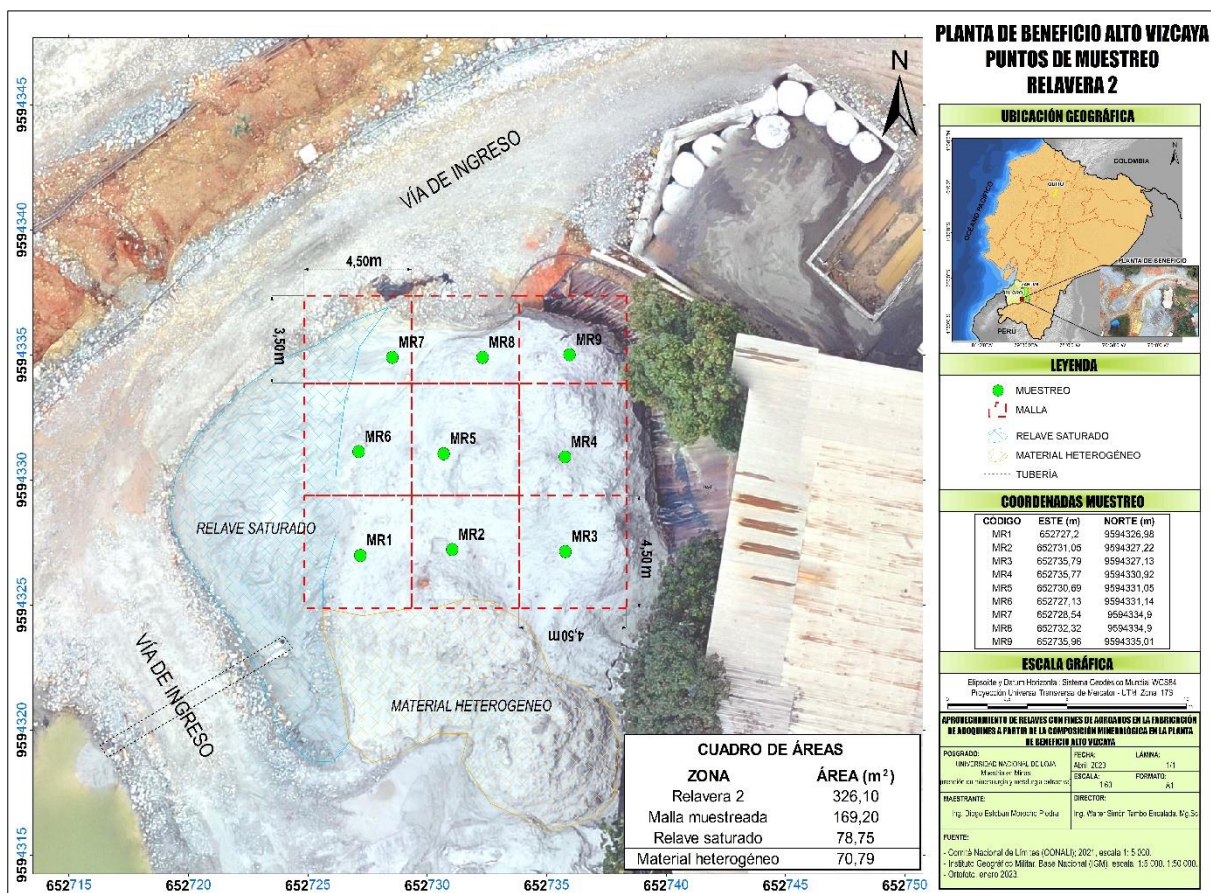


Figura 12. Ubicación de puntos y malla de muestreo en la relavera 2, planta de beneficio Alto Vizcaya.

Del cual hemos podido obtener las siguientes áreas, en base a las condicionantes identificadas en campo:

Tabla 13. Datos técnicos obtenidos de las diferentes zonas identificadas en campo con respecto a la relavera 2.

Zona	Área (m ²)
Relavera 2	326,10
Malla muestreada	169,20
Relave saturado	78,75
Material heterogéneo	70,79
Metro cuadrado (m ²)	

Al tomar el área calculada de la superficie óptima para muestrear (malla muestreada 169,20m²) derivada de un proceso exhaustivo de selección y de la representación geográfica que agrupan todos los parámetros técnicos considerados, permitió determinar el número mínimo de puntos de muestreo.

El número referencial de puntos de muestreo se obtuvo de acuerdo al siguiente cálculo asociado a suelos contaminados cuyas superficies estén comprendidas entre menores a 0,1 hectáreas (Ha) y mayores a 30 hectáreas (Ha):

$$y = (x)^{0,3} \cdot (11,71)$$

- Y= número mínimo de puntos de muestreo
- X= superficie del suelo de la zona de estudio expresada en hectáreas.

Entonces:

Área muestreada= 169,20m² equivale a 0,016 Ha

$$y = (0,016 \text{ Ha})^{0,3} \cdot (11,71)$$

y = 3,38 puntos de muestreo, equivalente al inmediato superior 4.

Para el presente caso considerando el número de puntos de muestreo calculado se decidió establecer un número mayor que corresponde a 9 puntos muestreados valor que se acopló a la extensión total del área óptima muestreada (ver figura 12), los cuales se detallan a continuación:

Tabla 14. Ubicación geográfica y profundidades alcanzadas en los 9 puntos muestreados a partir de una malla sistemática regular.

Código	Coordenadas (UTM WGS 84, 17 sur)		Profundidad alcanzada, muestras para laboratorio (cm)	Profundidad alcanzada, relave para adoquines (cm)
	Este (m)	Norte (m)		
MR1	652727,20	9594326,98	90	60
MR2	652731,05	9594327,22	70	60
MR3	652735,79	9594327,13	70	60
MR4	652735,77	9594330,92	90	60
MR5	652730,69	9594331,05	70	60

Código	Coordenadas (UTM WGS 84, 17 sur)		Profundidad alcanzada, muestras para laboratorio (cm)	Profundidad alcanzada, relave para adoquines (cm)
	Este (m)	Norte (m)		
MR6	652727,13	9594331,14	70	60
MR7	652728,54	9594334,90	80	60
MR8	652732,32	9594334,90	100	60
MR9	652735,96	9594335,01	100	60
Profundidad promedio			82,22	60

Muestra de relave (MR); metro (m); centímetro (cm); Universal Transversal de Mercator (UTM); Sistema Geodésico Mundial (WGS 84)

Considerando el nivel alcanzado de profundidad se obtuvo un valor de 82,22 centímetros (cm) de promedio para las muestras de relave usadas para los análisis y ensayos de laboratorio, mientras que el material condicionado para la dosificación en la elaboración de adoquines el promedio de profundidad para extracción del relave considerado fue 60 centímetros (cm).

Las cantidades de muestra de relave recolectadas fueron distribuidas de la siguiente manera tomando en cuenta el propósito destinado:

Tabla 15. Cantidades obtenidas de relave para ensayos, análisis de laboratorio, y dosificaciones para elaboración de adoquines.

Código	Profundidad alcanzada, muestras para laboratorio (cm)	Profundidad alcanzada, relave para adoquines (cm)	Peso estimado de muestra para análisis y ensayos (kg)	Peso estimado de muestra para dosificación (kg)
MR1	90	60	2	4
MR2	70	60	2	4
MR3	70	60	2	4
MR4	90	60	2	4
MR5	70	60	2	4
MR6	70	60	2	4
MR7	80	60	2	4
MR8	100	60	2	4
MR9	100	60	2	4
Peso total			18	36

Centímetro (cm); kilogramo (kg)

Hemos podido obtener alrededor de 54 kilogramos (kg) de relave con el muestreo sistemático, cuya muestra global ha sido la idónea en todos los procesos tanto de ensayos y análisis de laboratorio como en la fabricación de adoquines indispensables para sustentar el trabajo de investigación.

6.2. Interpretar la viabilidad mineralógica y ambiental del relave, como elemento constitutivo en la fabricación de adoquines.

Tomando en consideración los resultados cuali – cuantitativos de los ensayos mineralógicos realizados en el laboratorio de geoquímica de la Universidad Técnica Particular

de Loja de los elementos químicos seleccionados para ser identificados, se pudieron detectar los siguientes:

6.2.1. Fluorescencia de rayos x

Mediante la técnica de fluorescencia de rayos x por el método mining light elements (MLE) se pudo identificar la composición química de elementos mayoritarios (> 1%) como son:

Tabla 16. Determinación de elementos mayoritarios (> 1%) por la técnica de fluorescencia de rayos x.

Relación mineralógica	Composición	Denominación	Concentración (%)
Cuarzo	SiO ₂	Óxido de silicio	69,6
	Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	12,1
	S	Azufre	2,56
Hematita	Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	1,79
	CaO	Óxido de calcio	1,46
	K ₂ O	Óxido de potasio	1,38
Porcentaje (%)			

Nota. Adaptado de resultados de fluorescencia de rayos x, (pág. 2), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

En la figura 13 podemos apreciar la concentración porcentual de cada uno de los elementos mayoritarios teniendo como predominante el óxido de silicio (SiO₂) con un 69,6% seguido de óxido de aluminio (Al₂O₃) con un 12,1%, llegando a alcanzar valores mínimos de concentración con el óxido de potasio (K₂O) con un 1,38%.

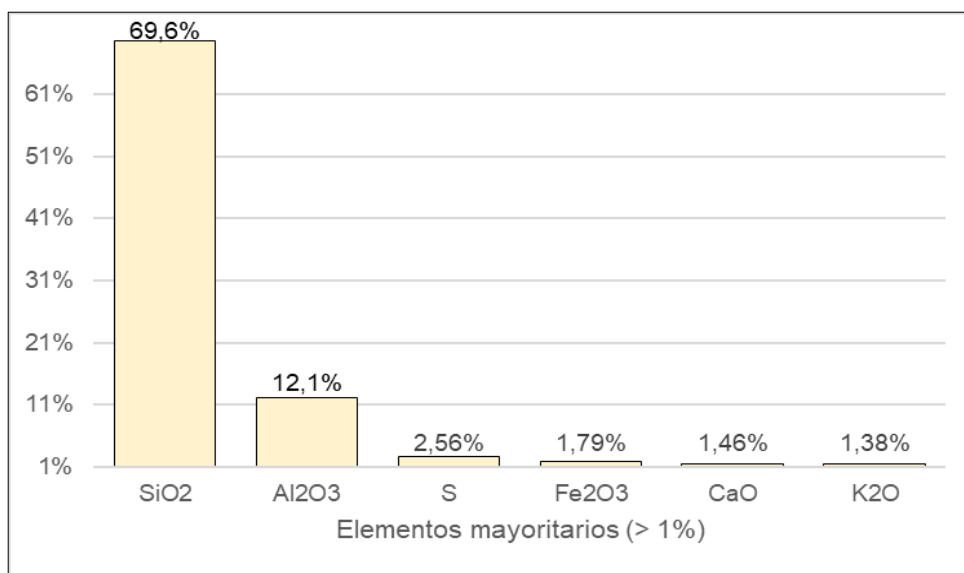


Figura 13. Concentración porcentual de los elementos mayoritarios determinados por fluorescencia de rayos x.

Nota. Adaptado de resultados de fluorescencia de rayos x, (pág. 2), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

6.2.2. Espectroscopía de emisión óptica

Mediante la técnica de espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES) por el método de plasma acoplado se lograron identificar alrededor de 5 elementos químicos minoritarios o traza ($\leq 0,1\%$), los cuales poseen sus concentraciones características de la siguiente manera:

Tabla 17. Determinación de elementos traza ($\leq 0,1\%$) por la técnica de espectroscopía de emisión óptica.

Elemento químico	Denominación	Concentración (ppm)
Mg	Magnesio	3139,8
Cu	Cobre	416,6
Hg	Mercurio	110,9
Ag	Plata	44,4
As	Arsénico	<0.01

Partes por millón (ppm); podemos correlacionar que 1ppm equivale a 1gramo/tonelada (gr/tn); 1ppm equivale a 0,0001%.

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de emisión óptica*, (pág. 1), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

En la figura 14 podemos evidenciar la concentración en partes por millón (ppm) de cada uno de los elementos traza teniendo como predominante el magnesio (Mg) con 3139,8ppm, seguido de cobre (Cu) con 416,6ppm, llegando a alcanzar valores mínimos de concentración con el arsénico (As) <0,01ppm.

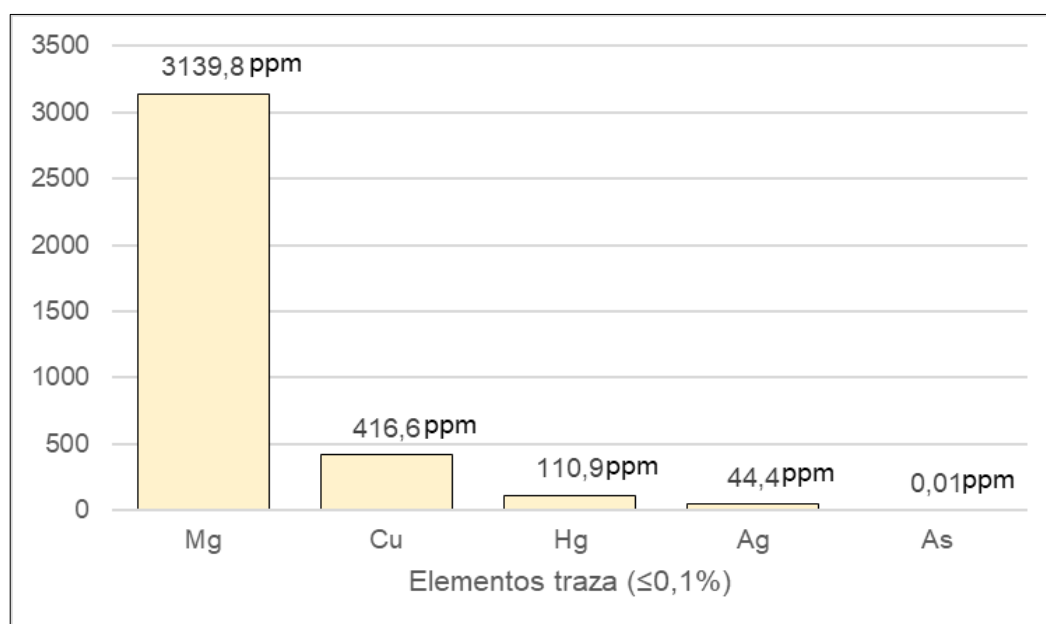


Figura 14. Concentración de elementos químicos traza determinados por espectroscopía de emisión óptica.

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de emisión óptica*, (pág. 1), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

6.2.3. Difracción de rayos x

Con la técnica de difracción de rayos x (DRX) utilizando el programa para la determinación cualitativa y semicuantitativa HighScore Plus, se realizó el análisis mineralógico considerando esencialmente la parte cristalina de la muestra, obteniendo las semicuantificaciones de los siguientes minerales identificados:

Tabla 18. Determinación de minerales por semicuantificación (%) en función de la estructura cristalina de la muestra de relave por la técnica de difracción de rayos x.

Fase mineral	Composición	Semicuantificación (%)
Cuarzo	SiO ₂	88,6
Pirita	FeS ₂	5,4
Clorita	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	3,7
Titanomagnetita	Fe ²⁺ (Fe ³⁺ ,Ti) ₂ O ₄	1,3
Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂	0,9
Porcentaje (%)		

Nota. Adaptado de *resultados de fluorescencia de rayos x, (pág. 2), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.*

En la figura 15 podemos apreciar la concentración de la composición cristalina expresada en porcentaje que posee la muestra teniendo como mineral predominante el cuarzo (SiO₂) con un 88,6%, seguido de pirita (FeS₂) con un 5,4%, llegando a alcanzar valores mínimos de concentración con la biotita con un 0,9%.

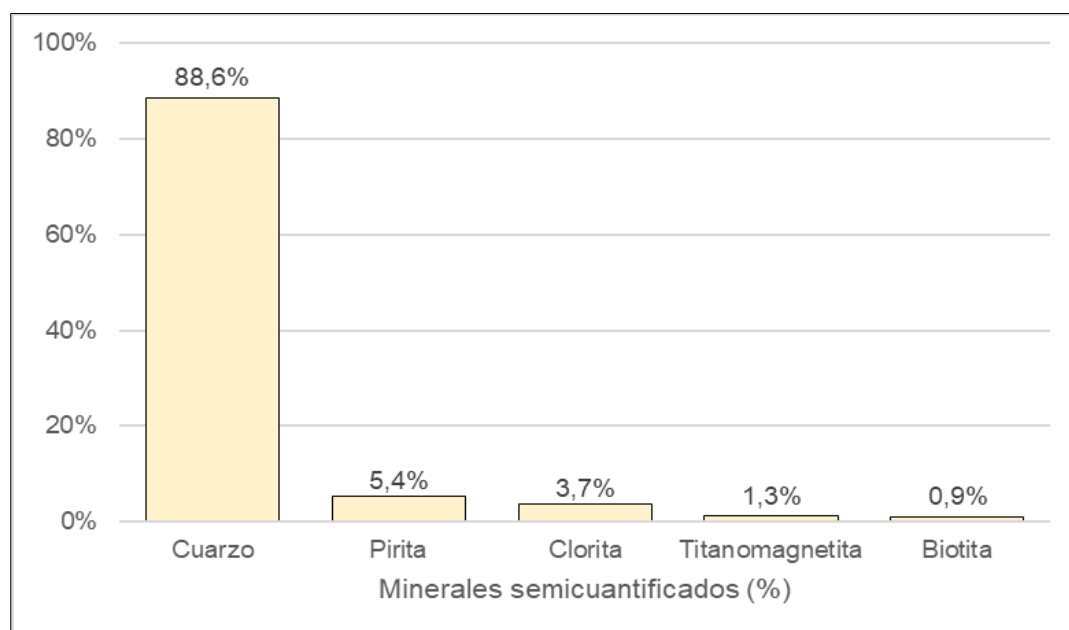


Figura 15. Identificación de minerales por semicuantificación en su forma cristalina mediante la técnica de difracción de rayos x.

Nota. Adaptado de *resultados de fluorescencia de rayos x, (pág. 2), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.*

Las representaciones cristalinas de las muestras se pueden ver plasmadas en el difractograma, pudiendo evidenciar los picos característicos de cada especie mineral que representa los planos atómicos, mientras que su posición de cada uno de estos indica la distancia interplanar de sus ángulos, según la representación gráfica (ver figura 16) una vez determinada por el programa HighScore Plus de lo que se puede apreciar el cuarzo es el que sobresale reflejándose aproximadamente desde los 20 grados ($^{\circ}$), seguido de la pirita, aunque en menor intensidad reflejada, para luego identificar la biotita desde los 8 grados ($^{\circ}$) con su pico de muy alta intensidad alcanzado a los 27 grados ($^{\circ}$), y finalmente la clorita y titanomagnetita cuyas huellas reflejadas son casi despreciables tal como se puede evidenciar a continuación:

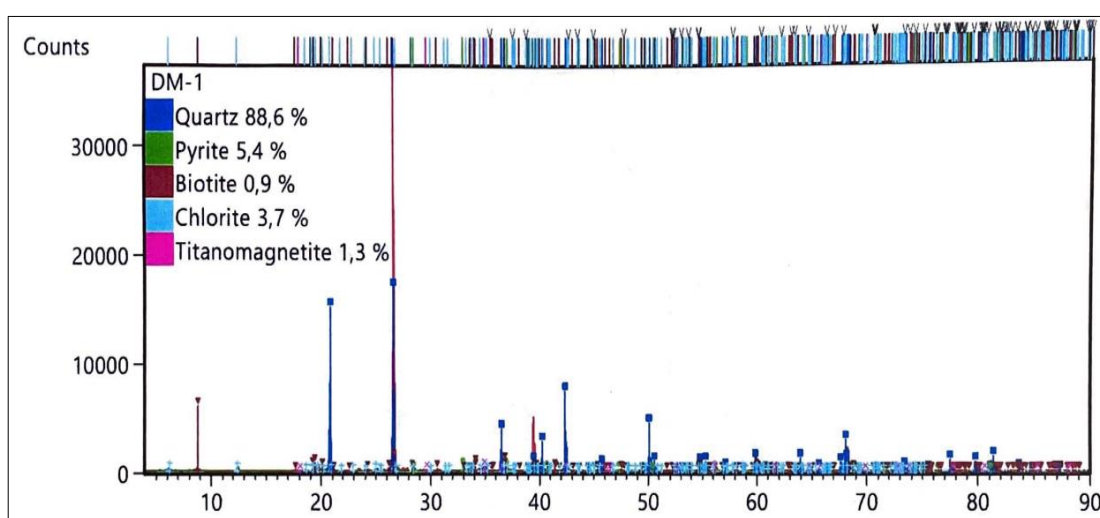


Figura 16. Difractograma obtenido desde el programa HighScore Plus.

Nota. Adaptado de *resultados de fluorescencia de rayos x*, (pág. 2), laboratorio de geoquímica analítica, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Para poder evaluar de manera cuali – cuantitativa la concentración mineralógica del relave como tal desde el punto de vista ambiental se categorizó el nivel de contaminación que posee, para ello hemos adaptado el cálculo de índice de geoacumulación que está destinado principalmente para determinar la concentración de metales pesados en muestras de sedimentos, y suelos.

Los metales pesados que tienen valor de fondo geoquímico (límite máximo permisible), tomando en cuenta que la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya se encuentra asentada dentro de un uso de suelo industrial son: el arsénico (As), cobre (Cu), y mercurio (Hg) esto además en función de la tabla 2 del Acuerdo Ministerial 097 – A referente a criterios de remediación, según el uso de suelo, consideraciones de límites máximos permisibles.

Cabe indicar que los metales antes mencionados fueron identificados como elementos traza por la técnica de espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES), por lo tanto, los valores considerados en el cálculo fueron los siguientes:

Tabla 19. Valores de concentración de elementos traza y valores de fondo en relación a la tabla 2 del acuerdo ministerial 097 A referente a criterios de remediación, según el uso de suelo.

Elemento	Símbolo	Concentración (Cn) mg/kg	Valor de fondo (Bn) mg/kg
Arsénico	As	0,01	12
Cobre	Cu	416,6	91
Mercurio	Hg	110,9	10

miligramo/kilogramo (mg/kg)

Para unificar las unidades de medida se tomó en cuenta que 1 parte por millón (1ppm), equivale a 1miligramo/kilogramo (mg/kg), la ecuación propuesta por Muller 1969 fue utilizada para calcular el índice de geoacumulación:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 \cdot B_n}$$

Donde:

(Cn) es la concentración medida del metal contaminante en mg/kg en el suelo, mientras que (Bn) es el valor de fondo geoquímico mg/kg del elemento en la muestra de control, obteniendo los siguientes resultados:

Arsénico:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{0,01mg/kg}{1,5 * 12mg/kg}$$

$$I_{geo} = \log_2 \frac{0,01mg/kg}{18mg/kg}$$

$$I_{geo} = \log_2 (0,0006)$$

$$I_{geo} = -10,81$$

Mercurio:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{110,9mg/kg}{1,5 * 10mg/kg}$$

$$I_{geo} = \log_2 \frac{110,9mg/kg}{15mg/kg}$$

$$I_{geo} = \log_2 (7,39)$$

$$I_{geo} = 2,89$$

Cobre:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{416,6mg/kg}{1,5 * 91mg/kg}$$

$$I_{geo} = \log_2 \frac{416,6mg/kg}{136,5mg/kg}$$

$$I_{geo} = \log_2 (3,05)$$

$$I_{geo} = 1,61$$

De los índices de geoacumulación calculados y considerando la clasificación del grado de contaminación de suelo por Muller 1969 obtuvimos la siguiente categorización del nivel de contaminación encontrado en el relave minero:

Tabla 20. Determinación de los niveles de contaminación del relave de la planta de beneficio Alto Vizcaya.

Elemento	Símbolo	I - geo	I - geo valor	I - geo clasificación	I - geo nivel contaminación
Arsénico	As	-10,81	<0	0	No contaminado
Cobre	Cu	1,61	1-2	2	Moderadamente contaminado
Mercurio	Hg	2,89	2-3	3	De moderado a fuertemente contaminado

Índice de geoacumulación (I - geo)

Nota. Adaptado de *evaluación del índice de geoacumulación*, (pág 41), Muller, 1969, como se citó en Pérez, 2020.

Con los resultados finales tenemos un rango cerrado de niveles de contaminación que va desde un relave no contaminado representado por el arsénico (As), hasta un relave moderado a fuertemente contaminado protagonizado por el mercurio (Hg).

En la figura 17 podemos analizar la tendencia de crecimiento del nivel de contaminación del relave cuya situación se debe al factor condicionante que tiene el valor de fondo (límite máximo permisible) en relación obviamente proporcional a la concentración detectada del metal pesado, es decir mientras más limitado o menor sea el límite permisible los índices de geoacumulación entrarán en rangos de valoración mayores por lo tanto el nivel de contaminación podría llegar a ser severo, en este caso la tendencia de crecimiento la lidera el mercurio (Hg) con un 2.9 I-geo obtenido de acuerdo a los elementos traza detectados, tal como se muestra a continuación:

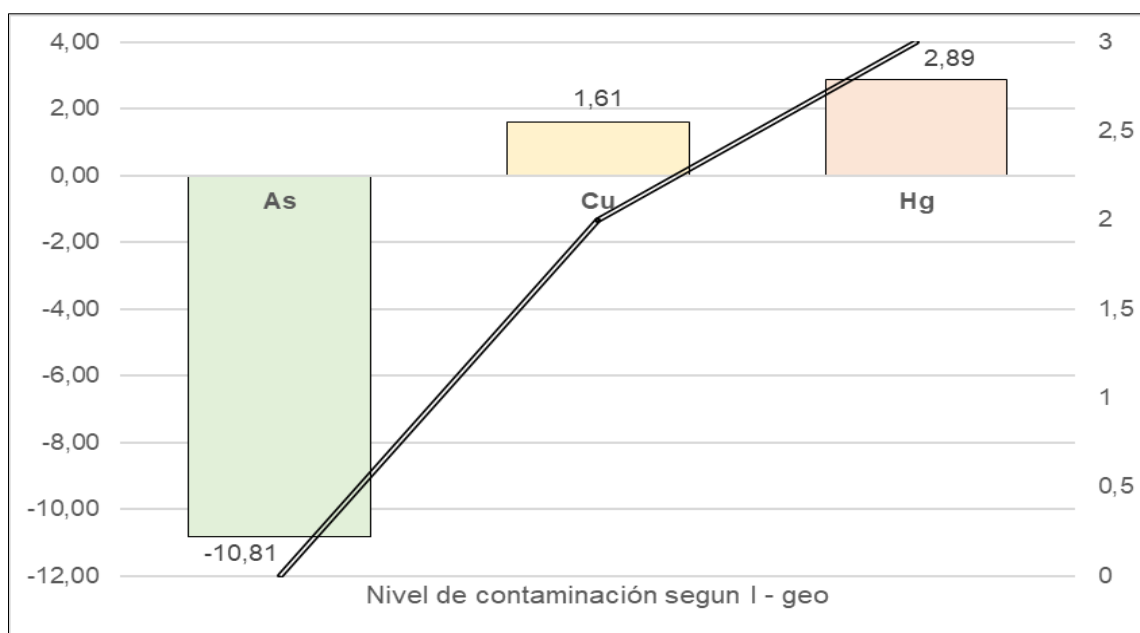


Figura 17. Tendencia de crecimiento del índice de geoacumulación calculado con las concentraciones traza que poseen valores de fondo.

6.2.4. Incidencia ambiental en el factor agua

Una vez entregados los resultados por el laboratorio de análisis químico de la Universidad Técnica Particular de Loja de los elementos y parámetros solicitados se procedió a sistematizar en el orden de la preparación de las muestras de agua en el siguiente contexto:

6.2.4.1. Parámetros y elementos metálicos localizados en la muestra de lavado de relave

En la muestra de lavado de relave por el lapso de 12 horas los parámetros y elementos metálicos detectados en unidades de miligramo/litro (mg/l), fueron analizados bajo condiciones de temperatura de 21,3 grados centígrados (°C) a una humedad de 55 por ciento (%):

Tabla 21. Valores de parámetros físicos y elementos metálicos identificados en el agua de lavado de relave minero.

Parámetro/elemento	Resultado	Unidad
Aluminio	<0,01	mg/l
Arsénico	<0,001	mg/l
Calcio	66,22	mg/l
Cianuros	0,017	mg/l
Cobre	<0,05	mg/l
Hierro	<0,10	mg/l
Magnesio	1,65	mg/l
Manganeso	0,15	mg/l
Mercurio	<0,001	mg/l
Plata	0,074	mg/l
Potasio	10,26	mg/l
PH	6,64	-
Silicio	0,38	mg/l
Sodio	1,84	mg/l
Sólidos totales	348	mg/l
Sólidos suspendidos totales	26	mg/l
Sulfatos	78,72	mg/l
Sulfuros	8,00	µg/l

Miligramos/litro (mg/l); microgramos/litro (µg/l); potencial de hidrógeno (PH)

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de absorción atómica* (pág. 1), laboratorio químico de aguas, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Podemos destacar elementos que se encuentran en cantidades menores al límite de detección establecidos por el laboratorio entre ellos está el aluminio (Al), arsénico (As), cobre (Cu), hierro (Fe) y el mercurio (Hg), mismos que se encuentra representados por el signo (<), de la misma manera los sulfuros detectados son mínimos identificados en 8 microgramos por litro, dándonos un agua ligeramente ácida por su potencial de hidrógeno (ph) equivalente a 6,64.

6.2.4.2. Parámetros y elementos metálicos localizados en la muestra del adoquín sumergido.

Los parámetros y elementos metálicos detectados en unidades de miligramo/litro (mg/l) derivados del agua tomada desde el adoquín sumergido por el lapso de 14 días fueron analizados bajo las mismas condiciones que la muestra anterior, es decir a temperatura de 21,3 grados centígrados (°C) a una humedad de 55 por ciento (%):

Tabla 22. Valores de parámetros físicos y elementos metálicos identificados en el agua tomada del adoquín sumergido.

Parámetro/elemento	Resultado	Unidad
Aluminio	1,29	mg/l
Arsénico	<0,001	mg/l
Calcio	11,02	mg/l
Cianuros	0,005	mg/l
Cobre	<0,05 (0,0024)	mg/l
Hierro	<0,10	mg/l
Magnesio	<0,10	mg/l
Manganeso	<0,11	mg/l
Mercurio	<0,001	mg/l
Plata	0,09	mg/l
Potasio	2,70	mg/l
PH	11,92	-
Silicio	53,90	mg/l
Sodio	4,74	mg/l
Sólidos totales	972	mg/l
Sólidos suspendidos totales	30	mg/l
Sulfatos	47,61	mg/l
Sulfuros	3,00	µg/l

Miligramos/litro (mg/l); microgramos/litro (µg/l); potencial de hidrógeno (PH)

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de absorción atómica* (pág. 3), laboratorio químico de aguas, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Podemos destacar elementos que se encuentran en cantidades menores al límite de detección establecidos por el laboratorio entre ellos está el arsénico (As), cobre (Cu), hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso y el mercurio (Hg), es decir existen mayores elementos químicos presentes en minúsculas proporciones representados por el signo (<), los sulfuros detectados son mínimos en proporciones de 3 microgramos por litro, dándonos un agua alcalina por su potencial de hidrógeno (ph) equivalente a 11,92.

6.2.4.3. Parámetros finales del adoquín con 30% de relave después del método de lixiviación

Una vez de haber obtenido la muestra de agua del adoquín sumergido por los 14 días se pesó la pieza de hormigón y se midió la proporción de agua resultante obteniendo los siguientes valores:

Tabla 23. Medidas registradas de peso del adoquín y agua resultante después de 14 días, en la prueba de lixiviación.

Peso del adoquín antes de ser sumergido (gr)	Cantidad de agua antes de la prueba (ml)	Peso del adoquín después de ser sumergido (gr)	Cantidad de agua después de la prueba (ml)
8500	4850	8600	4750

Gramos (gr); mililitro (ml)

De los datos medidos podemos verificar que el adoquín ganó 100 gramos (gr) de peso a los 14 días de haber estado sumergido en agua desionizada, lo que sería equivalente a 100000 miligramos (mg) en 4,85 litros (l), es decir existente un incremento de masa por absorción del adoquín de 20618,55 miligramos por litro de agua (mg/l) lo que es igual a 20,61gramos en un litro (gr/l).

6.2.4.4. Comparación de parámetros y elementos analizados

Los resultados de los parámetros y elementos químicos obtenidos tanto de la muestra de agua de lavado, así como del agua donde estuvo sumergido el adoquín fueron comparados para verificar su condición de persistencia, y el estado permisible de los valores del agua proveniente de la prueba de lixiviación en función de los límites máximos permisibles para descarga en cuerpos de agua dulce según el Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente.

Tabla 24. Comparación de resultados con los límites máximos permisibles referente a descarga en cuerpos de agua dulce acorde a la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A.

Análisis químico, muestra de lavado de relave por 12 horas			Valoración cualitativa según resultados	Análisis químico, muestra de adoquín con 30% de relave sumergido por 14 días			Acuerdo Ministerial 097 – A límites máximos permisibles (mg/l)	
Aluminio	<0,01	mg/l	Aumenta	Aluminio	1,29	mg/l	5,00	Cumple
Arsénico	<0,001	mg/l	Se mantiene	Arsénico	<0,001	mg/l	0,10	Cumple
Calcio	66,22	mg/l	Disminuye	Calcio	11,02	mg/l	-	-
Cianuros	0,017	mg/l	Disminuye	Cianuros	0,005	mg/l	0,10	Cumple
Cobre	<0,05	mg/l	Relativamente igual	Cobre	<0,05 (0,0024)	mg/l	1,00	Cumple
Hierro	<0,10	mg/l	Se mantiene	Hierro	<0,10	mg/l	10,00	Cumple
Magnesio	1,65	mg/l	Disminuye	Magnesio	<0,10	mg/l	-	-
Manganeso	0,15	mg/l	Disminuye	Manganeso	<0,11	mg/l	2,00	Cumple
Mercurio	<0,001	mg/l	Se mantiene	Mercurio	<0,001	mg/l	0,005	Cumple
Plata	0,074	mg/l	Aumenta	Plata	0,09	mg/l	0,1	Cumple
Potasio	10,26	mg/l	Disminuye	Potasio	2,70	mg/l	-	-
PH	6,64	-	Aumenta	PH	11,92	-	6-9	No cumple
Silicio	0,38	mg/l	Aumenta	Silicio	53,90	mg/l	-	-
Sodio	1,84	mg/l	Aumenta	Sodio	4,74	mg/l	-	-
Sólidos totales	348	mg/l	Aumenta	Sólidos totales	972	mg/l	1600	Cumple

Análisis químico, muestra de lavado de relave por 12 horas			Valoración cualitativa según resultados	Análisis químico, muestra de adoquín con 30% de relave sumergido por 14 días			Acuerdo Ministerial 097 – A límites máximos permisibles (mg/l)	
Sólidos suspendidos totales	26	mg/l	Aumenta	Sólidos suspendidos totales	30	mg/l	130	Cumple
Sulfatos	78,72	mg/l	Disminuye	Sulfatos	47,61	mg/l	1000	Cumple
Sulfuros	8,00	µg/l	Disminuye	Sulfuros	3,00	µg/l	0,5	Cumple

Miligramos/litro (mg/l); microgramos/litro (µg/l), el valor del potencial de hidrógeno (PH) es adimensional

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de absorción atómica* (pág. 1 -3), muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín, laboratorio químico de aguas, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Al comparar los resultados del lavado de relave con la muestra del adoquín sumergido podemos evidenciar que la mayoría de elementos químicos disminuye su concentración tal es el caso de aquellos que tiene un rango más sesgado de control ambiental como el cianuro (CN⁻), manganeso (Mn), los sulfatos (SO₄⁻²) y sulfuros (S⁻²), mientras que el arsénico (As), cobre (Cu), hierro (Fe), y mercurio (Hg) se mantienen iguales en proporciones muy bajas, de la misma manera aunque la entidad de control no posee valores de fondo el calcio (Ca), magnesio (Mg), y potasio (K), ha disminuido en su concentración, por otra parte el aluminio (Al), el silicio (Si), y el sodio (Na) se ven aumentados cuya variación se debe a la composición química propia del cemento y la del relave que estarían aportando en concentración, para una mayor comprensión comparativa a continuación ilustramos la siguiente figura:

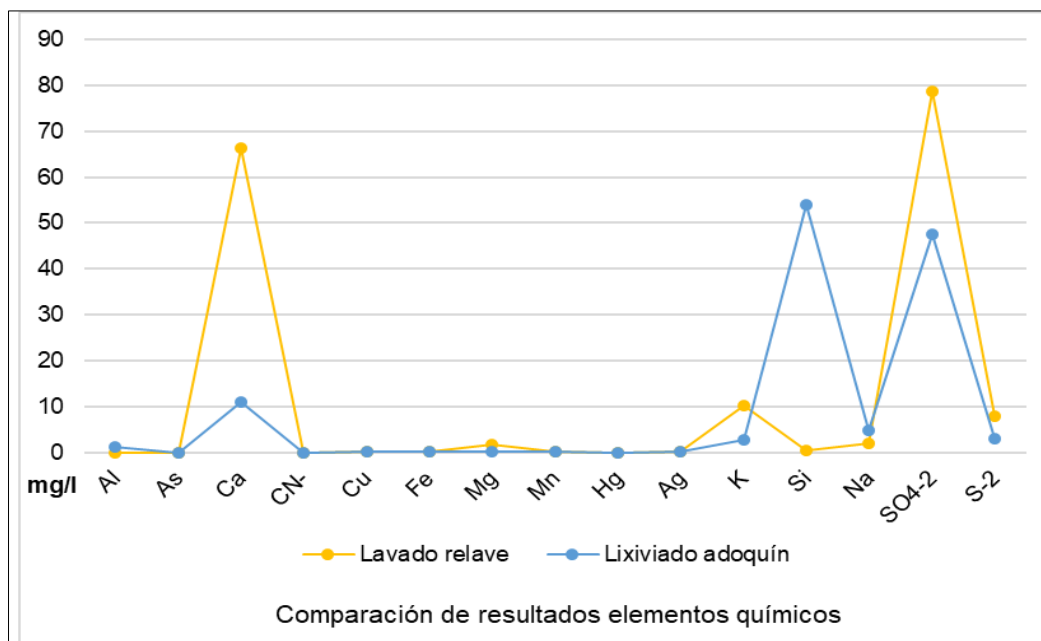


Figura 18. Comparación de concentraciones identificadas en análisis químico de muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín.

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de absorción atómica* (pág.1-3), muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín, laboratorio químico de aguas, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

El potencial de hidrógeno (PH) ha aumentado significativamente volviéndola al agua de ligeramente ácida a alcalina, por otra parte, los sólidos totales y sólidos suspendidos totales ha aumentado en su proporción esto se debe a que en primer lugar la muestra de lavado fue filtrada al vacío, mientras que el adoquín al secarse llega a liberar mayor cantidad de material particulado de todos sus agregados, sin embargo se encuentran dentro de sus límites permisibles, la relación se encuentran estructurada en la siguiente figura:

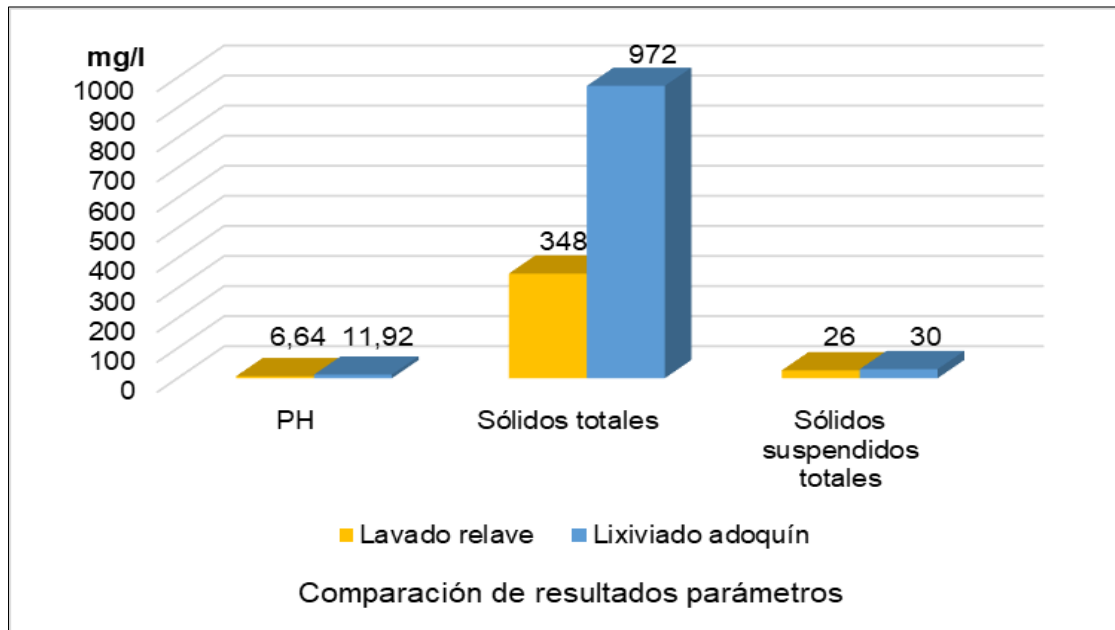


Figura 19. Comparación de parámetros identificados en análisis químico de muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín.

Nota. Adaptado de *resultados de espectroscopía de absorción atómica* (pág.1-3), muestra de lavado de relave y lixiviado de adoquín, laboratorio químico de aguas, Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Al relacionar los resultados de los elementos químicos de la muestra de agua de lixiviado del adoquín con los límites máximos permisibles para descarga en cuerpos de agua dulce según el Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente, la mayoría de las concentraciones se encuentran por debajo de estos valores de fondo, a excepción del potencial de hidrógeno (PH), en cuya variación está incidiendo el cemento por sus contenido de calcio que puede estar neutralizando la acidificación de los sulfuros presentes en el relave, a continuación ponemos a consideración la tendencia de inferioridad de las concentraciones de aquellos elementos químicos de acuerdo a sus límites máximos permisibles de la normativa ambiental aplicada:

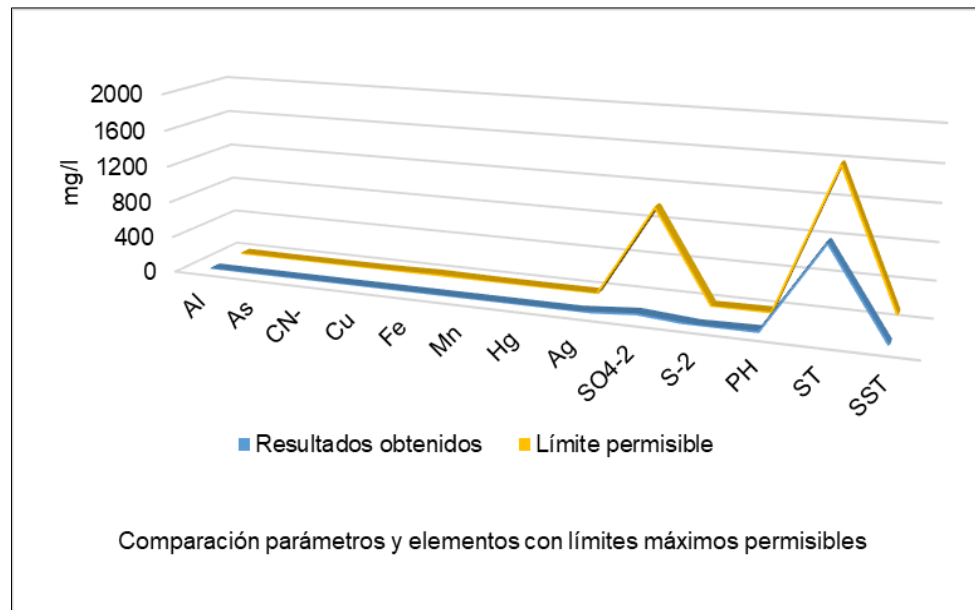


Figura 20. Comparación de concentraciones de elementos químicos con los límites máximos permisibles de la tabla 9 del AM- 097A.

Nota. Adaptado de *Acuerdo Ministerial 097 A*, (pág. 24), Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015.

6.3. Comparar los resultados de la resistencia a la compresión de los adoquines piloto con las normas estándares de calidad aplicadas en el país.

Para obtener una comparación notable y representativa la cual nos ha permitido comprender el efecto de la sustitución de la arena por el relave minero en el mecanismo de la resistencia a la compresión se calculó la resistencia característica de 8 adoquines con y sin relave a los 28 días de fraguado, esta resistencia característica significa que el 95% de las piezas fabricadas con esas dosificaciones (adoquín normal y adoquín con 30% de relave) obtendrán esa resistencia mínima calculada y que el 5% tendrá resistencias más bajas.

Cabe mencionar que los resultados de las resistencias obtenidas del laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja están expresadas en Newton/milímetro cuadrado (N/mm^2) equivalente a 1 Megapascal (Mpa).

Previo al cálculo de las resistencias características, se consideró el factor de corrección, tomado de la Tabla 2 de la norma INEN 1488 (ver tabla 8), en este caso el factor fue 1,11 ya que el adoquín sin relave posee un espesor promedio de 76 milímetros (mm), mientras que el adoquín con relave obtuvo un espesor promedio de 78,4 milímetros (mm), cercano a 80 milímetros (mm) según la norma, y es de carácter biselado, por lo tanto, la resistencia neta se multiplica por este factor obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 25. Corrección de las resistencias a la compresión netas obtenidas de adoquines sin relave y con un 30% de relave minero en su composición.

Nº	Resistencia neta sin relave (Mpa)	Factor de corrección	Resistencia final sin relave (Mpa)	Nº	Resistencia neta con relave al 30% (Mpa)	Factor de corrección	Resistencia final con relave al 30% (Mpa)
AD-01	36,57	1,11	40,59	ADR-01	29,14	1,11	32,35
AD-02	29,76	1,11	33,03	ADR-02	29,18	1,11	32,39
AD-03	32,05	1,11	35,58	ADR-03	28,52	1,11	31,66
AD-04	35,47	1,11	39,37	ADR-04	28,69	1,11	31,85
AD-05	28,38	1,11	31,50	ADR-05	29,13	1,11	32,33
AD-06	36,06	1,11	40,03	ADR-06	29,62	1,11	32,88
AD-07	36,68	1,11	40,71	ADR-07	29,23	1,11	32,45
AD-08	32,19	1,11	35,73	ADR-08	32,29	1,11	35,84

Megapascales (Mpa); adoquines (AD); adoquines con relave (ADR)

Nota. Adaptado de resultados ensayo a la compresión adoquines con y sin relave, *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, (pág. 1), Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

6.3.1. Resistencia característica de adoquines sin relave

Hemos calculado en primera instancia la resistencia característica de los 8 adoquines sin relave para ello se utilizó la segunda fórmula propuesta por la norma INEN 1485:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f_i)^2 - \frac{(\sum f_i)^2}{10}}{9}}$$

Donde:

- (S) = desviación estándar en Mpa,
- (fi) = la resistencia a la compresión de cada una de las muestras en Mpa,
- (fm) = media aritmética (promedio) de la resistencia a la compresión de todas las muestras en Mpa,
- (fk) = resistencia característica.

La resistencia característica se obtiene de la siguiente manera:

$$fk = (fm - 1,64S)$$

Tomando en cuenta que el ensayo a la compresión fue realizado a 8 adoquines se modificó la fórmula de la desviación estándar en el número de adoquines quedando de la siguiente manera:

$$S = \frac{\sqrt{\Sigma(fi)^2 - \frac{(\Sigma fi)^2}{8}}}{7}$$

Donde:

- 8= corresponde al número de adoquines ensayados,
- 7= es la relación de los 8 adoquines menos 1 tal como lo demuestra la fórmula original.

6.3.1.1. Cálculo del promedio (fm), la suma de cada una de sus resistencias (fi) y sus cuadrados (fi)²

Para (fm) se suman todas resistencias y se dividen para el número total de estas, mientras que para (fi) se suman todas las resistencias a la compresión, (fi)² corresponde a la suma de los cuadrados de cada resistencia, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 26. Cálculo del promedio, sumatoria de cada resistencia a la compresión y de sus cuadrados.

Nº	Fm (Mpa)	fi (Mpa)	(fi) ² (Mpa)
AD-01	40,59	40,59	1647,77
AD-02	33,03	33,03	1091,22
AD-03	35,58	35,58	1265,62
AD-04	39,37	39,37	1550,13
AD-05	31,50	31,50	992,36
AD-06	40,03	40,03	1602,13
AD-07	40,71	40,71	1657,69
AD-08	35,73	35,73	1276,70
Promedio	37,07	Σfi 296,55	$\Sigma(fi)^2$ 11083,62

Promedio de las resistencias (fm); sumatoria de la resistencia a la compresión de cada una de las muestras $\Sigma(fi)$; sumatoria de las resistencias al cuadrado $\Sigma(fi)^2$; Megapascales (Mpa).

6.3.1.2. Cálculo de la desviación estándar (S)

Entonces la desviación estándar es igual a:

$$S = \frac{\sqrt{\Sigma(fi)^2 - \frac{(\Sigma fi)^2}{8}}}{7}$$

$$S = \frac{\sqrt{11083,62Mpa^2 - \frac{(296,55Mpa)^2}{8}}}{7}$$

$$S = \frac{\sqrt{91,06Mpa^2}}{7}$$

$$S = \sqrt{13,01Mpa}$$

$$S = 3,61Mpa$$

6.3.1.3. Cálculo de la resistencia característica (fk)

Una vez obtenida la desviación estándar se procedió a calcular la resistencia característica para ello hemos aplicado la siguiente ecuación tomando en cuenta ya los parámetros calculados anteriormente:

$$fk = (fm - 1,64S)$$

$$fk = (37,07Mpa - 1,64 * 3,61Mpa)$$

$$fk = (37,07Mpa - 5,92Mpa)$$

$$fk = 31,15 Mpa$$

Cada uno de los parámetros fueron procesados en una hoja de cálculo para mejor precisión tanto para promedio de las resistencias (fm), la suma de cada una de sus resistencias (fi), sus cuadrados (fi)², desviación estándar (S) y resistencia característica (fk).

Los resultados de los 8 adoquines sin relave sometidos al ensayo a la compresión representan los siguientes valores donde podemos además apreciar la carga máxima aplicada y su área efectiva superior donde se ejecutó el esfuerzo:

Tabla 27. Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón sin relave minero.

Nº	Código	Edad (días)	Área cara superior adoquín (cm ²)	Espesor (cm)	Factor de corrección	Carga (KN)	Resistencia neta (Mpa)	Resistencia final (Mpa)
1	AD-01	28	473,99	7,70	1,11	1723,79	36,57	40,59
2	AD-02		482,53	7,60	1,11	1436,30	29,76	33,03
3	AD-03		478,62	7,70	1,11	1534,24	32,05	35,58
4	AD-04		486,11	7,60	1,11	1724,30	35,47	39,37
5	AD-05		487,84	7,60	1,11	1384,79	28,38	31,50
6	AD-06		488,48	7,60	1,11	1761,80	36,06	40,03
7	AD-07		471,45	7,70	1,11	1729,28	36,68	40,71
8	AD-08		471,06	7,60	1,11	1516,35	32,19	35,73

Centímetro cuadrado (cm²); centímetro (cm); kilonewton (Kn); megapascales (Mpa).

Nota. Adaptado de resultados ensayo a la compresión adoquines sin relave, *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, (pág. 1), Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Los resultados finales calculados acorde a la norma INEN 1485 para obtener la resistencia característica de los adoquines sin relave fueron:

Tabla 28. Resultados finales del cálculo de la resistencia característica de adoquines sin relave minero.

Promedio de las resistencias (fm)	Sumatoria de las resistencias $\Sigma (fi)$	Sumatoria de las resistencias al cuadrado $\Sigma (fi)^2$	Desviación estándar (S)	Resistencia característica (fk)
37,07 Mpa Megapascales (Mpa)	296,55 Mpa	11083,62 Mpa ²	3,61 Mpa	31,15 Mpa

6.3.2. Resistencia característica de adoquines con 30% de relave minero

Al igual que en los adoquines sin relave se multiplicó las resistencias a la compresión rectificadas por el factor de corrección, obtenidas de los 8 adoquines fraguados (secados) a los 28 días, y se procedió a calcular los mismos parámetros:

6.3.2.1. Cálculo del promedio (fm), la suma de cada una de sus resistencias (fi) y sus cuadrados (fi)²

De la misma forma para (fm) se suman todas resistencias y se dividen para el número total de estas, mientras que para (fi) se suman todas las resistencias a la compresión, (fi)² corresponde a la suma de los cuadrados de cada resistencia, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 29. Cálculo del promedio, sumatoria de cada resistencia a la compresión y de sus cuadrados.

Nº	Fm (Mpa)	fi (Mpa)	(fi) ² (Mpa)
ADR-01	32,35	32,35	1046,22
ADR-02	32,39	32,39	1049,10
ADR-03	31,66	31,66	1002,18
ADR-04	31,85	31,85	1014,16
ADR-05	32,33	32,33	1045,51
ADR-06	32,88	32,88	1080,98
ADR-07	32,45	32,45	1052,70
ADR-08	35,84	35,84	1284,64
Promedio	32,72	Σfi 261,74	$\Sigma(fi)^2$ 8575,49

Promedio de las resistencias (fm); sumatoria de la resistencia a la compresión de cada una de las muestras $\Sigma(fi)$; sumatoria de las resistencias al cuadrado $\Sigma(fi)^2$; Megapascales (Mpa).

6.3.2.2. Cálculo de la desviación estándar (S)

La desviación estándar es igual a:

$$S = \frac{\sqrt{\Sigma(fi)^2 - \frac{(\Sigma fi)^2}{8}}}{7}$$

$$S = \frac{\sqrt{8575,49Mpa^2 - \frac{(261,74Mpa)^2}{8}}}{7}$$

$$S = \frac{\sqrt{12,13Mpa^2}}{7}$$

$$S = \sqrt{1,73Mpa}$$

$$S = 1,32Mpa$$

6.3.2.3. Cálculo de la resistencia característica

Una vez obtenida la desviación estándar se procedió a calcular la resistencia característica para ello hemos aplicado la siguiente ecuación tomando en cuenta ya los parámetros calculados anteriormente:

$$fk = (fm - 1,64S)$$

$$fk = (32,72Mpa - 1,64 * 1,32Mpa)$$

$$fk = (32,72Mpa - 2,16Mpa)$$

$$fk = 30,56 Mpa$$

Cada uno de los parámetros fueron procesados en una hoja de cálculo para mejor precisión tanto para promedio de las resistencias (f_m), la suma de cada una de sus resistencias (f_i), sus cuadrados (f_i)², desviación estándar (S) y resistencia característica (f_k).

Los resultados de los 8 adoquines con un 30% de relave en su composición sometido al ensayo a la compresión representan los siguientes valores donde podemos además apreciar la carga máxima aplicada y su área efectiva superior donde se ejecutó el esfuerzo.

Tabla 30. Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón con 30% de relave minero.

Nº	Código	Edad (días)	Área cara superior adocuin (cm ²)	Espesor (cm)	Factor de corrección	Carga (KN)	Resistencia neta (Mpa)	Resistencia final (Mpa)
1	ADR-01	28	480,54	7,80	1,11	1394,21	29,14	32,35
2	ADR-02		473,37	7,90	1,11	1381,56	29,18	32,39
3	ADR-03		479,84	7,90	1,11	1368,69	28,52	31,66
4	ADR-04		479,66	7,60	1,11	1376,21	28,69	31,85
5	ADR-05		480,95	7,90	1,11	1401,39	29,13	32,33
6	ADR-06		477,07	7,90	1,11	1413,48	29,62	32,88
7	ADR-07		474,44	7,90	1,11	1387,07	29,23	32,45
8	ADR-08		481,36	7,80	1,11	1554,68	32,29	35,84

Centímetro cuadrado (cm²); centímetro (cm); kilonewton (Kn); megapascales (Mpa).

Nota. Adaptado de resultados ensayo a la compresión adoquines con relave, *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, (pág. 1), Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Los resultados finales calculados acorde a la norma INEN 1485 para obtener la resistencia característica de los adoquines con 30% de relave fueron:

Tabla 31. Resultados finales del cálculo de la resistencia característica de adoquines con 30% de relave minero.

Promedio de las resistencias (fm)	Sumatoria de las resistencias $\Sigma (fi)$	Sumatoria de las resistencias al cuadrado $\Sigma (fi)^2$	Desviación estándar (S)	Resistencia característica (fk)
32,72 Mpa Megapascales (Mpa)	261,74 Mpa	8575,49 Mpa ²	1,32 Mpa	30,56 Mpa

Considerando las resistencias características de los 2 análisis realizados podemos observar que en el adoquín sin relave obtuvo 31,15 megapascales (Mpa), mientras que el adoquín con un 30% de relave minero el valor fue de 30,56 megapascales (Mpa) tal como se muestra en la figura 21, tomando en cuenta una reducción de la resistencia característica de 0,59 megapascales (Mpa) que constituye un 1,89 por ciento (%).

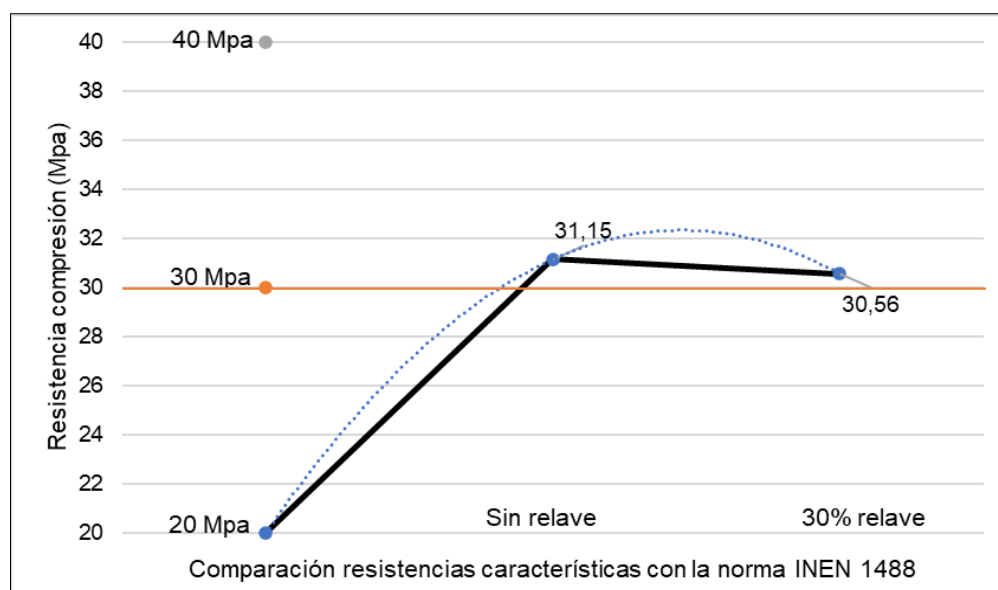


Figura 21. Comparación de la resistencia característica de los adoquines ensayados, con la norma INEN 1488.

La norma INEN 1488 establece una categoría de uso del adoquín en relación a la resistencia característica alcanzada mediante los ensayos, tomando en cuenta además el número de vehículos que pueden transitar por día en este caso mayores a 3 toneladas (Tn) brutas, bajo estos criterios los adoquines fabricados con 30% de relave cumplen con la norma antes mencionada en lo referente a uso peatonal así como para estacionamiento y calles residenciales al igual que los adoquines sin relave ya que sobrepasan los 30 megapascales (Mpa) que establece la normativa, pese a que la incorporación del relave provocó la

disminución de la resistencia característica según la correlación realizada, finalmente hemos obtenido los siguientes resultados comparativos:

Tabla 32. Resultados comparativos de las resistencias características obtenidas con los ensayos a la compresión y las resistencias características establecidas por la norma INEN 1488.

Resistencia característica (fk) (Mpa) (INEN 1488)			Resistencia característica obtenida (fk) (Mpa)	
Tipo de uso	(fk) (Mpa)	No. de vehículos por día mayores de 3 (Tn) brutas	Adoquines sin relve	Adoquines con 30% relave
			31,15	30,56
Peatonal	20	0	Cumple	Cumple
Estacionamiento y calles residenciales	30	0 - 150	Cumple	Cumple
Caminos secundarios y calles principales	40	150 - 1500	No cumple	No cumple

Resistencia característica (fk); megapascales (Mpa); toneladas (Tn); porcentaje (%)

Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 3), NTE INEN 1 488, 1986.

6.3.3. Relación de pesos alcanzados

Al pesar cada una de los adoquines con y sin relave se obtuvo una diferencia de sus pesos promedio de 456 gramos (gr), es decir el adoquín fabricado con un 30% de relave aumentó de peso en un 6,15 por ciento (%), sin embargo, esta característica no tuvo mayor incidencia en la geometría del adoquín con relave al 30%, los resultados de los pesos individuales y su cálculo promedio lo podemos evidenciar en la siguiente tabla:

Tabla 33. Pesos medidos en cada una de las piezas de adoquines con y sin relave para su análisis de promedio comparativo.

Adoquín sin relave		Adoquín con 30% relave	
Nº	Peso (gr)	Nº	Peso (gr)
AD-01	7647,2	ADR-01	7821,5
AD-02	7149,0	ADR-02	7810,0
AD-03	7328,8	ADR-03	7719,8
AD-04	7426,0	ADR-04	7948,1
AD-05	7431,2	ADR-05	7963,6
AD-06	7418,9	ADR-06	7881,0
AD-07	7525,2	ADR-07	7925,3
AD-08	7313,6	ADR-08	7818,9
Promedio	7405,0		7861,0
Gramos (gr)			

El peso promedio de los adoquines sin relaves alcanzó alrededor de 7405 gramos (gr), mientras que el peso promedio de los adoquines con un 30% de relave en su composición llegó a alcanzar los 7861 gramos (gr):

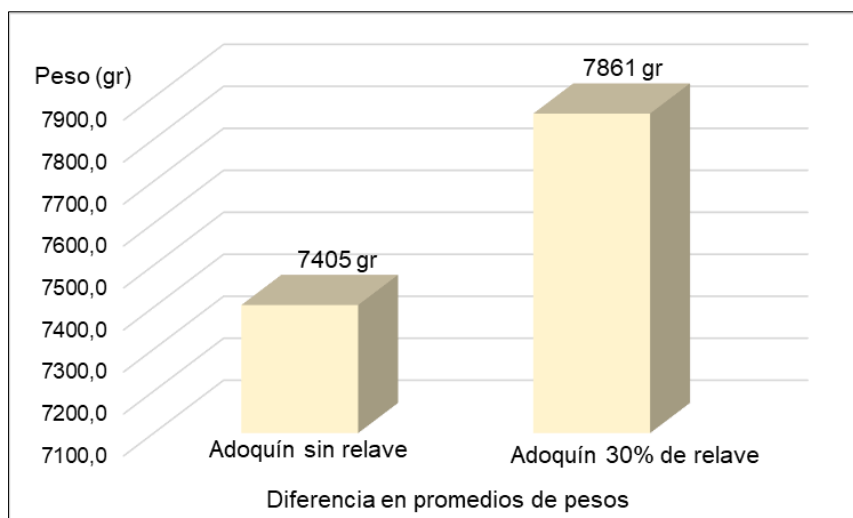


Figura 22. Diferencia de pesos promedios de adoquines con y sin relave.

6.3.4. Dimensión nominal del adoquín con 30% de relave

Los adoquines con presencia del 30% de relave fueron medidos en dos de sus lados opuestos para verificar su dimensión nominal como parte de otro criterio de calidad del producto, tomando en cuenta lo establecido en la norma técnica INEN 3040 (ver tabla 7):

Tabla 34. Mediciones de sus dimensiones a los adoquines con un 30% de relave minero.

Nº	LADO SUPERIOR			LADO INFERIOR		
	L (mm)	A (mm)	E (mm)	L (mm)	A (mm)	E (mm)
ADR-01	242,5	223,0	78,0	243,0	223,5	77,0
ADR-02	243,0	223,5	79,0	245,0	224,0	79,0
ADR-03	243,0	223,5	79,0	245,0	224,0	78,0
ADR-04	243,0	222,0	76,0	243,0	225,0	76,5
ADR-05	242,5	223,0	79,0	244,0	225,0	78,5
ADR-06	242,5	224,0	79,0	243,5	226,0	79,0
ADR-07	242,0	223,0	79,0	243,5	224,0	80,0
ADR-08	242,5	223,5	78,0	243,5	224,0	79,0

Longitud (L); ancho (A); espesor (E); milímetro (mm)

Acorde a la norma INEN 3040 el espesor que posee el adoquín para este caso es <100 milímetros (mm) por lo tanto la discrepancia entre 2 de sus dimensiones deberá ser en su longitud ± 2 milímetros (mm), ancho ± 2 milímetros (mm) y su espesor ± 3 milímetros (mm), tal como se muestra a continuación:

Tabla 35. Diferencia entre dos de sus dimensiones opuestas.

Nº	Diferencia L (mm)	Tolerancia (mm)	Diferencia A (mm)	Tolerancia (mm)	Diferencia E (mm)	Tolerancia (mm)
ADR-01	0,5		0,5		1,0	
ADR-02	2,0		0,5		0,0	
ADR-03	2,0		0,5		1,0	
ADR-04	0,0	± 2	3,0	± 2	0,5	± 3
ADR-05	1,5		2,0		0,5	
ADR-06	1,0		2,0		0,0	
ADR-07	1,5		1,0		1,0	
ADR-08	1,0		0,5		1,0	

Longitud (L); ancho (A); espesor (E); milímetro (mm)

 Nota. Adaptado de *Norma Técnica Ecuatoriana*, (pág. 5), NTE INEN 3040, 2016.

El espesor que posee el adoquín referente a las 8 muestras con un 30% de relave sobrepasa los 70 milímetros (mm) por lo tanto cumple además con lo establecido en la norma ASTM C936/C936M - 16, 2016 la cual propone que las unidades para pavimentación con hormigón deben tener espesores mínimos de 60 milímetros (mm), pese a que el proceso aplicado para la fabricación de estas piezas de hormigón es artesanal, finalmente se obtuvo los siguientes parámetros técnicos:

Tabla 36. Características técnicas obtenidas del estudio físico - mecánico del adoquín fabricado con 30% de relave minero.

Características del producto artesanal	
Tipología	Adoquín tipo cruz
Uso	-Peatonal -Estacionamiento y calles residenciales
Dimensiones promedio (cm)	Tolerancia (mm)
Largo: 24,32	± 2
Ancho: 22,38	± 2
Espesor: 7,84	± 3
Resistencia característica a la compresión	30,56 Mpa
Normas de aplicación	-INEN 1488 -INEN 1 485 -INEN 3040 -ASTM C936/C936M - 16



Centímetros (cm); milímetros (mm); megapascales (Mpa)

6.3.5. Granulometría del relave

Mediante el método del hidrómetro se pudo obtener la granulometría del relave considerando las densidades características de las partículas que lo constituyen y su velocidad de sedimentación, los datos obtenidos que nos proporcionó el laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja fueron los siguientes:

Tabla 37. Clasificación granulométrica del relave por el método del hidrómetro.

Características granulométricas de la muestra de relave							
Material	Pasante de 0,075 mm (N°200)		Peso seco		50		
Gs (g/cm ³)	2,819		(% Pasante tamiz N°200)				
Tiempo (min)	Lectura R´H	Temperatura (°C)	RHC	R´H+CM	L/t (cm/min)	Diámetro (mm)	% más fino
1	11	17,3	2,59	10	3,900	0,05187	20,60
2	8	17,3	-0,41	7	2,300	0,03059	14,42
4	6,5	17,2	-1,91	5,5	1,175	0,01563	11,33
8	5,3	17,2	-3,11	4,3	0,613	0,00815	8,86
15	4,8	17,1	-3,61	3,8	0,329	0,00438	7,83
30	4,1	17,6	-4,31	3,1	0,169	0,00225	6,39
60	3,3	17,5	-5,11	2,3	0,087	0,00115	4,74
120	2,8	17,2	-5,61	1,8	0,044	0,00058	3,71
240	2,5	17	-5,91	1,5	0,022	0,00029	3,09
480	2,1	16,8	-6,31	1,1	0,011	0,00015	2,27
1440	2	16,6	-6,41	1	0,004	0,00005	2,06

Gramos (gr); gravedad específica (Gs); gramos/centímetros cúbicos (g/cm³); porcentaje (%); minutos (min); lectura corregida distancia desde el cuello a la punta del bulbo (R´H); lectura corregida por temperatura (RHC) grados centígrados (°C); corrección por menisco (CM); profundidad efectiva (L); milímetro (mm)

Nota. Adaptado de *resultados ensayo de granulometría por hidrometría*, laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos, (pág. 2), Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

Los resultados de densidades del relave minero que pasó el tamiz 200 distingue un mayor porcentaje que corresponde al 20% del material pasante con un diámetro de 0,05 milímetros (mm), llegando a alcanzar diámetros de partícula hasta los 0,00005 mm es decir extremadamente finos con un 2,06%, si consideramos el diámetro de partícula de 0,05 milímetros (mm) como la mayor proporción pasante el relave obtiene una textura limosa cuyo diámetro de partícula va decreciendo llegando a adoptar en su mayor totalidad porcentual pasante una textura arcillosa tal como podemos observar en la figura 23:

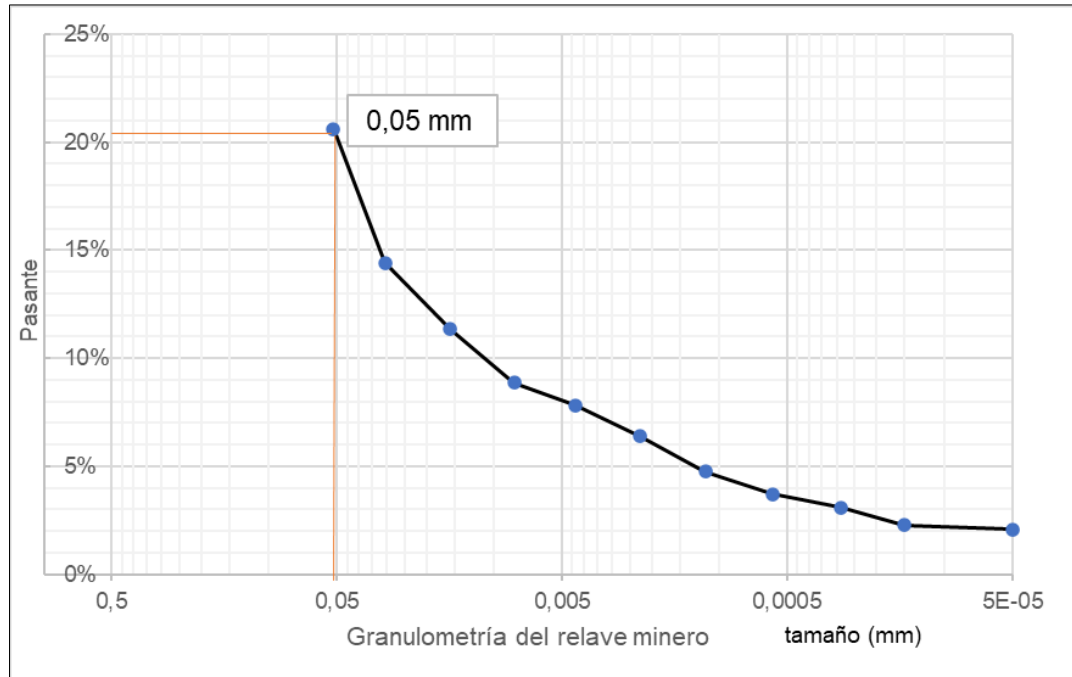


Figura 23. Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro aplicado a 50gr de relave minero.

Nota. Adaptado de resultados de granulometría por hidrometría, *laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos*, (pág. 2), Universidad Técnica Particular de Loja, 2023.

7. Discusión

Para establecer los argumentos críticos de los resultados obtenidos hemos relacionado los mismos con la base teórica técnica – científica utilizada desde un inicio, acoplando ciertas normas y procedimientos al objeto de investigación para orientar de mejor manera la metodología y los resultados, tomando en cuenta que los procedimientos no están destinados específicamente para evaluar la viabilidad de los relaves con fines de aprovechamiento en la fabricación de adoquines como es el caso del índice de geoacumulación, estimación de puntos de muestreo según el acuerdo ministerial 097- A, las normas INEN referente a muestreo y características de adoquines de hormigón, AASHTO para granulometría de materiales finos, método de lixiviación 1315 para muestras monolíticas, y límites máximos permisibles para descarga a cuerpos de agua dulce según el acuerdo ministerial 097- A, sin embargo han sido pieza fundamental para centrar los resultados bajo un criterio normado de calidad, práctico, argumentativo, regulado y confiable, motivo por el cual investigaciones donde se han aplicado las técnicas y procedimientos antes descritas a aguas y suelos contaminados no pueden ser comparados con el estudio de relaves ya que son comportamientos distintos, por otra parte no se ha generado o facilitado investigaciones similares respecto a los relaves de la planta de beneficio Alto Vizcaya para realizar una cotejo ideal de resultados evaluados, por lo tanto es irrelevante discutir los resultados de investigaciones similares aplicadas en otros sitios ya que el proceso de muestreo, la mineralogía del relave, la granulometría, dosificaciones empleadas en la elaboración de adoquines, la calidad de los agregados utilizados, entre otras apreciaciones son distintos por lo tanto el estudio de un relave para estos fines es particular en cada sitio de interés. Dicho así en este apartado ponemos a consideración de manera concisa el argumento analítico de los resultados obtenidos en orden jerárquico por cada objetivo específico planteado.

La selección del sitio de muestreo es primordial antes de aplicar cualquier método sistemático por cuanto podemos disminuir el área de estudio en este caso a 169,20m² y focalizar las labores complementarias de excavación, recolección, pesado de muestra, y almacenamiento, para alcanzar el propósito deseado, de ello se obtiene una muestra patrón de relave de 18kg, cantidad útil para los análisis y ensayos de laboratorio tanto mineralógicos y químicos cuyos resultados son los deseados respecto de sus condiciones geoquímicas, aclarando que los mismos representan solo al material depositado en la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya.

El diseño de un muestreo sistemático de malla regular demuestra ser un método bastante práctico e idóneo que sobrepasa las consideraciones emitidas en las normas de calidad y regulatorias para suelos contaminados consideradas en el país orientadas principalmente para estudios de ingeniería y controles ambientales, ya que las mismas no están diseñadas para muestrear relaves mineros, sin embargo son de gran ayuda para obtener un valor de partida como es el caso de la calidad y cantidad de muestras (norma INEN 695, INEN 686), instrumentos a usarse (norma INEN 686), áreas de muestreo y número mínimo de muestras (acuerdo ministerial 097 - A); por otra parte con la sobreestimación de los parámetros se ha asegurado que la mayoría de los elementos químicos y minerales planteados desde un inicio sean detectados en sus diferentes proporciones con ello se corrobora que el procedimiento y la forma selectiva de la toma de muestra es eficiente, además las piscinas de relave son fuentes potencialmente contaminantes por cuanto el número y tamaño de muestra son reconsiderados en este escenario.

Para el número de muestras acorde al área óptima muestreada de 169,20m² considerando la ecuación para suelos contaminados menores a 0,1Ha (acuerdo ministerial 097 A) se tiene 3,38 (equivalente a 4) puntos de muestreo, sin embargo, tomando en cuenta la malla diseñada se aplica 9 muestreos con ello se disminuye el sesgo de incertidumbre mineralógica y se obtiene mayor representación de toda la población del relave almacenado.

La cantidad de masa final recolectada de relave corresponde a 54kg resultado de los 18kg obtenidos para los diferentes análisis de laboratorio y 36kg recolectados para la elaboración de los adoquines, cuyas cantidades sobrepasa los 8kg de muestra mínima que indica la norma INEN 695 especialmente para áridos finos, esta diferencia abismal se deriva de la necesidad que demanda todo el proceso metodológico aplicado.

La profundidad alcanzada de muestreo constituye la facilidad de excavación, por ello existen variaciones desde los 70cm (MR2, MR3) hasta el 1m (MR8, MR9) con el propósito de recoger la muestra menos alterada posible para los análisis y ensayos minuciosos de geoquímica, químicos y de granulometría que representan todo el conjunto de relaves depositados en la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya, situación que se puede obviar en la profundidad de 60cm estimada para la recolección del relave utilizado en los adoquines ya que su aplicación en este caso se somete a un proceso industrializado de carácter empírico, sin embargo por sistematización, consecución del protocolo de muestreo, escala menor del proceso de elaboración de adoquines y al haber aprovechado la excavación por cada punto de muestreo se manejó el prospecto planteado que resultó a la final eficiente.

Las homogenizaciones realizadas a las muestras tomadas en los 9 puntos aseguran por un lado que las características mineralógicas, químicas y granulométricas se redistribuya en su totalidad para obtener la muestra final representativa escogida previo análisis, mientras que la homogenización de las muestras para el relave incorporado dentro del 30% en la construcción de los adoquines bridan la incorporación de proporciones con características igualmente propias pero de diferente origen y que sean parte de cada pieza de hormigón fabricada.

El muestreo sistemático por malla regular logra identificar la mayoría de elementos químicos propuestos desde un inicio entre ellos: Arsénico (As), Mercurio (Hg), Azufre (S), Magnesio (Mg), Cobre (Cu), Plata (Ag), Aluminio (Al), Silicio (Si), Potasio (K), Calcio (Ca), Hierro (Fe) a excepción del Plomo (Pb) mismo que no fue identificado por las técnicas aplicadas de geoquímica, se debe además esclarecer que la planta de beneficio Alto Vizcaya no proporciona para el caso información de su mineralización procesada ni de sus procesos metalúrgicos con el detalle deseado cuya situación hubiese perfeccionado de mejor manera la selectividad de los minerales a considerarlos y a analizarlos.

Dentro de los análisis mineralógicos la muestra de relave en laboratorio pasa por un tratamiento de trituración y análisis selectivo minucioso donde se obtienen muestras de 3gr para la técnica de fluorescencia de rayos x, 0,25gr espectroscopía de emisión óptica y 3gr para difracción de rayos x, suficientes para la identificación cuali – cuantitativa.

De los elementos químicos mayoritarios detectados por fluorescencia la composición química que prevalece es la del cuarzo con un 69,6%, situación que se replica en la difracción en una semicuatificación de 88,6%, además destacamos el óxido de aluminio que se refleja en un 12,1%, como un valor relevante pero inferior al del cuarzo, de ahí los contenidos decrecen significativamente sin superar el 3%, entre ellos está el azufre, óxido de hierro, óxido de calcio y óxido de potasio, cabe mencionar que en la técnica de fluorescencia los elementos químicos son detectados como óxidos que en su mayoría están inmersos como iones en las composiciones químicas de las semicuatificaciones del cuarzo, pirita, clorita, titanomagnetita y biotita detectados por difracción de rayos x cuya situación permite corroborar la calidad de ambas técnicas.

Los elementos traza detectados por espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES) tales como el magnesio, cobre, mercurio, plata, arsénico, son los que en su mayoría tienen gran incidencia en la contaminación del componente agua dentro de los parámetros de

calidad como lo establece la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A del (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015) referente a límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, dentro de ellos podemos destacar el mercurio con una concentración de 110,9ppm, hasta el arsénico con concentrados <0.01 ppm, cuyas concentraciones son detectadas como iones libre al analizar las aguas que se derivan de la prueba de lavado de relave y la de lixiviación desde el adoquín en proporciones muy pequeñas que llegan hacer incluso $<0,001$ mg/l.

La evaluación mineralógica cuali – cuantitativa por el índice de geoacumulación propuesto por Muller, 1969 se deriva del cálculo aplicado al arsénico, cobre y mercurio siendo los únicos que poseen valor de fondo geoquímico acorde a la tabla 2 del acuerdo ministerial 097 - A referente a criterios de remediación, según el uso de suelo (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015) de los cuales solo el arsénico con el valor de 0,01 mg/kg se encuentra dentro del límite permisible; dicho así se tiene un rango cerrado de niveles de contaminación que va desde un relave no contaminado representado por el arsénico, hasta un relave moderado a fuertemente contaminado protagonizado por el mercurio, principalmente por la gran incidencia que representa el valor de fondo (límite máximo permisible) en el cálculo, es evidente tener dicha acentuación ya que la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya es el foco de concentración de elementos químicos producto de los procesos metalúrgicos previos, por otra parte el índice de geoacumulación se aplica a suelos y sedimentos cuyos límites máximos permisibles son bajos para un relave minero, ya que no existe una normativa nacional específica para valorar los niveles de contaminación en áreas de concentración de relaves mineros, sin embargo es de gran ayuda y permite proporcionar una categoría de contaminación lo más aproximada a la realidad.

La comparación de los resultados tanto del agua de lavado del relave y del lixiviado del adoquín es esencial para entender como la mayoría de elementos químicos peligrosos de control riguroso por la autoridad ambiental nacional han disminuido sus concentraciones entre ellos el cianuro (CN^-), manganeso (Mn), sulfatos (SO_4^{-2}) y sulfuros (S^{-2}), otros se mantienen pero relacionando proporciones mínimas sea el arsénico (As), cobre (Cu), hierro (Fe), y mercurio (Hg) cuyo escenario muestra que se está encapsulando satisfactoriamente estos elementos químicos presentes en el 30% de relave que constituye el adoquín fabricado, además hay que tomar en cuenta que el relave libre a mayor tiempo de exposición en agua que las 12 horas contempladas en el ensayo tiende a reproducir las concentraciones especialmente de sulfuros y sulfatos, lo que no sucede en el adoquín confinado demostrado a los 14 días de estar sumergido en agua desionizada.

El calcio (Ca), magnesio (Mg), y potasio (k), se encuentra de la misma manera en proporciones bajas en la comparación de muestras de agua de sus diferentes procedencias, variable que demuestra y se comprueba que el relave presente en el adoquín no aporta significativamente la calidad mineralógica especialmente del cemento utilizado, por otra parte el aluminio (Al), silicio (Si), y el sodio (Na) ha aumentado en la muestra de agua procedente del adoquín sumergido, atribuciones que corresponden a las concentraciones del relave en sí y del cemento, sin embargo la granulometría muy fina del relave no coadyuva para que se adhieran mejor las partículas y que pueda aumentar la cohesión como parte del agregado.

El PH de ambas muestras analizadas demuestra que este aumenta de manera representativa en la muestra de agua del adoquín sumergido volviéndola netamente básica, aunque no se encuentre dentro de los límites máximos permisibles para descarga a cuerpo de agua dulce acorde al Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente, se denota que aparte de confinarse adecuadamente los sulfuros estos se neutralizan radicalmente. Los sólidos totales y sólidos suspendidos totales aumentan debido a que el adoquín libera material particulado al encontrarse completamente seco pese a ello los valores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.

Los elementos químicos así como los parámetros estudiados que poseen valor de control ambiental tomados finalmente de la muestra de lixiviado están dentro de los límites máximos permisibles para descarga a cuerpo de agua dulce acorde a la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente, a excepción del PH por las razones antes descritas, lo que demuestra una vez más que se ha confinado adecuadamente el relave, los demás agregados especialmente el cemento contrarrestan los niveles de sulfatos y sulfuros principales precursores de la formación de aguas ácidas, incluso muchos de los elementos químicos con mayor control ambiental como el cianuro (CN⁻), arsénico (As), mercurio (Hg), y cobre (Cu) , se encuentran como iones libres muy bajos (<0,001 a <0,05 mg/l), a excepción de la plata (Ag) al parecer no se acopla totalmente a la dosificación empleada sin embargo esto no significa que esté por encima de la norma.

Al comparar el peso final del adoquín sumergido por los 14 días y tomar en cuenta el volumen resultante de agua desionizada demuestra que el adoquín por absorción tuvo ganancia de masa que erosión de la matriz cuyos cálculos realizados este incrementa 100gr en 4,85 litros (l) de agua considerados desde un inicio.

El factor de corrección 1,11 referente a adoquines tipo biselado de la Tabla 2 norma (NTE INEN 1 488, 1986, pág. 3) aplicado a las resistencias netas obtenidas de los ensayos de los adoquines con y sin relave aumenta la resistencia a la compresión, cuyo parámetro tiene que ser necesariamente considerado previo al cálculo de las resistencias características en los dos escenarios acorde a la norma mencionada, sin embargo si analizamos los resultados de las resistencias unitarias no tratadas estas inducen a que se mantengan dentro del rango de calidad del adoquín de acuerdo a su tipo de uso según la norma (NTE INEN 1 485, 1986, pág. 2), es decir no existen mayor alteración sobre la base de la comparación en los rangos propuestos por la mencionada norma en cuanto a la calidad del adoquín según la resistencia a la compresión.

La desviación estándar de 3,61Mpa obtenida de los adoquines sin relave supera casi 3 veces más la desviación estándar de los adoquines con un 30% de relave de 1,32Mpa, situación que se le atribuye a los tamaños irregulares de las partículas de arena mal gradada (arena – grava) que adoptan su propia disposición y distribución en cada uno de los adoquines normales (sin relave), razón por la cual las resistencias a la compresión obtenidas difieren simultáneamente una de otra, situación que se ve mejorada en los adoquines que poseen el 30% de relave minero ya que si bien en la escala de finos el relave provee mejor regularidad de la partículas al sustituir el 30% en la arena detectando una menor variabilidad de las resistencias a la compresión unitarias.

Tomando en cuenta la resistencia característica de 31,15Mpa del adoquín sin relave este se ve afectado por su desviación estándar para llevar a ese valor, mientras que la resistencia característica de 30,56Mpa obtenida para los adoquines con 30% de relave su desviación estándar no incide de manera relevante, lo que significa que pequeñas proporciones del relave incorporado a la dosificación normal en la fabricación artesanal de estas piezas de hormigón no afecta significativamente, es decir existe un disminución solo de un 1,89% a la resistencia característica del adoquín normal, por otra parte se denota que la mineralogía identificada en el relave estudiado tales como el silicio, aluminio, calcio, potasio, hierro, en sus diferentes concentraciones no mejoran el enriquecimiento hidráulico del cemento de manera directa en la dosificación empleada y en el tiempo de los 28 días de fraguado.

La resistencia característica a la compresión calculada para los dos escenarios con la que se hace la comparación del comportamiento mecánico del relave en el adoquín asegura que el 95% de las piezas fabricadas con esas dosificaciones (adoquín normal y adoquín con 30% de relave) obtienen esa resistencia mínima calculada y que el 5% tendrá resistencias más bajas.

Los adoquines con los dos escenarios puestos en análisis tienen un proceso artesanal de fabricación pese a ello llegan a resistencias características a la compresión por un lado de 31,15Mpa (adoquín normal) y 30,56Mpa (adoquín con relave) que al comparar con la resistencia característica de acuerdo a la norma (NTE INEN 1 488, 1986, pág. 3) resultan dentro de un criterio de calidad que de acuerdo a su uso puede ser empleados para tránsito peatonal así como para estacionamientos y calles residenciales.

Los pesos adquiridos entre los adoquines con y sin relave minero difieren desproporcionalmente en sus promedios cuya variación se encuentra entre los 456gr que corresponden a un aumento de 6,15% en peso representado por los adoquines con 30% de relave en su composición, cuya característica se imputa al componente mineralógico del relave ya que en el análisis granulométrico este material obtiene una gravedad específica de 2,81 gr/cm³, es, decir es un material altamente pesado el cual incide en el peso final del adoquín, entre otro aspecto como evaluación de calidad de los adoquines fabricados con 30% de relave son sus dimensiones nominales promedio de ancho, largo y espesor las mismas que al verificar las diferencias de sus lados opuestos el resultado demuestra que las piezas se encuentran dentro de las tolerancias admisibles que propone la norma técnica INEN 3040, incluso aprueban lo estipulado en la norma internacional ASTM C936/C936M - 16, 2016 respecto a su espesor ya que la misma indica que las unidades de pavimentación con hormigón deben tener espesores mínimos de 60mm, el adoquín artesanal tipo cruz posee espesores que sobrepasan los 70mm.

La granulometría del relave es un parámetro que influye absolutamente en el comportamiento mecánico de la resistencia a la compresión ya que hemos podido encontrar una partícula muy fina, según la clasificación granular de los suelos finos de acuerdo a la ASSHTO cuyo material pasa más del 35% del total de la muestra la malla 200 se atribuye a una semejanza de suelo de grano limo – arcilloso (A – 4 a A – 7) ya que según los porcentajes de las proporciones pasantes o que se sedimentan son el 63,04% limos y 22,26% se encuentra dentro de una arcilla, hay que tomar en cuenta que el 100% de la muestra utilizada para la hidrometría no se sedimenta en su totalidad al quedar cierto material suspendido, en tales circunstancias con lo expuesto no significa que el relave se comporte como un suelo limo – arcilloso sino que sus características granulométricas se apegan a dichas atribuciones para reconocerlo, ya que el relave proviene de una fragmentación mecánica forzosa por cuanto no ha pasado procesos naturales de erosión, transporte y sedimentación.

La granulometría del relave por una parte nos brinda mejor uniformidad en la mezcla de los agregados del adoquín para disminuir el margen de desviación estándar cuyo parámetro incide en la resistencia característica a la compresión, mientras que por otro lado

sus partículas muy finas no favorecen para que el relave represente una mejora en la cohesión de los materiales que integran el adoquín fabricado.

8. Conclusiones

De la presente investigación considerando los resultados obtenidos y el análisis minucioso de los mismos para responder adecuadamente a cada uno de los objetivos planteados podemos concluir lo siguiente:

El muestreo sistemático aplicado en una malla de 169,20m² permitió la interpolación mineralógica a través de la homogenización de las muestras obtenidas en cada uno de los 9 puntos excavados que van desde los 70cm hasta el 1m de profundidad obteniendo 54kg de muestra final cuya sobrestimación y su forma de obtención nos garantizó la representatividad de toda la población de minerales y elementos químicos almacenados en la relavera 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya así como la detección de la mayoría de elementos seleccionados para los análisis mineralógicos.

Los relaves de la piscina 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya poseen una amplia concentración de cuarzo con un 69,6% identificado por fluorescencia de rayos x, y un 88,6% por medio de difracción de rayos x, cuyos contenidos no contribuyen significativamente con la resistencia a la compresión del adoquín, las concentraciones reguladas estrictamente por la autoridad ambiental nacional localizadas como elementos traza tales como el cobre (416,6ppm), mercurio (110,9 ppm), plata (44,4ppm) y arsénico (<0,01ppm) así como las semicuantificaciones de minerales de pirita (5,4%), la clorita (3,7%) titanomagnetita (1,3%) y biotita (0,9%) no representan mayor riesgo en el componente agua y en la generación de sulfuros y sulfatos ya que los iones liberados demostrados en los análisis de agua se encuentran dentro de los límites máximos permisibles que propone el acuerdo ministerial 097 - A respecto a la descarga a cuerpo de agua dulce.

El relave como sólido almacenado no posee un buen equilibrio químico cuya concentración de mercurio de 110,9ppm encontrado como elemento traza favorece para que el índice de geoacumulación calculado lo categorice como una fuente de contaminación de nivel moderado a fuertemente contaminado.

Los resultados comparativos de la muestra de agua proveniente del lavado de relave y del lixiviado del adoquín comprueban mayoritariamente la disminución de iones libres de los elementos químicos peligrosos de riguroso control ambiental tal es el caso del cianuro de 0,017 a 0,005 mg/l, manganeso de 0,15 a <0,11 mg/l, sulfatos de 78,72 a 47,61 mg/l y sulfuros de 8 a 3 µg/l, mientras que otros elementos han aumentado significativamente como el

aluminio de <0,01 a 1,29 mg/l, silicio 0,38 a 53,90 mg/l, y sodio de 1,48 a 4,74 mg/l cuyo incremento mineralógico se deriva de la presencia del cemento y la arena que constituye el hormigón del adoquín fabricado.

La dosificación empleada tanto de cemento y arena en la fabricación de adoquines promueve la alcalinidad de las aguas ya que al comparar el PH del lavado de relave con la muestra de lixiviación aumenta de 6,64 a 11,92 lo que se traduce en una neutralización de los sulfuros y sulfatos que posee el 30% de relave incorporado, obteniendo un agua netamente alcalina.

El material particulado que se libera del adoquín fabricado con 30% de relave está representado por los sólidos totales de 972mg/l y sólidos suspendidos totales de 30mg/l cuyas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles para descarga a cuerpo de agua dulce acorde a la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente.

La fabricación de adoquines con dosificaciones bajas del 30% de relave en su composición es viable ambientalmente ya que la mayoría de iones liberados y parámetros analizados no presentan impacto al factor agua cuyos elementos químicos que poseen valor de fondo se encuentran dentro de sus límites máximos permisibles para descarga a cuerpo de agua dulce acorde a la tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente, lo que se ha demostrado un adecuado confinamiento del relave incorporado.

Los minerales detectados por geoquímica analítica en sus concentraciones correspondientes especialmente de silicio (69,6%), aluminio (12,1%), calcio (1,46%), potasio (1,38%) y hierro (1,79%) no mejoran significativamente el endurecimiento hidráulico del cemento y por ende la resistencia a la compresión de los adoquines elaborados con un 30% de relave a los 28 días de haber fraguado.

Al incorporar el 30% de relave minero en los adoquines artesanales se verifica una disminución de 0,59Mpa (1,89%) de la resistencia característica a la compresión en comparación con los adoquines normales cuya situación se atribuye a la granulometría muy fina del relave con peculiaridades semejantes de un suelo limo – arcilloso, variable que no brinda mejor cohesión al vincularse con los demás agregados.

El adoquín fabricado con un 30% de relave minero de acuerdo a su resistencia característica alcanzada de 30,56Mpa es viable y cumple con los criterios de calidad para uso específico de tránsito peatonal, así como para estacionamientos y calles residenciales al compararlo con la norma INEN 1488, a pesar que son piezas fabricadas por un proceso

artesanal cumplen con las dimensiones nominales que establece la norma técnica INEN 3040 (largo ± 2 mm, ancho ± 2 mm, espesor ± 3 mm), y su espesor mayor a 60mm sugerido por la norma internacional ASTM C936/C936M - 16, 2016.

9. Recomendaciones

De las conclusiones acertadas en el presente estudio con miras a mejorar el proceso evaluativo y seguir investigando la temática propuesta se sugiere lo siguiente:

Contrastar los resultados mineralógicos de las muestras obtenidas con datos previos que pueda proveer la planta de beneficio donde se esté realizando estudios relacionados al aprovechamiento sustentable de relaves con fines constructivos para asegurar la calidad del muestreo realizado.

Redimensionar las medidas a considerar en el muestreo de relaveras ya que son fuentes de contaminación de gran importancia, sobre todo en el número de muestras a tomar para disminuir el sesgo de elementos químicos y minerales que pueden estar presentes.

Las entidades nacionales de control y seguimiento de las actividades mineras deben establecer en sus normativas procesos adecuados de muestreo para relaves los cuales garanticen resultados ideales en los análisis que se destinen realizarlos, así como establecer valores de fondo apropiados acorde a las condiciones de un desecho minero para poder estimar su estabilidad química apegado lo más posible a su realidad.

De acuerdo a las características mineralógicas del relave se debe utilizar pequeñas proporciones como en el caso de un 30% en la fabricación de adoquines para evitar mayores concentraciones de iones libres que puedan estarse trasportando en el lavado del adoquín pudiendo sobrepasar los límites máximos permisibles que establece la norma ambiental.

Si se desea realizar una comparación semejante de las muestras de agua para los análisis químicos es aconsejable aplicar mayor tiempo en el lavado de relave para establecer un rango más amplio de relación entre las concentraciones adquiridas.

Utilizar mayor tiempo que los 28 días de fraguado en los adoquines fabricados con relave para verificar si los minerales que pueden favorecer la resistencia hidráulica del cemento tienen mejor respuesta de aporte a la resistencia a la compresión del adoquín o si los mismos empeoran su condición.

Para alcanzar una mejor resistencia a la compresión que incluso se desee llegar a normas de calidad internacional se deben realizar diferentes dosificaciones, utilizando agregados selectivos y de buena calidad e incrementar cantidades de cemento lo que

implicaría mayores costos económicos siendo oportuno realizar primeramente una evaluación costo - beneficio en relación si resulta más beneficioso tratar el relave en la fuente o darle un aprovechamiento sustentable.

De acuerdo a las características mineralógicas y granulométricas del relave almacenado en la piscina 2 de la planta de beneficio Alto Vizcaya es recomendable utilizarlo en la fabricación de adoquines en pequeñas proporciones similares al 30% con las condiciones, criterios y procedimientos semejantes aplicados en el presente trabajo investigativo, ya que si se aumenta la proporción de relave según los resultados comparativos de la resistencia característica a la compresión existe la posibilidad de que la misma tienda a bajar.

Seguir investigando las características mecánicas del relave de la planta de beneficio Alto Vizcaya como parte de agregado en la fabricación de adoquines aplicando otras pruebas como desgaste, esfuerzo a la tracción, absorción, entre otros, según los criterios que brinden las normas de calidad aplicadas en nuestro país.

10. Bibliografía

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España, 81-110.
- ASTM C936/C936M - 16. (2016). Especificación estándar para unidades de pavimentación entrelazadas de hormigón sólido. [Archivo PDF] https://drive.google.com/drive/folders/1XP91ALJvk--X8y3QdyzfWVLCFvS_WJy0.
- De la Cruz, E. (2018). Fluorescencia de rayos X y su aplicación en la determinación de elementos químicos en determinadas muestras. [Trabajo de grado, Licenciado en Física]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/8783/DelaCruz_ee.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- EPA. (2017). SW-846 Test Method 1315: Mass Transfer Rates of Constituents in Monolithic or Compacted Granular Materials Using a Semi-Dynamic Tank Leaching Procedure. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1315-mass-transfer-rates-constituents-monolithic-or-compacted-granular>
- Espín, D., Jarrín, J., y Escobar, O. (2017). Manejo, Gestión, Tratamiento y Disposición final de Relaves Mineros generados en el Proyecto Río Blanco. Ciencias de Seguridad y Defensa, 2(4), 2.
- Jiménez, M., Grijalva, A., y Ponce, H. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopía de emisión óptica (ICP-OES). Recimundo, 4(4), 6.
- Jiménez, S. (2016). Granulometría, método del hidrómetro, fundamentos teóricos, aplicaciones. <https://www.hidraulicafacil.com/2016/06/granulometria-metodo-del-hidrometro.html>.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). Acuerdo Ministerial N° 097 - A. Normas de calidad ambiental, de descarga de efluentes y recurso suelo.
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2014). Guía para el muestreo de suelo. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>

- NTE INEN 1 485. (1986). Norma Técnica Ecuatoriana. Adoquines. Determinación de la resistencia a la compresión. [Archivo PDF]
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1485.pdf>
- NTE INEN 1488. (1986). Norma Técnica Ecuatoriana. Requisitos necesarios para fabricación de adoquines de hormigón. [Archivo PDF]
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1488.pdf>
- NTE INEN 3040. (2016). Norma Técnica Ecuatoriana. Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo. [Archivo PDF] https://vipresa.com.ec/wp-content/uploads/2019/02/nte_inen_3040.pdf
- NTE INEN 686. (1982). Norma Técnica Ecuatoriana. Mecánica de suelos. Toma de muestras alteradas. [Archivo PDF]
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_686.pdf
- NTE INEN 695. (2010). Norma Técnica Ecuatoriana. Áridos. Muestreo. [Archivo PDF]
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_695-1.pdf
- Odelcop, L., y Rodriguez, R. (2007). Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. Ingeniería civil, 9, 181.
- Pérez, L., Báez, A., Luna, M., y Zamora, L. (2018). Detección de arsénico, mercurio y plomo en agua: un reto para la tecnología. 1(2), 9.
- Perez, W. (Abril de 2020). Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá. 41- 42. DOI: <https://doi.org/>: <https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021004>.
- Universidad de las Palmas de Gran Canaria. (2023). Clasificación de los suelos. Ulpgc.es. <https://www2.ulpgc.es/index.php?pagina=busqueda&ver=google&cx=007197090300231128638%253Aetbigalvwm&ie=UTF8&q=CLASIFICACION+DE+SUELOS&op=Buscar#gsc.tab=0&gsc.q=CLASIFICACION%20DE%20SUELOS&gsc.page=1>
- Tuesta, E., y Vásquez, Y. (2013). Aplicación de la técnica de Difracción de rayos x (DRX) en la industria minera. Buenaventura Ingenieros S.A.: [Archivo PDF]
https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Construccion_Civil/21.pdf
- Vila, P., Pereyra, M., y Gutiérrez, A. (2017). Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón. Resultados tendientes a validar el ensayo en medio adoquín. 7(3), 249-250.

Zamora, G., y Meza, R. (2022). Formación, prevención e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en operaciones mineras, 7(1).
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S251953522022000100001&script=sci_arttext



unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

11. Anexos

Anexo. 1 Resultados análisis mineralógicos otorgados por el laboratorio de geoquímica analítica de la Universidad Técnica Particular de Loja.

Fluorescencia de rayos x



UTPL
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
LABORATORIO DE GEOQUÍMICA ANALÍTICA

Asunto: Informe de Fluorescencia de Rayos X
Método: Mining Light Elements (MLE)
Solicitante: Diego Esteban Morocho Piedra
Fecha de entrega: 17 de febrero de 2023

En la siguiente tabla se presentan los valores de composición química, obtenidos mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) de las muestras correspondientes al **PED-0007**, empleando el equipo Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X portátil marca Bruker S1 Turbo SD.

MUESTRA	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	S (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
DM-1	12.1	69.6	2.56	1.38	1.46	1.79

Estos resultados corresponden a la composición química de la muestra expresada en elementos mayoritarios (>1%), minoritarios (<1 a 0,1%) y trazas (ppm).

ND: No detectó.

Observaciones: El Na₂O y Carbono no es analizado por FRX, pero la muestra los puede contener.

Universidad Técnica Particular de Loja (U.T.P.L) y Laboratorio de Geoquímica Analítica se deslindan de toda responsabilidad civil, laboral y penal, derivado del protocolo de muestreo de las alicuotas ingresadas al laboratorio que puedan alterar los resultados del análisis, puesto que en este caso no fueron tomadas por un representante de la U.T.P.L.

Ing. Carlos Roberto Cordero J.
Técnico de Laboratorio de Geoquímica Analítica



San Cayetano Alto s/n Loja - Ecuador
Telf.: (593 - 7) 3701444
Fax: (593 - 7) 2584893
informacion@utpl.edu.ec Apartado
Postal: 11 - 01 - 608 www.utpl.edu.ec



unl

Universidad
Nacional
de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS
INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN
MINAS

Espectroscopía de emisión óptica (ICP – OES)



UTPL
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS LABORATORIO DE GEOQUÍMICA ANALÍTICA

Asunto: Informe de Análisis Químico

Método: ICP-OES

Solicitante: Diego Esteban Morocho Piedra

Fecha de entrega: 17 de febrero de 2023


En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos del análisis químico realizado por Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES) de las muestras correspondientes al PED-0007, empleando el equipo Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente marca Perkin Elmer.

Muestra	As (ppm)	Hg (ppm)	Mg (ppm)	Cu (ppm)	Ag (ppm)
DM-1	<0.01	110.9	3139.8	416.6	44.4

Los valores corresponden a la concentración de cada elemento expresada en g/t (ppm).

ND: No Detectó.

Universidad Técnica Particular de Loja (U.T.P.L) y Laboratorio de Beneficio de Minerales se deslindan de toda responsabilidad civil, laboral y penal, derivado del protocolo de muestreo de las alícuotas ingresadas al laboratorio que puedan alterar los resultados del análisis, puesto que en este caso no fueron tomadas por un representante de la U.T.P.L.


Ing. Carlos Roberto Correa
Responsable de la Laboratorio de Geoquímica Analítica



San Cayetano Alto s/n
Loja - Ecuador
Tel.: (593 - 7) 3701444
Fax: (593 - 7) 2584893
informacion@utpl.edu.ec
Apartado Postal: 11 - 01 - 608
www.utpl.edu.ec



unl

Universidad
Nacional
de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS
INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN
MINAS

Difractometría de rayos x



Universidad Técnica Particular de Loja
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Departamento de Geociencias
Análisis Mineralógico por Difracción de Rayos X
Cliente: Sr. Esteban Morocho Piedra.
Fecha: 22-02-2023

INFORME DE DRX

A continuación, se presente el informe sobre el análisis mineralógico de Difracción de Rayos X de la muestra: DM-1, expediente PED-0007-2023, empleando el Difractómetro Bruker D8 ADVANCE, y el programa para la determinación cualitativa y semicuantitativa HighScore Plus.

Muestra	Fases Minerales	Semicuantificación (%)
DM-1	Cuarzo	88,6
	Pirita	5,4
	Biotita	0,9
	Clorita	3,7
	Titanomagnetita	1,3

Este análisis mineralógico semicuantitativo refleja la composición de la parte cristalina de la muestra. La misma puede contener fases amorfas. El laboratorio no se hace responsable por el muestreo previo al análisis.

M.Sc. en Geoquímica John M. Sique
ANALISTA de DRX



P. D.: Se adjunta difractograma

San Cayetano Alto s/n
Loja-Ecuador
Telf.: (593-7) 370 1444
informacion@utpl.edu.ec
Apartado Postal: 11-01-608
www.utpl.edu.ec



unl

Universidad
Nacional
de Loja

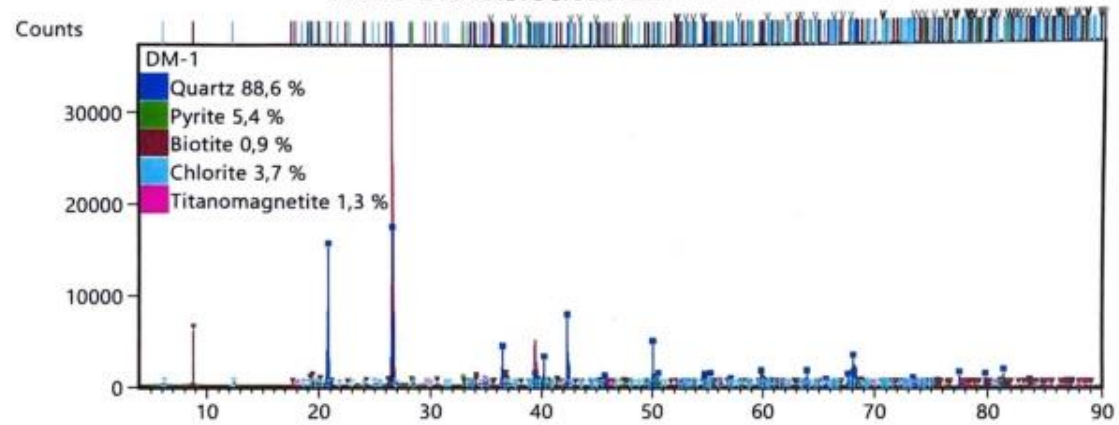
FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS
INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN
MINAS



UTPL
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

ANEXO 1. DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA



San Cayetano Alto s/n
Loja-Ecuador
Telf.: (593-7) 370 1444
informacion@utpl.edu.ec
Apartado Postal: 11-01-608
www.utpl.edu.ec

Anexo. 2 Análisis químico de muestras de agua del lavado de relave y lixiviado de adoquín

Muestra de lavado de relave

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA					
REGISTRO DE INFORME DE RESULTADOS		Laboratorios			
LABORATORIOS UTPL		Laboratorio de Ensayo Acreditado por el SAE con acreditación N°. SAE L'EN 12-005			
CODIGO: R.7.8.2 VERSION: 5 FECHA: 2022-09-20 ELABORADO POR: Diego Maza Estrada REVISADO Y APROBADO POR: Diana Ines Hualpa					
Informe de Resultados Nro:		2306512009			
Solicitud Nro:	651	Fecha del Informe:	2023-04-05		
Sitio de análisis:	Laboratorios UTPL	Dirección:	San Cayetano Alto s/n, Loja, Ecuador		
Información Proporcionada por el Cliente:					
Cliente:	Diego Morocho	Muestreador:	Diego Esteban Morocho		
Dirección:	Av. Universitaria y Quito	Descripción:	Agua Natural		
Teléfono:	0988473774	Identificación:	Lavado Arena de Relave		
Email:	diegomorocho091@gmail.com	Fecha Toma Muestra:	2023-03-20		
Información general de muestra recibida:					
Fecha de recepción:	2023-03-20				
Condiciones de recepción:	Las muestras son transportadas bajo cadena de frío, llegan al laboratorio a temperatura de (3 a 7) °C				
Resultados de análisis de muestra					
Condiciones Ambientales durante el ensayo:		Temperatura (°C):	21.3 Humedad (%): 55		
Fecha de análisis		Ítem de ensayo	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Inicio	Fin				
2023-03-21	2023-03-21	pH	-	6.648	AOAC: 973.41
2023-03-24	2023-03-24	Sulfatos	mg/l	78.72	SM 4500-SO ₄ -E
2023-03-28	2023-03-28	Sólidos totales	mg/l	348	SM 2540 B
2023-03-29	2023-03-29	Cianuros *	mg/l	0.017	SM 4500-CN-E
2023-03-29	2023-03-29	Sulfuros *	µg/l	8	SM 4500 S ² -D
2023-03-31	2023-03-31	Sólidos suspendidos totales *	mg/l	25	SM 2540-D
2023-03-28	2023-03-30	Hierro	mg/l	<0.1	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-30	Cobre	mg/l	<0.05	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-30	Manganeso	mg/l	0.1595	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-31	Aluminio *	mg/l	<0.01	US EPA 3015; SM 3111 D
2023-03-28	2023-03-31	Arsénico *	mg/l	<0.001	US EPA 3015; SM 3114 B
2023-03-28	2023-03-31	Calcio *	mg/l	65.225	US EPA 3015; SM 3111 A
2023-03-28	2023-03-31	Magnesio *	mg/l	1.655	US EPA 3015; SM 3111 A
2023-03-28	2023-04-04	Mercurio *	mg/l	<0.001	US EPA 3015; SM 3112 A
2023-03-28	2023-04-03	Plata *	mg/l	0.0748	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-31	Potasio *	mg/l	10.26	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-04-04	Silicio *	mg/l	0.3882	US EPA 3015; SM 3111 A
2023-03-28	2023-03-31	Sodio *	mg/l	1.848	US EPA 3015; SM 3111 A
Glosario:					
n/d: No disponible		NPM/100 ml: Número más probable de bacterias por 100 mililitros			
<: Menor al límite de detección		mg/l: miligramos por litro			
% Sat OD: Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto		IS: In Situ (En el sitio de muestreo)			
UPtCo: Unidades de Platino Cobalto		SM: siglas en inglés de Método Estándar			
NTU: Unidades nefelométricas de turbidez		AOAC: siglas en inglés de Asociación de Químicos Analíticos Oficiales			
uS/cm: microsiemens por centímetro					



unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

Observaciones:

- a) El informe de ensayo no se puede reproducir parcialmente, excepto en su totalidad con la aprobación escrita del laboratorio.
- b) Los resultados representan exclusivamente la muestra (s) analizada (s).
- c) Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE
- d) El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente (Registro R.4.4.1-B) que pueda afectar la validez de los resultados.
- e) Cuando el resultado se expresa como <0,045 (0,016) significa que el límite más bajo de nuestra acreditación es 0,045 y el valor expresado entre paréntesis (0,016) corresponde a la concentración del parámetro en su muestra.

Información Técnica:

Los métodos de análisis para la determinación de cada uno de los parámetros, se basan en:
 Edición 23th del Standar Methods, publicada en octubre de 2017.
 Edición 21th del AOAC - Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, publicada en 2019.

ELABORADO POR:



 Ing. Cristian David Jumbo
 Técnico Analista



REVISADO Y APROBADO POR:



 Mgtr. Diego Ernesto Maza
 Líder Técnico

Fin del Informe

Muestra de lixiviado de adoquín

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA					
REGISTRO DE INFORME DE RESULTADOS					
LABORATORIOS UTPPL		Laboratorios			
<i>Laboratorio de Ensayo Acreditado por el SAE con acreditación N°: SAE LEN 12-005</i>					
CÓDIGO: R.7.8.2 VERSION: 5 FECHA: 2022-09-20 ELABORADO POR: Diego Maza Estrada REVISADO Y APROBADO POR: Diana Ines Hualpa					
Informe de Resultados Nro:		2306512010			
Solicitud Nro:	651	Fecha del Informe:	2023-04-05		
Sitio de análisis:	Laboratorios UTPPL	Dirección:	San Cayetano Alto s/n, Loja, Ecuador		
Información Proporcionada por el Cliente:					
Cliente:	Diego Morocho	Muestreador:	Diego Esteban Morocho		
Dirección:	Av. Universitaria y Quito	Descripción:	Agua Natural		
Teléfono:	0988473774	Identificación:	Lixiviado de Adoquín		
Email:	diegomorocho091@gmail.com	Fecha Toma Muestra:	2023-03-20		
Información general de muestra recibida:					
Fecha de recepción:	2023-03-20				
Condiciones de recepción:	Las muestras son transportadas bajo cadena de frío, llegan al laboratorio a temperatura de (3 a 7) °C				
Resultados de análisis de muestra					
Condiciones Ambientales durante el ensayo:		Temperatura (°C):	21.3		
		Humedad (%):	55		
Fecha de análisis		Ítem de ensayo	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Inicio	Fin				
2023-03-21	2023-03-21	pH	-	11.926	AOAC, 973.41
2023-03-24	2023-03-24	Sulfatos	mg/l	47.61	SM 4500-SO ₄ -E
2023-03-28	2023-03-28	Sólidos totales	mg/l	972	SM 2540 B
2023-03-29	2023-03-29	Cianuros *	mg/l	0.005	SM 4500-CN-E
2023-03-29	2023-03-29	Sulfuros *	µg/l	3	SM 4500 S ² -D
2023-03-31	2023-03-31	Sólidos suspendidos totales *	mg/l	30	SM 2540-D
2023-03-28	2023-03-30	Hierro	mg/l	<0.1	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-30	Cobre	mg/l	<0.05 (0.0024)	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-30	Manganeso	mg/l	<0.11	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-31	Aluminio *	mg/l	1.293	US EPA 3015; SM 3111 D
2023-03-28	2023-03-31	Arsénico *	mg/l	<0.001	US EPA 3015; SM 3114 B
2023-03-28	2023-03-31	Calcio *	mg/l	11.025	US EPA 3015; SM 3111 A
2023-03-28	2023-03-31	Magnesio *	mg/l	<0.1	US EPA 3015; SM 3111 A
2023-03-28	2023-04-04	Mercurio *	mg/l	<0.001	US EPA 3015; SM 3112 A
2023-03-28	2023-04-03	Plata *	mg/l	0.0951	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-03-31	Potasio *	mg/l	2.709	US EPA 3015; SM 3111 B
2023-03-28	2023-04-04	Silicio *	mg/l	53.9	US EPA 3015; SM 3111 A
2023-03-28	2023-03-31	Sodio *	mg/l	4.749	US EPA 3015; SM 3111 A
Glosario:					
n/d: No disponible			NPM/100 ml: Número más probable de bacterias por 100 mililitros		
<: Menor al límite de detección			mg/l: miligramos por litro		
% Sat OD: Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto			IS: In Situ (En el sitio de muestreo)		
UPICo: Unidades de Platino Cobalto			SM: siglas en inglés de Método Estándar		
NTU: Unidades nefelométricas de turbidez			AOAC: siglas en inglés de Asociación de Químicos Analíticos Oficiales		
uS/cm: microsiems por centímetro					



unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

Observaciones:

- a) El informe de ensayo no se puede reproducir parcialmente, excepto en su totalidad con la aprobación escrita del laboratorio.
- b) Los resultados representan exclusivamente la muestra (s) analizada (s).
- c) Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE
- d) El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente (Registro R.4.4.1-B) que pueda afectar la validez de los resultados.
- e) Cuando el resultado se expresa como <0,045 (0,016) significa que el límite más bajo de nuestra acreditación es 0,045 y el valor expresado entre paréntesis (0,016) corresponde a la concentración del parámetro en su muestra.

Información Técnica:

Los métodos de análisis para la determinación de cada uno de los parámetros, se basan en:
 Edición 23th del Standar Methods, publicada en octubre de 2017.
 Edición 21th del AOAC - Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, publicada en 2019.

ELABORADO POR:



 Ing. Cristian David Jumbo
 Técnico Analista



ELABORADO Y APROBADO POR


 Mgr. Diego Ernesto Maza
 Líder Técnico

Fin del Informe

Anexo. 3 Resultados ensayos de resistencia a la compresión de adoquines y granulometría del relave otorgados por el laboratorio de mecánica de suelos, resistencia de materiales y asfaltos de la Universidad Técnica Particular de Loja.



unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

Resistencia a la compresión adoquines sin relave



UTPL

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, RESISTENCIA DE MATERIALES Y ASFALTOS



RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES Y TESTIGOS DE ADOQUINES DE HORMIGÓN													
Realizado por:	Ing. Jhandry Guarinda, Ing. Luis Capa												
Ensayado por:	Ing. Jhandry Guarinda, Ing. Luis Capa												
Fecha de ensayo:	07-03-23												
Proyecto:	Aprovechamiento de relave con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya												
Equipo:	SHIMADZU X2000												
Modo de ensayo:	Carga axial a velocidad controlada												
Referencias normativas:	INEN 1485												
No.	Fecha de muestreo	Procedencia	Cód.	Edad (días)	Dimensión (cm)					Área Cara (cm ²)	Peso	Carga (kN)	Resistencia (N/mm ²)
					h	b	bm	BM	h		g		
1	7/2/2023	A-001	AD-01	28	24,10	17,10	9,30	14,50	2,60	473,990	7047,200	1723,790	36,576
2		A-002	AD-02		24,30	17,30	9,40	14,50	2,60	462,530	7149,000	1436,300	29,766
3		A-003	AD-03		24,30	17,15	9,40	14,40	2,60	470,625	7320,600	1534,240	32,050
4		A-004	AD-04		24,40	17,30	9,30	14,40	2,70	466,110	7426,000	1724,300	35,470
5		A-005	AD-05		24,50	17,30	9,30	14,40	2,70	467,640	7431,200	1364,790	26,366
6		A-006	AD-06		24,40	17,30	9,30	14,40	2,80	466,480	7416,900	1761,600	36,067
7		A-007	AD-07		24,00	17,00	9,20	14,30	2,70	471,450	7525,200	1729,200	36,660
8		A-008	AD-08		24,10	17,00	9,50	14,10	2,60	471,060	7313,600	1516,350	32,190
Observaciones: Se aplica el proceso de determinación de resistencia a la compresión de los adoquines basados estrictamente en los parámetros que indica la referencial normativa													

San Cayetano Alto s/n, Loja-Ecuador
Telf.: (593-7) 370 1444
informacion@utpl.edu.ec / Apartado Postal: 11-01-608



unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

Resistencia a la compresión adoquines con 30% de relave



UTPL
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, RESISTENCIA DE MATERIALES Y ASFALTOS



RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES Y TESTIGOS DE ADOQUINES DE HORMIGÓN													
Realizado por:		Ing. Jhandry Guarinda, Ing. Luis Capa											
Ensayado por:		Ing. Jhandry Guarinda, Ing. Luis Capa											
Fecha de ensayo:		16-03-23											
Proyecto:		Aprovechamiento de relave con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya											
Equipo:		SHIMADZU X2000											
Modo de ensayo:		Carga axial a velocidad controlada											
Referencias normativas:		INEN 1485											
No.	Fecha de muestreo	Procedencia	Cód.	Edad (días)	Dimensión (cm)					Área Cara (cm ²)	Peso (g)	Carga (kN)	Resistencia (N/mm ²)
					h	b	bm	BM	h				
1	16/2/2023	AR-001	ADR-01	26	24,25	17,20	9,90	14,50	2,60	480,540	7021,500	1394,210	29,140
2		AR-002	ADR-02		24,30	17,10	9,70	14,40	2,40	473,370	7810,000	1361,560	29,166
3		AR-003	ADR-03		24,30	17,20	9,40	14,40	2,60	479,840	7719,800	1366,690	26,524
4		AR-004	ADR-04		24,30	17,10	9,70	14,50	2,65	479,660	7946,160	1376,210	26,691
5		AR-005	ADR-05		24,25	17,15	9,60	14,50	2,70	480,950	7963,600	1401,390	29,137
6		AR-006	ADR-06		24,25	17,10	9,30	14,70	2,60	477,075	7861,000	1413,460	29,626
7		AR-007	ADR-07		24,20	17,10	9,45	14,60	2,50	474,445	7925,300	1367,070	29,235
8		AR-008	ADR-08		24,25	17,15	9,50	14,75	2,70	481,363	7818,900	1554,650	32,295
Observaciones: Se aplica el proceso de determinación de resistencia a la compresión de los adoquines basados estrictamente en los parámetros que indica la referencial normativa													

San Cayetano Alto s/n, Loja-Ecuador
Telf.: (593-7) 370 1444
informacion@utpl.edu.ec / Apartado Postal: 11-01-608

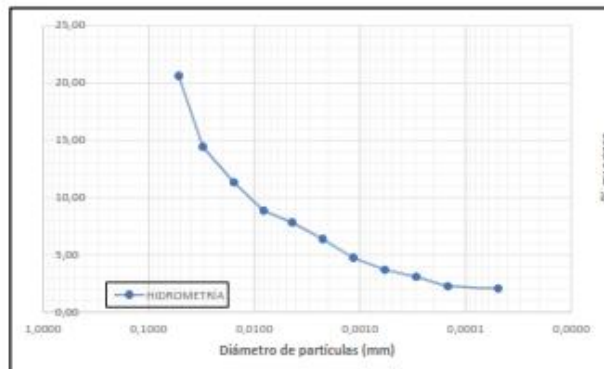
Análisis granulométrico del relave por hidrometría



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, RESISTENCIA DE MATERIALES Y ASFALTOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS FINOS MEDIANTE TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN POR (HIDROMETRÍA)			
Realizado por:	Diego Esteban Morochó Piedra		
Fecha de ensayo:	10/2/2023		
Proyecto de tesis:	Aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la Planta de Beneficio Alto Vizcaya		
Director:	Mg. Walter Simón Tambo Encalada	Equipo	
Localización:	Zaruma, planta de beneficio Alto Vizcaya	Tipo	151 H 152 H
Coordenadas:	9394331,14N 852727,13E	Calibración	
Tipo de material:	Relave de mina	T (°C)	- 18
Fecha de muestreo:	18/1/2023	Cd	- 7,91
Referencias normativas:	ASTM D 422-03	Cm	- 1
		a	- 1,03

HIDROMETRÍA							
Características de la muestra							
Material:	Pasante de 0,075 mm (N°200)			Peso seco (gr)			
Gs:	2,819			30			
	% Pasante tamiz N°200						
Tiempo	Lectura	Temp.	RHC	R'H+CM	L/t	D	% más fino
min.	R'H	°C			cm/min	mm	
1	11	17,3	2,59	10	3,900	0,05187	20,00
2	8	17,3	-0,41	7	2,300	0,03059	14,42
4	6,5	17,2	-1,91	5,5	1,175	0,01563	11,33
8	5,3	17,2	-3,11	4,3	0,613	0,00815	8,80
15	4,8	17,1	-3,01	3,8	0,329	0,00438	7,83
30	4,1	17,6	-4,31	3,1	0,169	0,00225	6,39
60	3,3	17,5	-5,11	2,3	0,087	0,00115	4,74
120	2,8	17,2	-5,01	1,8	0,044	0,00058	3,71
240	2,5	17	-5,91	1,5	0,022	0,00029	3,09
480	2,1	16,8	-6,31	1,1	0,011	0,00015	2,27
1440	2	16,6	-6,41	1	0,004	0,00005	2,06



San Cayetano Alto s/n
Loja-Ecuador
Telf.: (093-7) 370 1444
informacion@utpl.edu.ec
Apartado Postal: 11-01-608
www.utpl.edu.ec

Anexo. 4 Representaciones cartográficas.

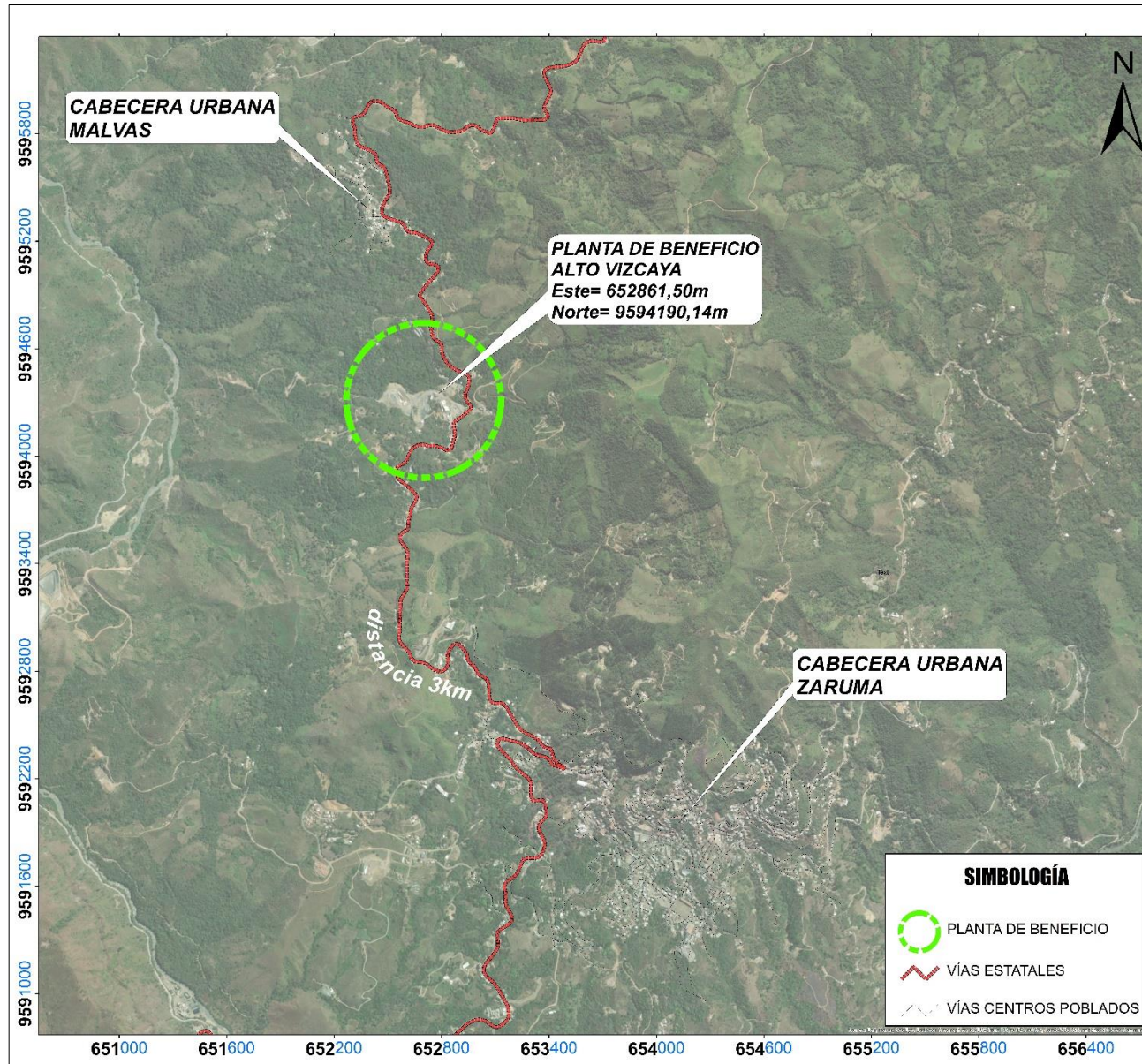


unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

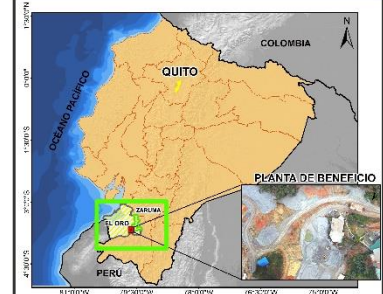


SIMBOLOGÍA

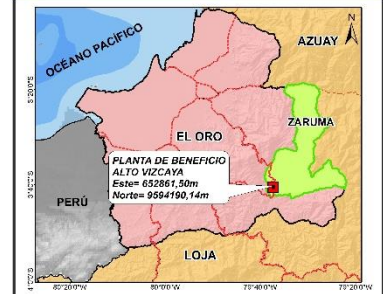
- PLANTA DE BENEFICIO
- VÍAS ESTATALES
- VÍAS CENTROS POBLADOS

UBICACIÓN GEOGRÁFICA PLANTA DE BENEFICIO ALTO VIZCAYA CÓDIGO 390356

UBICACIÓN GEOGRÁFICA NACIONAL



UBICACIÓN GEOGRÁFICA PROVINCIAL



ESCALA GRÁFICA

Elipsoide y Datum Horizontal: Sistema Geodésico Mundial WGS84
 Proyección Universal Transversal de Mercator - UTM_Zona_17S

APROVECHAMIENTO DE RELAVES CON FINES DE AGRGADOS EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES A PARTIR DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN LA PLANTA DE BENEFICIO ALTO VIZCAYA

POSGRADO: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA Maestría en Minas (mención en minería y metalurgia extractiva)	FECHA: Abril, 2023	LÁMINA: 1:1
MAESTRANTE: Ing. Diego Esteban Morochó Piedra	ESCALA: 1:10.000	FORMATO: A1
DIRECTOR: Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc		

FUENTE:

- Comité Nacional de Límites (CONALI); 2021, escala 1: 5 000.
- Instituto Geográfico Militar, Base Nacional (IGM), escala 1:5 000, 1:50 000.
- Servidor en línea Basemap.

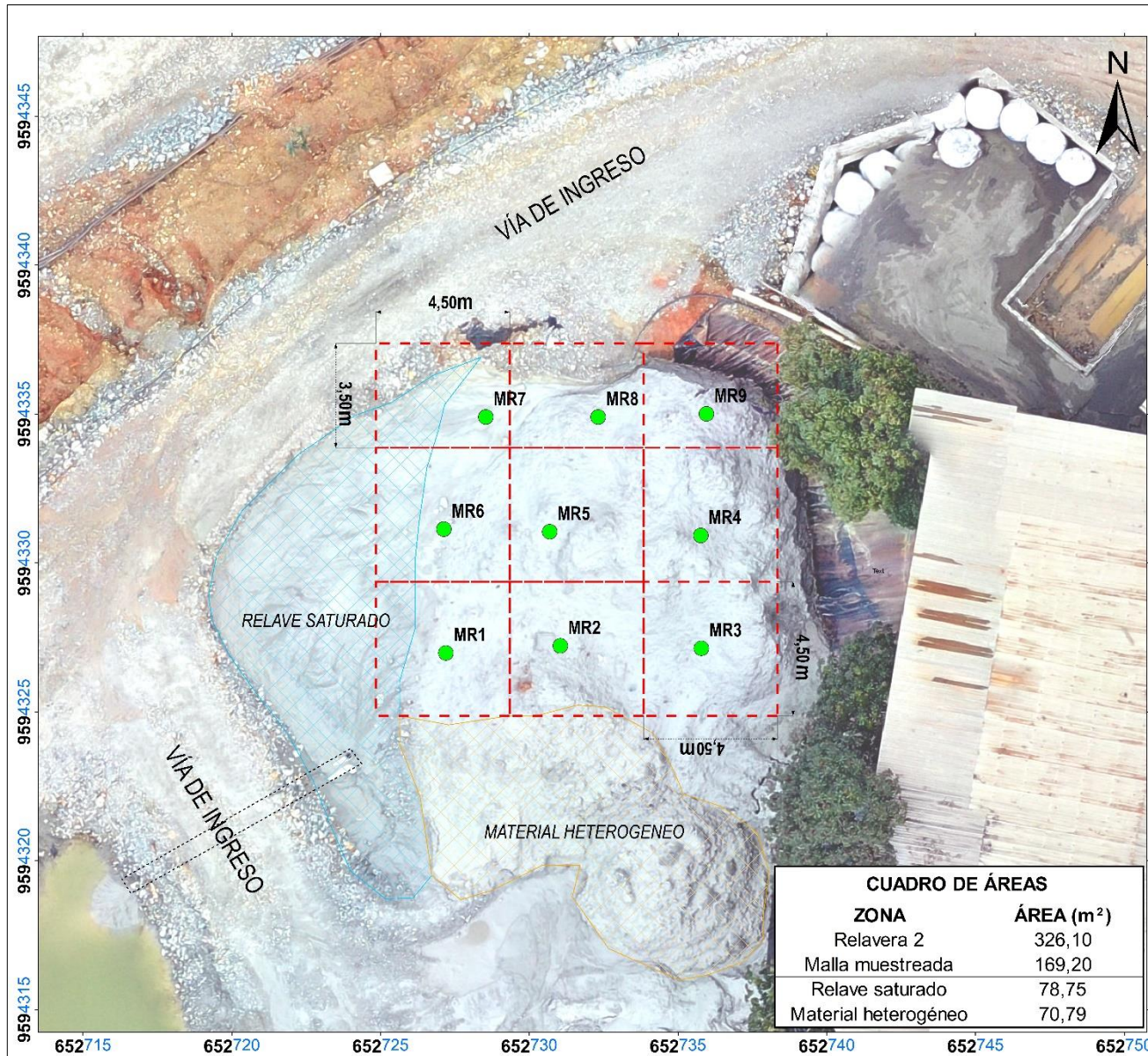


unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

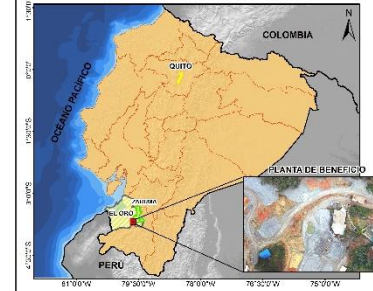
MAESTRÍA EN MINAS



CUADRO DE ÁREAS	
ZONA	ÁREA (m ²)
Relavera 2	326,10
Malla muestreada	169,20
Relave saturado	78,75
Material heterogéneo	70,79

PLANTA DE BENEFICIO ALTO VIZCAYA PUNTOS DE MUESTREO RELAVERA 2

UBICACIÓN GEOGRÁFICA



LEYENDA

- MUESTREO
- MALLA
- RELAVE SATURADO
- MATERIAL HETEROGÉNEO
- TUBERÍA

COORDENADAS MUESTREO

CÓDIGO	ESTE (m)	NORTE (m)
MR1	652727,2	9594326,98
MR2	652731,05	9594327,22
MR3	652735,79	9594327,13
MR4	652735,77	9594330,92
MR5	652730,69	9594331,05
MR6	652727,13	9594331,14
MR7	652728,54	9594334,9
MR8	652732,32	9594334,9
MR9	652735,96	9594335,01

ESCALA GRÁFICA

Elipsoidal y Datum Horizontal: Sistema Geodésico Mundial WGS84
Proyección Universal Transversal de Mercator - UTM Zona 17S

APROVECHAMIENTO DE RELAVES CON FINES DE AGRADOS EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES A PARTIR DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN LA PLANTA DE BENEFICIO ALTO VIZCAYA

POSGRADO: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA Maestría en Minas (mención en minería y metalurgia extractiva)	FECHA: Abril, 2023 ESCALA: 1:60	LAMINA: 1/1 FORMATO: A1
MAESTRANTE: Ing. Diego Esteban Morocho Piedra	DIRECTOR: Ing. Walter Simón Tambo Encalada, Mg.Sc	

FUENTE:
- Comité Nacional de Límites (CONALI); 2021, escala 1:5 000.
- Instituto Geográfico Militar, Base Nacional (IGM), escala 1:5 000. 1:50 000.
- Ortofoto, enero 2023.




unl

Universidad Nacional de Loja

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

MAESTRÍA EN MINAS

Anexo. 5 Certificado de traducción



THE CANADIAN HOUSE CENTER

Aprende el Inglés de verdad.

"Make today so awesome, yesterday gets jealous."



Loja, 18 de abril del 2023

CERTIFICADO DE TRADUCCIÓN


A quien corresponda,

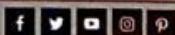
Yo, José Geovanny Jiménez Balcázar, traductor oficial del The Canadian House Center, instituto privado especializado en la enseñanza del inglés como lengua extranjera y centro de traducción autorizado y acreditado por el Consejo Nacional de la Judicatura del Ecuador bajo la licencia profesional número 12282677, certifico que el trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva titulado **Aprovechamiento de relaves con fines de agregados en la fabricación de adoquines a partir de la composición mineralógica en la planta de beneficio Alto Vizcaya.**, realizado por el *Ing. Ing. Diego Estebán Morocho Piedra* portador de la cédula de identidad ecuatoriana 1105007353, de la Universidad Nacional de Loja, ha sido traducido de buena fe del español al inglés en la institución antes mencionada, y es una traducción fiel y exacta del documento original según mi leal saber y entender.

El portador puede hacer uso de este certificado y del documento traducido para cualquier fin legal que consideren oportuno.

Lic. José Geovanny Jiménez Balcázar
TRADUCTOR OFICIAL
 THE CANADIAN HOUSE CENTER
 Email: chcloja@gmail.com
 Tel: +593 (0)7 258 5435


 C/CHC: N. ATRÉV - Venezuela 19 - 77 e/ José María León y A. Pío Jaramillo Alvarado
 CENTRO: Miguel Rofrío 14 - 35 entre Bolívar y Sucre
 2565257 (Chc Centro) - 2585435 (Chc Matriz)

www.thecanadianhousecenter.com
 /CHCLoja