

Investigación Tecnológica para Evaluar las Posibilidades de Manejo de Relaveras

Abandonadas en Colombia Empleando Sistemas de Cobertura

Yuri Alejandra Sánchez Solano y Braian Ferney Corzo Vargas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Dr. Pedro Luis Delvasto Angarita

Codirector

Msc. Jhon Freddy Palacios

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mi madre Claudia Vargas quien siempre confió y acompañó en este camino, a mi padre Wilson Corzo quien se sentía orgulloso en cada pequeño paso y nunca dejó de creer en mí, a mi hermana Yully Corzo quien me acompañó en este recorrido desde el inicio motivándome a ser mejor y servir de cierta forma para su propia formación, a Alejandra Calderón quien me hizo ver errores y ayudó a corregirlos en mí mismo a nivel personal y profesional.

Braian Ferney Corzo Vargas.

A Dios por estar para mí. A las tres personas más importantes en mi vida: mi hija Noelia Muñoz Sánchez, mi madre Ludy Solano y mi pareja Jaime Muñoz, porque son mi mayor motivación, quienes me apoyaron, me dieron fuerzas, amor y compañía en este recorrido hacia un logro que también es de ellos por una y mil razones. Finalmente, y no menos importante, a la memoria de mi padre Libardo Sánchez, q.e.p.d. Sé que desde el cielo está orgulloso de mi.

Yuri Alejandra Sánchez Solano.

Agradecimientos

A nuestra querida UIS por ser nuestro segundo hogar, donde aprendimos a ser excelentes profesionales y personas, con un amplio sentido crítico, ético y cultural.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales: directivos, docentes, técnicos, personal de aseo, compañeros y amigos, por ser una gran familia, en la cual conocimos personas maravillosas que nos enseñaron mucho más que lo de la academia.

A nuestro director, el Dr Pedro Delvasto, por compartirnos sus conocimientos, experiencias y ser el mejor guía en el desarrollo de la presente investigación.

A nuestro Codirector, Msc Jhon Palacios, por tener confianza en nuestro proyecto y transmitirnos información clave en la elaboración de la presente investigación.

A la Ingeniera Civil Erica y al Topógrafo Yesid, por ayudarnos en el manejo del software AutoCAD.

Yuri Alejandra Sánchez Solano, Braian Ferney Corzo Vargas.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Cuerpo Del Trabajo.....	14
2.1 Marco Referencial.....	14
2.2 Metodología	17
2.2.1 Descripción De La Metodología.....	18
2.2.1.1 Revisión De Información Bibliográfica.....	18
2.2.1.2 Definición Y Planteamiento Del Problema.....	18
2.2.1.3 Etapa De Selección De Las Relaveras	18
2.2.1.4 Etapa De Identificación De Los Sistemas.....	18
2.2.1.5 Etapa De Diseño De Los Canales De Drenaje.....	18
2.2.1.6 Etapa De Selección De Las Coberturas	18
2.2.1.7 Etapa De Diseño Del Sistema De Coberturas.....	19
2.2.1.8 Redacción, Entrega Y Sustentación Del Trabajo Final	19
2.3 Identificación De Las Zonas Dispuestas Para Las Relaveras	19
2.3.1 Zona 1	19
2.3.1.1 Localización.....	19
2.3.1.2 Hidrología	20
2.3.1.3 Condiciones Climáticas	20
2.3.1.4 Geología.....	21

2.3.2 Zona 2	21
2.3.2.1 Localización.....	21
2.3.2.2 Hidrología	22
2.3.2.3 Condiciones Climáticas	22
2.3.2.4 Geología.....	22
2.4. Curvas De Nivel Y Flujos De Agua	22
2.5 Diseño De Los Canales De Drenaje.....	23
2.5.1 Zona 1	23
2.5.2 Zona 2	27
2.6 Modelos De Coberturas	30
2.6.1 Cobertura Tipo A	30
2.6.2 Cobertura Tipo B	30
2.6.3 Cobertura Tipo C	30
2.7 Criterios De Selección De Las Coberturas Planteadas	31
2.7.1 Durabilidad	31
2.7.1.1 Modelo De Cobertura A.....	31
2.7.1.2 Modelo De Cobertura B.....	31
2.7.1.3 Modelo De Cobertura C.....	31
2.7.2 Logística.....	32
2.7.2.1 Modelo De Cobertura A.....	32
2.7.2.2 Modelo De Cobertura B.....	32
2.7.2.3 Modelo De Cobertura C.....	33
2.7.3 Costos.....	33
2.7.3.1 Modelo De Cobertura A.....	33
2.7.3.2 Modelo De Cobertura B.....	35

2.7.3.3 Modelo De Cobertura C.....	36
2.7.4 Tipo De Tratamiento.....	37
2.7.5 Número De Etapas Constructivas	37
2.7.5.1 Modelo De Cobertura A.....	38
2.7.5.2 Modelo De Cobertura B.....	38
2.7.5.3 Modelo De Cobertura C.....	39
2.7.6 Eficiencia En La Disminución Del Drenaje Y Calidad Del Mismo	39
2.7.6.1 Modelo De Cobertura A.....	39
2.7.6.2 Modelo De Cobertura B.....	39
2.7.6.3 Modelo De Cobertura C.....	40
2.8 Calificación De Los Criterios De Evaluación.....	40
2.8.1 Durabilidad	40
2.8.2 Logística.....	40
2.8.3 Costos.....	42
2.8.4 Tipo De Tratamiento.....	43
2.8.5 Número De Etapas Constructivas	43
2.8.6 Eficiencia En La Disminución Del Drenaje Y Calidad Del Mismo	43
2.9 Resultados	44
2.10 Diseños De Los Modelos De Cobertura Seleccionados	44
2.10.1 Zona 1	44
2.10.2 Zona 2	45
3. Conclusiones.....	46
Referencias Bibliográficas	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Factores de suelo según su textura.....	25
Tabla 2 Factor del grado de inclinación del área que provee agua a las zonas.....	26
Tabla 3 Costos de material y operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura A en la zona 1	34
Tabla 4 Costos de material y operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura A en la zona 2	34
Tabla 5 Costos de material y operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura B en la zona 1.....	35
Tabla 6 Costo de material y operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura B en la zona 2	35
Tabla 7 Costos de material y operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura C en la zona 1.....	36
Tabla 8 Costos de material y operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura C en la zona 2.....	37
Tabla 9 Calificación de la durabilidad de los modelos de cobertura	40
Tabla 10 Calificación de la logística de los modelos de cobertura.....	41
Tabla 11 Calificación de los costos de los modelos de cobertura para la zona 1	41
Tabla 12 Calificación de los costos de los modelos de cobertura para la zona 2	42
Tabla 13 Calificación del tipo de tratamiento de los modelos de cobertura.....	42
Tabla 14 Calificación del número de etapas constructivas de los modelos de cobertura	43
Tabla 15 Calificación de la eficiencia en la disminución y calidad del drenaje de los modelos de cobertura.....	43
Tabla 16 Resultados de calificación según cada criterio de selección.....	44

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Esquema general de la metodología para la evaluación de las posibilidades de manejo de relaveras abandonadas en Colombia empleando sistemas de cobertura	17
Figura 2 Entorno y limitación de la zona 1	19
Figura 3 Entorno y limitación de la zona 2	21
Figura 4 Curvas de nivel de la zona 1	22
Figura 5 Curvas de nivel de la zona 2	23
Figura 6 Delimitación de las áreas que proveen de agua la zona, bosquejo de los canales de drenaje y dimensionamiento de los canales y la zona 1	24
Figura 7 Diseño de los canales de drenaje de la zona 1	27
Figura 8 Delimitación de las áreas que proveen de agua la zona, bosquejo de los canales de drenaje y dimensionamiento de los canales y la zona 2	27
Figura 9 Diseño de los canales de drenaje de la zona 2	29
Figura 10 Diseño del modelo de cobertura para la zona 1	45
Figura 11 Diseño del modelo de cobertura para la zona 2	46

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice 01 Esquema ilustrado del modelo de cobertura A	51
Apéndice 02 Esquema ilustrado del modelo de cobertura B	51
Apéndice 03 Esquema ilustrado del modelo de cobertura C	52
Apéndice 04 Lista de materiales y sus respectivos proveedores	53
Apéndice 05 Plano del diseño de los canales para la zona 1	54
Apéndice 06 Plano del diseño de los canales para la zona 2	55
Apéndice 07 Plano del diseño de cobertura para la zona 1 y 2.....	56

Resumen

Título: Investigación Tecnológica para Evaluar las Posibilidades de Manejo de Relaveras Abandonadas en Colombia Empleando Sistemas de Cobertura*

Autor: Yuri Alejandra Sánchez Solano**, Braian Ferney Corzo Vargas**

Palabras Clave: Pasivos ambientales, Relaves, Drenaje ácido, Cierre de mina, Coberturas, CAD.

Descripción: La afectación a las regiones mineras producto de la contaminación de las aguas por los drenajes ácidos provenientes de relaves, que son dispuestos en terrenos álgidos y posteriormente abandonados en los cierres de mina inconclusos, es uno de los principales problemas que han puesto a la actividad minera en una encrucijada. Uno de los avances tecnológicos que se ha venido estudiando para dar solución a dicho problema, es la implementación de sistemas de coberturas que puedan lograr aislar los residuos de las aguas lluvias y/o afluentes cercanos o en su defecto contrarrestar las reacciones acidificantes. En el presente proyecto, se seleccionaron dos relaveras abandonadas en Colombia, a las cuales se les realizó el correspondiente estudio del suelo y de los flujos de agua mediante las curvas de nivel de cada zona, lo cual permitió la elaboración de canales de drenaje en el software AutoCAD®3D v2020. Luego, se procedió a plantear tres modelos de cobertura con diferentes principios de protección: El modelo A con el uso de un geo-compuesto de drenaje, el modelo B a base de diferentes tipos de materiales sólidos y granulados y el modelo C con la mezcla en igual proporción de los mismos relaves con una enmienda organomineral. A continuación, se les realizó una evaluación basada en criterios de selección como: durabilidad, logística, costos, tipo de tratamiento, número de etapas y eficiencia. En los resultados se mostró que, el modelo C obtuvo una puntuación promedio de 4.42/5 para las dos zonas, el modelo B: 3.85 y 3.82 para la zona 1 y 2 respectivamente y el modelo A: 3.42 y 3.37 para la zona 1 y 2 respectivamente, por lo cual, se asignó el modelo C como el más apropiado. Finalmente, se realizó el diseño de la cobertura seleccionada para cada zona en el software AutoCAD®2D v2019.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor en Ciencias y Tecnología de Materiales. Codirector: Jhon Freddy Palacios.

Abstract

Title: Technological Research to Evaluate Abandoned Tailings Management Possibilities in Colombia Using Coverage Systems*

Author: Yuri Alejandra Sánchez Solano, Braian Ferney Corzo Vargas.¹

Key Words: Environmental passives, Tailings, Acid drainage, Mine closure, Coverage, CAD.

Description: The impact on the mining regions as a result of the contamination of the waters by acidic drainage from tailings, that are disposed of in difficult terrain and subsequently abandoned in the unfinished mine closures, is one of the main problems that have put the mining activity in a crossroads. One of the technological advances that has been studied to solve this problem is the implementation of coverage systems that can isolate waste from rainwater and / or nearby tributaries or, failing that, counteract acidifying reactions. In this project, two abandoned tailings dams were selected in Colombia, to which the corresponding study of the soil and water flows was carried out through the contour lines of each zone, which allowed the elaboration of drainage channels in the AutoCAD@3D v2020 software. Then, we proceeded to propose three coverage models with different protection principles: Model A with the use of a drainage geo-composite, model B based on different types of solid and granular materials and model C with the mixture in equal proportion of the same tailings with an organomineral amendment. Next, an evaluation was made based on selection criteria such as: durability, logistics, costs, type of treatment, number of stages and efficiency. The results showed that model C obtained an average score of 4.42 / 5 for the two zones, model B: 3.85 and 3.82 for zone 1 and 2 respectively and model A: 3.42 and 3.37 for zone 1 and 2 respectively, therefore, model C was assigned as the most appropriate. Finally, the design of the selected coverage for each zone was carried out in AutoCAD@2D v2019 software.

* Degree Work

¹ Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD in Materials Science and Technology. Co-director: Jhon Freddy Palacios.

Introducción

A través del tiempo la humanidad ha evolucionado y en gran medida dicha evolución se ha relacionado directamente con el tipo de materiales que se ha usado o fabricado en determinada época, en la actualidad se cuenta básicamente con todas las materias primas que provee el planeta. No obstante, la búsqueda de nuevos materiales para continuar en desarrollo se hace indispensable, es por ello, que la minería además de ser un tema polémico en muchos aspectos sigue siendo una actividad necesaria. Sin embargo, no se puede ignorar que en la industria minera a nivel internacional se presentan muchos problemas relacionados con el impacto ambiental, debido a que, la extracción de minerales genera cambios importantes en los diferentes ecosistemas. Dentro de estos efectos causados por la minería se encuentran los “pasivos ambientales”, que son aquellos daños no saldados que siguen generando impacto después de realizada la acción minera y muchos de ellos durante décadas.

Para el caso de Colombia, donde mayormente predomina la minería ilegal y la que es legal no ha alcanzado un considerable ejercicio, las principales limitantes que se tienen son la falta de presencia estatal en el abandono posterior a un cierre de mina en los proyectos y el retraso en la identificación, inventario y caracterización de las minas abandonadas, las cuales representan una de las causas más influenciadas sobre la salud humana y la preservación de los ecosistemas. A causa de la mencionada problemática, se ha establecido la implementación de sistemas de coberturas que dan solución al manejo de residuos mineros, las cuales se clasifican en activas y pasivas. Estas consisten en eliminar o reducir las aguas ácidas producidas por el contacto entre la lluvia y los relaves, las cuales causan un daño irreparable, debido a que, son recirculadas a los yacimientos tanto subterráneos como superficiales, afectando las especies acuáticas, los cultivos, el ganado y por ende las comunidades aledañas al lugar de depósito de los residuos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar mediante una investigación tecnológica dos posibles sistemas de cobertura aplicables para cada uno de los dos casos seleccionados en Colombia de relaveras abandonadas, con el fin de prevenir drenajes ácidos.

1.2 Objetivos Específicos

Levantar información en bases de datos disponibles acerca de la composición y características del terreno de algunos pasivos ambientales abandonados en Colombia, que tengan posibilidades de ser gestionados a través de sistemas de cobertura.

Seleccionar dos pasivos ambientales específicos (relaveras) y establecer un criterio cuantitativo, para determinar los tipos de coberturas más apropiadas para cada uno de los sistemas.

Establecer el diseño de los sistemas de coberturas y la selección de materiales constructivos, teniendo en cuenta las condiciones pluviométricas de la zona y el posible flujo de agua que tendrían los sistemas.

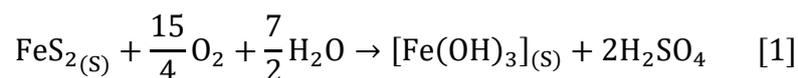
2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

Las principales fuentes de generación de drenaje ácido son: labores subterráneas, acopios de estériles o minerales económicos, rajos abiertos, pilas de lixiviación, vertientes naturales y depósitos de relaves (Oyarzún, 2008).

Este documento se centra en el manejo de los relaves específicamente, los cuales hacen referencia a un conjunto de desechos de procesos mineros; normalmente estos están compuestos por una mezcla de minerales de ganga y agua, en el caso de Colombia, los depósitos a tratar corresponden en gran cantidad a Pirita (FeS_2), este es el principal mineral responsable de la generación de ácido sulfúrico tanto de minas como de yacimientos no explotados, la presencia de pirita no ocurre solamente en las minas de oro de manera abundante, sino, también en los yacimientos de carbón, donde normalmente es formado por reducción de sulfuros en el mismo ambiente.

La potencial presencia de oxígeno y agua en estos depósitos generan una reacción química muy importante y es la que se debe evitar. Descrita en la reacción [1]:



Este ácido sulfúrico generado por la interacción del oxígeno y el agua es un grave problema para los ecosistemas y los cuerpos hídricos presentes, llegando a afectar a comunidades o ciudades enteras. La presencia de este ácido en el agua como es de esperarse altera su pH impidiendo que este fluido gane minerales y otros componentes fundamentales para los seres vivos, creando suelos infértiles y destrucción de cuerpos pluviales. Además de la generación de ácido, también la lixiviación de estos minerales depositados aumenta el contenido de metales pesados en el agua.

El tratamiento empleado para este problema de deposiciones de relaves, generalmente se centra específicamente en evitar la presencia de agua y oxígeno en los minerales sulfurosos depositados, pues en tal caso, si no hay presencia de estos no ocurriría la reacción química [1] y, por lo tanto, no se generaría la contaminación de estos cuerpos pluviales, ecosistemas y campos fértiles.

Los recubrimientos empleados para evitar el contacto de agua con dichos minerales, van desde procesos simples, como crear una barrera sobre los depósitos con otros desechos oxidados, estériles o material nativo, hasta complejos recubrimientos de múltiples barreras con características específicas, con el fin de lograr dicho objetivo y evitar la creación de ácido. Cabe mencionar que, estas barreras buscan proteger la filtración de agua hacia los depósitos (ITGME, 1989).

Se estima que este problema puede ser remediado en gran medida depositando los relaves tan secos como sea posible. En términos de predicción, la generación de drenaje ácido debe considerar tres aspectos principales a saber: Predicción del potencial químico de generación de drenaje ácido, evaluación del potencial hidrogeológico para el acceso y conducción de las soluciones y predicción del contenido metálico del drenaje ácido y del efecto de su posterior neutralización.

Para el primer punto tenemos test específicos de laboratorio, que traten el potencial de generación de acidez con la capacidad de neutralización de las rocas y los minerales presentes en la ganga. Estos se pueden clasificar tanto en estáticos como en dinámicos, los estáticos son más sencillos, rápidos y fáciles de interpretar, pero sus resultados son menos confiables comparados con los de tipo dinámico.

Desde luego, la riqueza en pirita de la roca y de la mena será un criterio de mayor potencial de drenaje ácido, mientras la presencia de calcita favorecerá su neutralización (Oyarzún, 2003).

Con respecto a la hidrológica e hidrogeológica, factores como el clima (precipitaciones, temperaturas), la topografía (que influye en el gradiente hidráulico) y el grado de fracturación del macizo rocoso, son los principales factores a considerar. El volumen de precipitaciones juega al respecto un rol complejo. Si es muy escaso, el fenómeno tendrá poca extensión y si es demasiado abundante, se favorecerá la dilución del drenaje ácido generado. En consecuencia, la situación intermedia presenta los mayores riesgos.

Finalmente, el contenido de metales en el drenaje ácido depende directamente de la mineralogía de la mena y de la química de los metales pesados que estén presentes, por ejemplo, el sulfato de plomo es insoluble o bajamente soluble en ácido, en cambio metales como zinc, cadmio, cobre, entre otros, son solubles en soluciones ácidas (Guevara et al., 2006).

Aplicaciones científicas desarrolladas en los últimos años

En la región de Abitibi, ciudad de Quebec, Canadá; se realizaron simulaciones con modelos numéricos construidos con Vadose / W y MIN3P para la implementación de sistemas de cobertura en dos tipos de relaves sulfurados pre-oxidados con condiciones físicas diferentes. Los resultados mostraron que no es posible considerar cubiertas pensadas para relaves no oxidados en los ya pre-oxidados, además, se observó que la eficiencia de una monocapa depende de factores físicos propios de los relaves como: posición de la capa freática, química del agua intersticial, propiedades hidrogeológicas y espesor de materiales, se observó que una cubierta bicapa (ruptura capilar sobre los relaves) no mejora en gran proporción el problema, debido a, las pérdidas de agua por evaporación. Finalmente, se mostró que una cubierta de tres capas con efectos de barrera capilar sería más eficiente incluso en relaves altamente oxidados (Pabst et al., 2018).

Por otro lado, otro estudio tuvo como objetivo investigar el papel de las enmiendas organominerales y las rizobacterias (PGPR) sobre la mejora de las propiedades de los relaves mineros y el crecimiento de *Lolium perenne L.* (raigrás). Las plantas se cultivaron en relaves

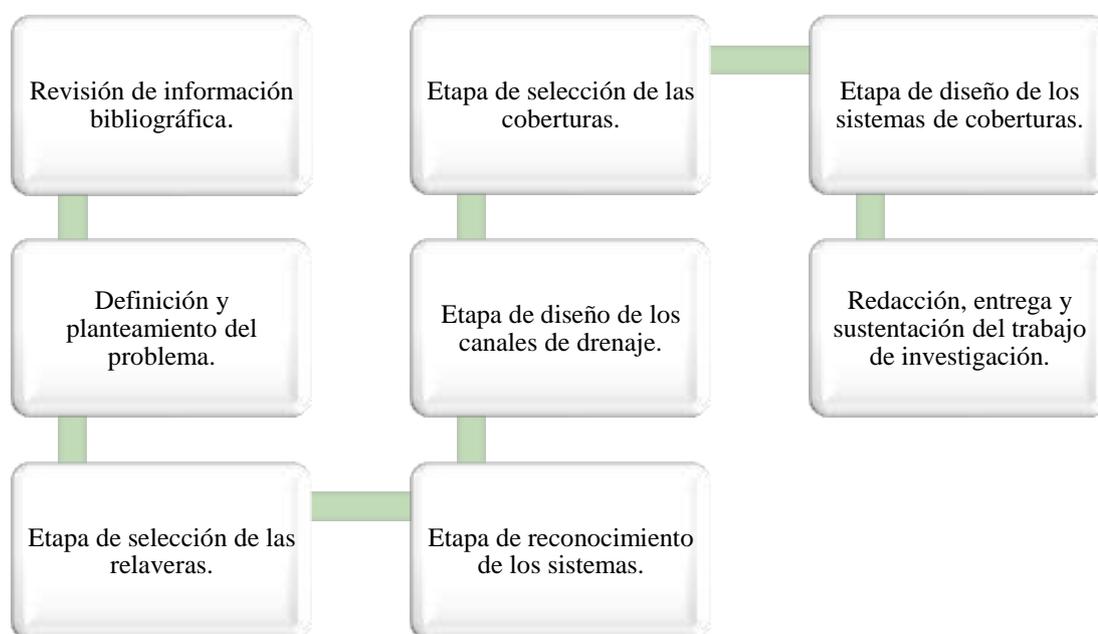
de minas mezcladas con suelo agrícola (1: 1), 10% de compost y se suministraron con dos enmiendas inorgánicas diferentes, fosfato de roca (6%) o cal (3%), e inoculadas con cepas zobacterianas *Advenella kashmirensis* BKM20 (B1) y *Mesorhizobium tamadayense* BKM04 (B2). Los resultados mostraron que se mejoraron las características de los relaves, lo que fomentó el crecimiento y mayor fertilidad del suelo y la actividad microbiana (Benidire et al., 2021).

2.2 Metodología

Los métodos ejecutados para la planeación del diseño de los sistemas de coberturas para los dos tipos de relaveras abandonadas en Colombia, se plantean por medio de diferentes etapas, como se observa en la figura 1.

Figura 1

Esquema general de la metodología para la evaluación de las posibilidades de manejo de relaveras abandonadas en Colombia empleando sistemas de cobertura.



Fuente: Los autores

2.2.1 Descripción de la metodología

2.2.1.1 Revisión de información bibliográfica: Se realizó una revisión de la bibliografía correspondiente a los temas necesarios para el desarrollo del proyecto. Se seleccionaron como primera instancia libros y artículos científicos relacionados con: fenómenos físicos y químicos involucrados en los depósitos abandonados de relaveras, simulaciones de sistemas de cobertura para minerales sulfurados, entre otros.

2.2.1.2 Definición y planteamiento del problema: Se definieron las necesidades que se presentan en la actualidad referentes al tema de contaminación producto del drenaje ácido que generan las relaveras abandonadas en Colombia.

2.2.1.3 Etapa de selección de las relaveras: Se seleccionaron dos tipos de relaveras abandonadas en Colombia. Los parámetros para la elección consistieron en la relación suelo y atmósfera, de preferencia que las dos relaveras se encontraran ubicadas en suelos con condiciones climáticas diferentes.

2.2.1.4 Etapa de identificación de los sistemas: Se realizó un análisis del entorno, teniendo en cuenta la ubicación, la hidrología, las condiciones climáticas y la geología de las zonas. Con base en ello, también se consideró la comprensión de los flujos de agua por medio de la construcción de curvas de nivel en las zonas previamente delimitadas.

2.2.1.5 Etapa de diseño de los canales de drenaje: Se abordó el estudio de las relaciones matemáticas por las cuales se calculó el caudal y el dimensionamiento de los canales que desviarían el agua del natural recorrido hacia las relaveras generadoras del drenaje ácido. Para de esta manera, realizar los diseños en el software AutoCAD® 3D civil v2020.

2.2.1.6 Etapa de selección de las coberturas: Se evaluó con base en determinados criterios de selección la factibilidad de los recubrimientos en cada una de las zonas, con el propósito de elegir para cada caso el modelo que aportó mayores beneficios.

2.2.1.7 Etapa de diseño del sistema de coberturas: Se efectuaron los cálculos correspondientes para determinar la cantidad de recursos necesarios en la elaboración de las coberturas, para finalmente, realizar sus diseños en el software AutoCAD® 2D v2019.

2.2.1.8 Redacción, entrega y sustentación del trabajo final: Se realizó la elaboración del informe final, en el cual se incluyó el desarrollo completo de las etapas anteriormente mencionadas, éste se socializó y corrigió por el director del proyecto, para finalmente ser entregado, sustentado y evaluado por las directivas correspondientes.

2.3 Identificación de las zonas dispuestas para las relaveras

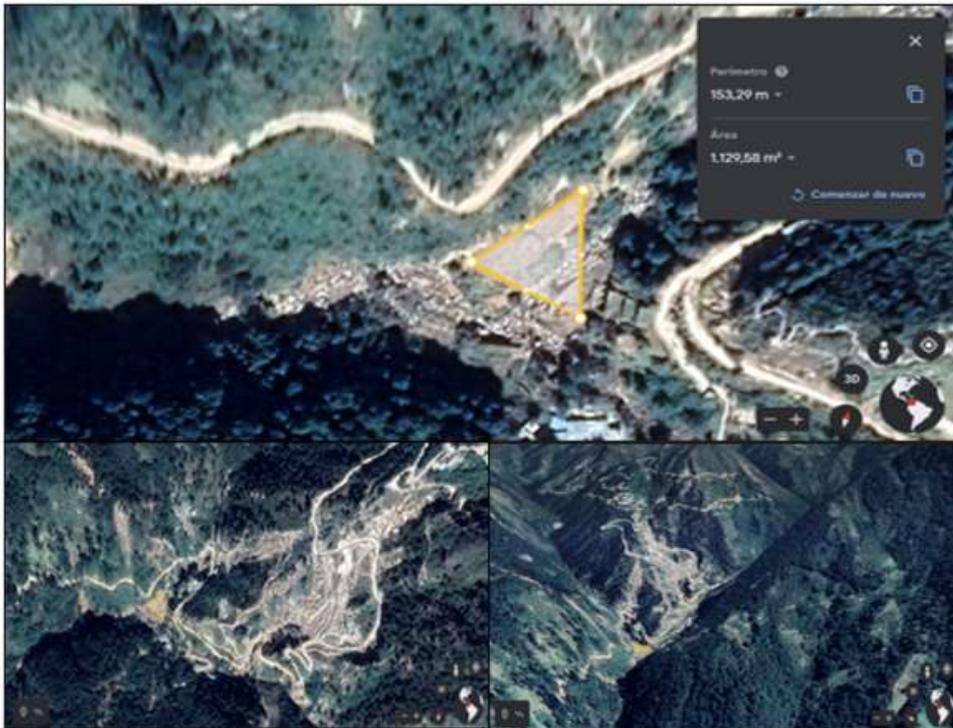
Se seleccionaron dos relaveras dispuestas en zonas con comportamientos climatológicos y altitudinales diferentes, esto con el fin de dar mayor alcance a la investigación.

2.3.1 Zona 1

2.3.1.1 Localización: Las minas del departamento de Santander son parte de la identidad y sustento de las comunidades de allí, porque constituye una de las zonas más ricas, por lo general, en oro. Los relaves en estudio, se encuentran en una mina entre los municipios de Vetás y California (Guerrero, 2018). En la figura 2, se observan imágenes obtenidas mediante la aplicación Google Earth®, en las cuales, se puede ver la limitación de la zona por un triángulo de color amarillo, la cual posee un perímetro de 153.29m y un área de 1129.58m². También, se observa el entorno en distintos ángulos para una mejor visualización de las áreas boscosas y construidas. Además de las inclinaciones incidentes a la zona de interés, donde se evidencia que ésta hace parte de los límites de tres montañas, cada una con diferente pendiente.

Figura 2

Entorno y limitación de la zona 1



Fuente: Imágenes tomadas de Google Earth®, marcación del triángulo amarillo de los autores

2.3.1.2 Hidrología: La mina se encuentra localizada en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, zona hidrográfica Medio Magdalena y subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Además, en proximidad a la mina se encuentra la subcuenca del río Suratá y las microcuencas del río vetas y la quebrada la baja, esta última donde desembocan las siguientes quebradas: Angostura, Páez, San Andrés, Barrientos, San Juan, Aserradero y las Ánimas (Guerrero, 2018).

2.3.1.3 Condiciones Climáticas: El sector de la mina se caracteriza por tener un clima frío con una temperatura de 12°C, debido a que se ubica a una altura aproximada de 2800m sobre el nivel del mar. Posee dos tiempos húmedos: De marzo a mayo y desde septiembre a noviembre, además de dos secos: desde el mes de junio a agosto y de diciembre a febrero con precipitaciones anuales hasta de 1500mm (Guerrero, 2018).

2.3.1.4 Geología: Rocas sedimentarias, cuarcita, gneis rico en cuarzo deriva de meta-arenitas, feldespato y mica detríticos (Guerrero, 2018).

2.3.2 Zona 2

2.3.2.1 Localización: Gran parte de la minería irregular presente en Colombia se les atribuye a grupos al margen de la ley, en este caso, el sector minero de la serranía de San Lucas fue localizado y allanado en el año 2016 por el ejército nacional en inmediaciones del río Tigüi (El tiempo, 2016). En la figura 3, se observa imágenes obtenidas mediante la aplicación Google Earth®, en las cuales, se puede ver la limitación de la zona de color amarillo, la cual posee un perímetro de 411.15m y un área de $9787.86m^2$. También, se puede observar que la distancia entre el río y la zona de color amarillo es de 318.87m, adicionalmente, estos dos sitios se encuentran a una diferencia de 8m de altura.

Figura 3

Entorno y limitación de la zona 2



Fuente: Imágenes tomadas de Google Earth®, marcación del polígono amarillo de los autores

2.3.2.2 Hidrología: La mina se encuentra localizada a inmediaciones del río Tigüi, el cual es afluente y hace parte de la cuenca del río Nechí en la zona hidrográfica magdalena-cauca según el IDEAM, el ente encargado de proveer la información correspondiente es Corantioquia (García, 2005).

2.3.2.3 Condiciones Climáticas: Esta zona cuenta con unas temperaturas medias de 30°C y precipitaciones promedias de 3.535 mm/año, lo que corresponde, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, al bosque húmedo tropical (bh-T) (Franco & Gonzalez, 2010).

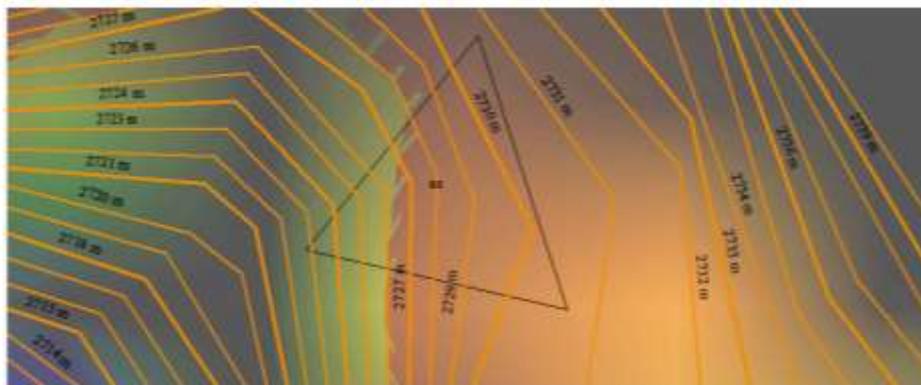
2.3.2.4 Geología: Se encuentra conformado mayormente por Pensl Neises de cuarzo feldespático de San Lucas. Además, la geomorfología se compone de: SE12-ACcbta, E4-IPvc1, SE10-Accbse (García, 2005).

2.4. Curvas de nivel y flujos de agua

Las curvas de nivel de las zonas se obtuvieron mediante la aplicación Global Mapper® v22.1, lo cual, permitió entender cómo se comportaban los flujos de agua provenientes de las precipitaciones de las zonas, esto con el fin de diseñar un sistema de canales que drenara el agua con base en las diferentes inclinaciones. En las figuras 4 y 5 se observan las curvas de nivel de la zona 1 y zona 2 respectivamente.

Figura 4

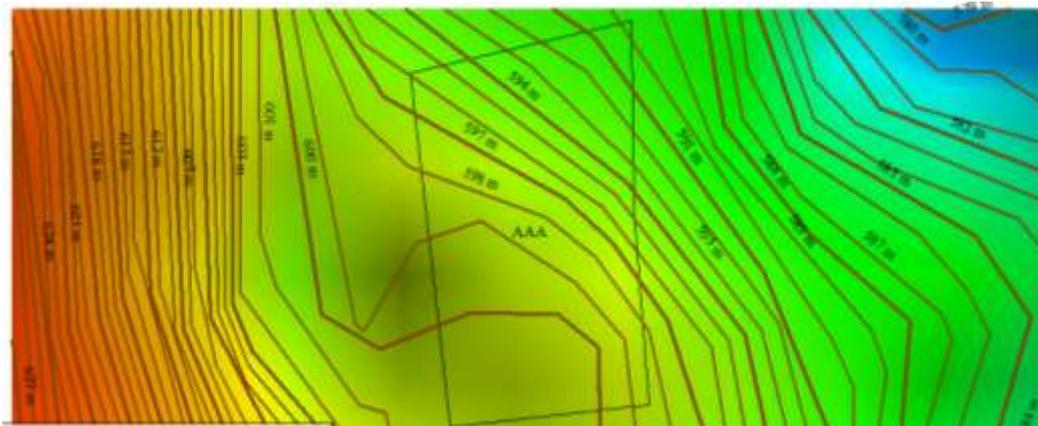
Curvas de nivel de la zona 1



Nota: En la imagen se dibujan las curvas de nivel con 1m de diferencia entre estas, la altura de la zona aumenta de izquierda a derecha. *Fuente: Imagen tomada de Global Mapper®, elaborada por los autores*

Figura 5

Curvas de nivel de la zona 2



Nota: En la imagen se dibujan las curvas de nivel con 1m de diferencia entre estas, la altura de la zona aumenta de derecha a izquierda. *Fuente: Imagen tomada de Global Mapper®, elaborada por los autores*

2.5 Diseño de los canales de drenaje

Para el diseño de los canales de drenaje se hizo un bosquejo en la aplicación Google Earth® (figuras 6 y 8), con el propósito de estimar las áreas que con predominancia podrían afectar por escorrentía las zonas de los relaves y, además, determinar las longitudes reales que tendrían los canales que desviarían las aguas provenientes de dichas áreas. Para con base en ello, realizar el diseño en el software AutoCAD® 3D civil v.2020.

A continuación, se muestra los procedimientos para el cálculo de las dimensiones de los canales para las dos distintas zonas.

2.5.1 Zona 1:

Figura 6

Delimitación de las áreas que provee de agua a la zona, bosquejo de los canales de drenaje y dimensionamiento de los canales y la zona 1



Nota: A1 y A2 suman 0.03639 km^2 , son las áreas que afectan con la mayor cantidad de agua por escorrentía a la zona 1, los canales L1 y L2 tienen de longitud 45m y 82m respectivamente. L3, L4 y L5 que representan las longitudes de los lados de la zona 1 miden: 54m, 50.5m y 51.75 respectivamente.

Fuente: Imagen tomada de Google Earth®, marcaciones color amarillo y rojo de los autores

Para el cálculo del caudal que alimenta los canales, se tiene en cuenta que la precipitación máxima anual de la zona 1 es de 1500mm y que ésta según el IDEAM se distribuye en mínimo 100 días, para lo cual, se supone que el día que más llovió, lo hizo todo el día (Franco & Gonzalez, 2010). Sin embargo, a razón de incertidumbre, se considera un factor de seguridad de 4. Adicionalmente, se considera el factor del suelo, el cual depende de si el suelo es arenoso, limoso o arcilloso. Para este caso, corresponde a un suelo arenoso de bosque montañoso con un factor de 0.30 según la tabla 1 (Barrero & Beltrán, 2018).

Tabla 1*Factores de suelo según su textura*

Vegetación Y Topografía	Textura Del Suelo		
	Franco Arenoso	Franco Limo Arcilloso	Arcilloso
Bosques			
Plano	0.1	0.3	0.4
Ondulado	0.25	0.35	0.5
Montañoso	0.3	0.5	0.6
Pastos			
Plano	0.1	0.3	0.4
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Montañoso	0.22	0.42	0.6
Tierras Cultivadas			
Plano	0.3	0.5	0.6
Ondulado	0.4	0.6	0.7
Montañoso	0.52	0.72	0.82

Nota: Plano (pendiente 0-5%); Ondulado (pendiente 5-10%); Montañoso (pendiente 10-30%). Para valores mayores al 30%, a falta de datos, utilizar los valores para pendientes entre el 10 y el 30%

Fuente: Tomada de Barrero, A, y Beltrán, D. (2018)

Con base en lo anteriormente dicho, se calcula el caudal de la zona 1 mediante la ecuación [2].

$$Q(\text{caudal}) = \frac{\text{Factorsuelo} * \text{precipitación} * (A)}{3.6} \quad [2]$$

$$\text{Precipitación} \frac{(\text{mm})}{h} = \left(\frac{1500}{100} \right) * 4 = 60 \quad [3]$$

$$Q(\text{caudal}) = \frac{0.30 * 60 * 0.03639}{3.6} = 0.1819 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad [4]$$

Hallado el caudal, por la facilidad en la construcción, se escogen canales rectangulares de base (b) y altura (y). Estas dimensiones dependen del caudal, la rugosidad (n) de los canales

según su tipo, para este caso es 0.030 porque corresponde a canales naturales, rectos y sin vegetación como se observa en la tabla 2. Además, el factor (s) que establece el grado de inclinación del área de suministro de agua, el cual se manifiesta en el gradiente de la sección longitudinal de cada uno de los canales, para este caso es de 12% (Sánchez, 2000).

Tabla 2

Factor del grado de inclinación del área que provee agua a las zonas

Tipo de Canaleta	Coefficiente de rugosidad
Revestida con cemento (hormigón), terminación fina	0.015
Revestida con cemento (hormigón), terminación gruesa	0.013
Suelo excavado, recto, sección uniforme, sin vegetación	0.022
Suelo excavado, recto, sección uniforme, laterales cubiertos con césped	0.03
Suelo excavado, en curva o irregular, sección no uniforme, con arena o piedra en el fondo	0.03
Canal natural, recto, sin vegetación	0.03
Canal natural, en curva o irregular, sin vegetación	0.035
Canal natural, en curva o irregular, con vegetación	0.1

Fuente: Tomada de Sánchez, L. (2000).

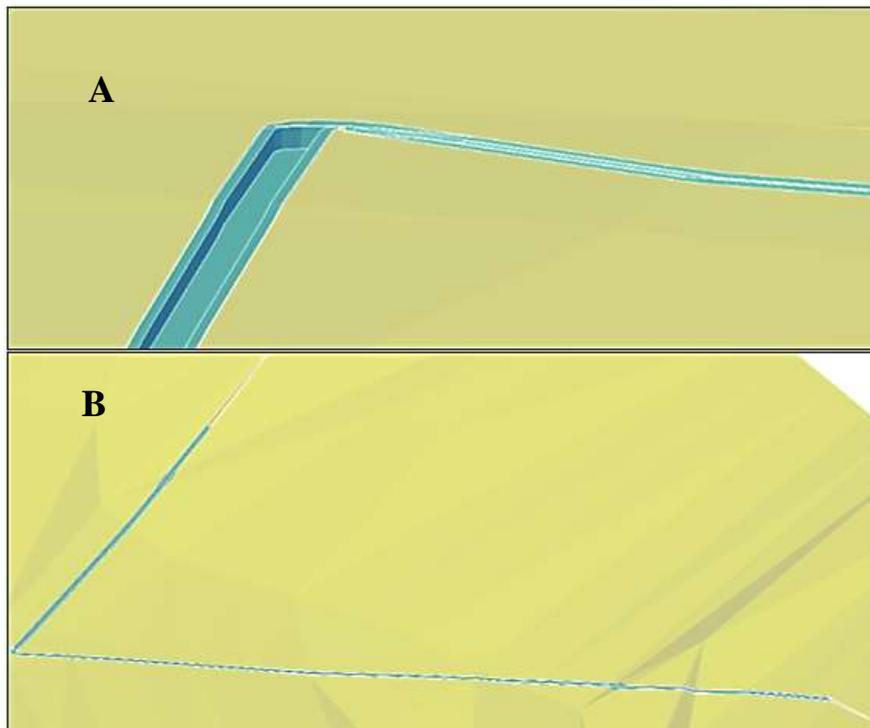
Para el dimensionamiento se tiene en cuenta la ecuación [5], que relaciona todas las propiedades explicadas en el párrafo anterior, donde A es la suma entre A1 y A2. Además, se consideran las relaciones descritas en las ecuaciones [6],[7] y [8] (Helbix, 2019).

$$Q = \frac{A^{5/3} \sqrt{S}}{n * P^{3/2}} \quad [5]; \quad A = 2y^2 \quad [6]; \quad P = 4y \quad [7]; \quad P = b + 2y \quad [8]$$

Al realizar las operaciones, se obtiene que la altura (y) es de 0.1934m y la base o ancho (b) es de 0.3868m para los canales rectangulares de la zona 1. Por último, en la figura 7, se muestran los canales de la zona 1 a escala real. Ver plano en el anexo 05.

Figura 7

Diseño de los canales de drenaje de la zona 1



Nota: Los canales se elaboraron sobre las curvas de nivel de la zona 1 a escala de dimensiones reales. En la imagen 7A, se observa de manera explícita el canal con sus dimensiones y en la imagen 7B, se observa la vista noroeste del sistema de drenaje de agua lluvia. *Fuente: Imágenes tomadas de AutoCAD® 3D civil v2020, elaboradas por los autores*

2.5.2 Zona 2:

Figura 8

Delimitación de las áreas que provee de agua a la zona, bosquejo de los canales de drenaje y dimensionamiento de los canales y la zona 2



Nota: A3 y A4 suman 0.193406 km^2 , son las áreas que afectan con la mayor cantidad de agua por escorrentía a la zona 2, los canales L6, L7 Y L8 tienen de longitud 106m, 150m y 92m respectivamente. L9, L10, L11 y L12 que representan las longitudes de los lados de la zona 2 miden: 79.27m, 125.13m, 70.56m y 137m respectivamente. Fuente: Imagen tomada de Google Earth®, marcaciones color amarillo y rojo de los autores

Para el cálculo del caudal, del mismo modo que para la zona 1, se tiene en cuenta la ecuación [2] y las consideraciones de precipitación, salvo que en la zona 2, ésta posee un valor máximo anual de 4000mm distribuidos en 100 días según el IDEAM, con un factor de seguridad de 3 (Franco & Gonzalez, 2010). Adicional a eso, el factor del suelo para este caso es de 0.35, que según la tabla 1, corresponde a un suelo limo arcilloso de bosque ondulado característico de la zona 2 (Barrero & Beltrán, 2018).

Con base en lo anteriormente dicho, se calcula el caudal de la zona 2 mediante la ecuación [2].

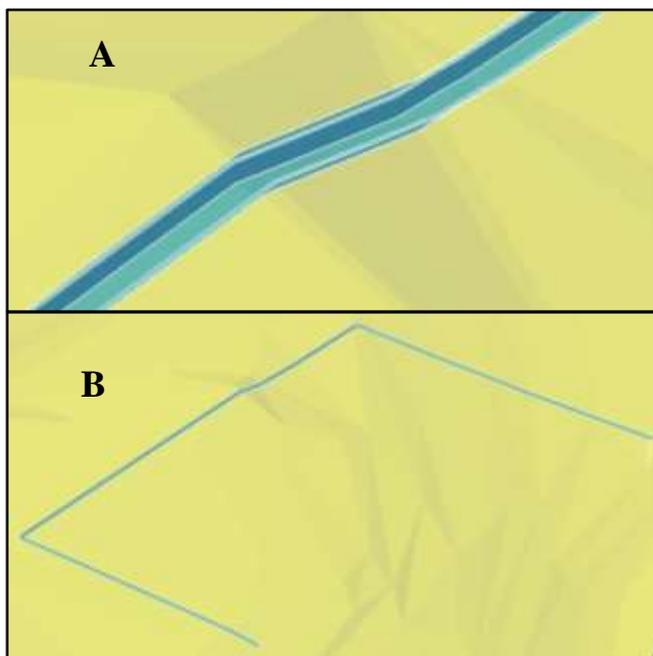
$$\text{Precipitación} \frac{(\text{mm})}{\text{h}} = \left(\frac{4000}{100} \right) * 3 = 120 \quad [9] \quad Q = \frac{0.35 * 120 * 0.193406}{3.6} = 2.256 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad [10]$$

Así mismo como se operó para la zona 1, se escogen canales rectangulares con la misma geometría y rugosidad: altura (y), base (b) y (n) igual a 0.030. Para el caso del gradiente (s) de la sección longitudinal de los canales, se establece el más crítico con un porcentaje de 4% (Sánchez, 2000).

A continuación, para el dimensionamiento, se aplican de igual forma las ecuaciones [5] (donde A es A3 mas A4) junto con las relaciones [6],[7] y [8] y al realizar las operaciones, se obtiene que la altura (y) es de 0.6108m y la base o ancho (b) es de 1.2216m para los canales rectangulares de la zona 2 (Helbix, 2019). Finalmente, en la figura 9, se evidencia el diseño de los canales de la zona 2. Ver plano en el anexo 06.

Figura 9

Diseño de los canales de drenaje de la zona 2



Nota: Los canales se llevaron a cabo sobre las curvas de nivel de la zona 2 a escala de dimensiones reales. En la imagen 9A, se puede visualizar el canal con claridad en dimensiones reales y en la imagen 9B, se

observa la vista sureste de los tres canales que componen el diseño. *Fuente: Imágenes extraídas de AutoCAD® 3D civil v2020, elaboradas por los autores*

2.6 Modelos de coberturas

2.6.1 Cobertura tipo A: Este tipo de cobertura mide de profundidad 0.73m, los cuales se dividen en 4 capas: la primera compuesta de gravilla de cuarzo de 0.05m de espesor, la segunda capa de 0.40m de grosor compuesta de material estéril producto de la mina, la tercera capa compuesta de GCL con 0.02m de profundidad y 0.01m de geo-compuesto de drenaje y la cuarta capa compuesta de un suelo orgánico que mide 0.25m de grosor, contando con una capa vegetal en su superficie (Huancaya & Carrasco, 2017). Ver anexo 01.

2.6.2 Cobertura tipo B: Este tipo de cobertura de 1m de profundidad consta de 4 capas: la primera capa está compuesta de gravilla de cuarzo y posee una profundidad de 0.05m, la segunda capa se compone de material estéril proveniente de la mina, cuya profundidad es de 0.40m, la tercera capa la componen residuos orgánicos (40% compost más 60% de lodo producto del tratamiento de aguas residuales) con una profundidad de 0.30m y la cuarta capa está compuesta de suelo orgánico con una profundidad de 0.25m, contando con una capa vegetal en su superficie (Huancaya & Carrasco, 2017). Ver anexo 02.

2.6.3 Cobertura tipo C: Este modelo de cobertura consiste en agregar suelo agrícola a los relaves de mina en una proporción 1:1, este suelo agrícola (enmienda) está compuesto por 10% de compost y 3% de cal y sobre esta cobertura se cultiva un tipo de raigrás denominado *Lolium Perenne*, el cual entre sus características cuenta con una raíz poco profunda y sin crecimiento secundario, otorgando la posibilidad de realizar una cobertura con pocos centímetros de profundidad (entre 20cm y 70cm), es por ello, que para la aplicación de este modelo de cobertura se estimara una profundidad de 50cm de cobertura (Benidire et al., 2021). Ver anexo 03.

2.7 Criterios de Selección de las coberturas planteadas

2.7.1 Durabilidad: En este criterio, se busca evaluar el tiempo de vida útil de cada uno de los modelos de cobertura, tomando como referencia una puntuación de 5 para el modelo más duradero.

2.7.1.1 Modelo de cobertura A

La particularidad de este modelo, es que incluye el uso de un geo-compuesto de drenaje, los cuales, en general, se caracterizan por ser resistentes y de larga duración (de 100 años en adelante) frente a fenómenos de degradación química y biológica. Sin embargo, es altamente susceptible a problemas mecánicos y a elevadas temperaturas (Díaz, 2016). En este caso, cada una de las zonas presenta diferentes condiciones que pueden afectar directamente la degradación de este tipo de cobertura, en la zona 1, se cuenta con alta actividad sísmica (Servicio Geológico Colombiano, 2020) y en la zona 2, se presenta una mayor pluviosidad (Franco & Gonzalez, 2010). Por último, la estabilidad mecánica de los relaves se ve directamente afectada por la cantidad de filtración que se manifiesta (López, y otros, 2006).

2.7.1.2 Modelo de cobertura B

Para este caso, los materiales usados no tienen problemas de degradación. Por ello, se hacen importantes los imprevistos estructurales que pueden causar fallas en el óptimo funcionamiento de este tipo de cobertura, por lo cual, se debe tener en cuenta las características propias de cada material, tales como: la porosidad, la cohesión y el comportamiento de estos frente a la infiltración, a la pluviosidad y a la actividad sísmica de la zona.

2.7.1.3 Modelo de cobertura C

Lo representativo en este modelo, es la influencia que ejerce la presencia del *Lolium Perenne*, debido a que, este aporta las propiedades antioxidantes y la estabilidad del suelo, por ello, la efectividad de la cobertura se ve directamente relacionada con la vida útil del raigrás

que se extiende hasta por 10 años (Restrepo & Escobar, 2007). La infiltración del agua, para este caso, afecta de manera importante la erosión de los relaves.

2.7.2 Logística: Este criterio hace referencia a la necesidad de personal especializado, la facilidad de acceso de los equipos necesarios para la disposición de las coberturas y la disponibilidad de los recursos en las zonas, calificándolos de la siguiente manera: el modelo más sencillo con una puntuación de 5 y el modelo más complejo con una puntuación de 1.

2.7.2.1 Modelo de cobertura A

Zona 1: Para la disposición de la cobertura en esta zona, se necesita personal operario de maquinaria amarilla, volquetas y personal especializado en la instalación del GCL y el geo-compuesto de drenaje. El acceso de la maquinaria y demás transportes al terreno es facilitado por vías terciarias con placa huella (Guerrero, 2018). En esta zona, se cuenta con la disponibilidad de suelo orgánico, material estéril de la mina y la capa vegetal nativa, haciendo necesario el transporte del geo-compuesto y la gravilla de cuarzo desde la ciudad más cercana.

Zona 2: Para elaborar este modelo de cobertura en esta zona, se requiere las mismas condiciones de personal y maquinaria descritas en la zona 1. El acceso a esta zona es mucho más complicado, debido a que, esta parte del país es controlado por grupos armados ilegales y el acceso vía terrestre es muy complejo. La disponibilidad de recursos necesarios se limita al suelo orgánico, material estéril y la capa vegetal nativa, haciendo necesario el transporte del geo-compuesto y la gravilla de cuarzo desde la ciudad más cercana.

2.7.2.2 Modelo de Cobertura B

Zona 1: En la disposición de este modelo de cobertura, en esta zona, es necesario personal operario de maquinaria amarilla y volquetas. El acceso por carretera de la maquinaria y el transporte de insumos como los lodos producto del tratamiento de aguas residuales (PTARD), el compost y la gravilla de cuarzo es a través de una vía terciaria con placa huella.

Esta zona cuenta con la disponibilidad de suelo orgánico, material estéril producto de la mina y la capa vegetal nativa.

Zona 2: En la elaboración de este modelo, en esta zona, es necesario el personal operario y la maquinaria descrita en la zona 1. Los accesos vía terrestre para esta zona como ya se mencionó en el apartado **2.7.2.1** son complicados. Por otro lado, es fácil encontrar suelo orgánico, material estéril de la mina y suelo vegetal nativo, dificultando de esta manera, la disponibilidad de gravilla de cuarzo, compost y lodos de PTARD.

2.7.2.3 Modelo de Cobertura C

Zona 1: Para la fabricación de este modelo en dicha zona, se necesita de personal operario de maquina amarilla y volquetas. El acceso es sencillo mediante una vía terciaria con placa huella. Se puede encontrar en la zona cal y suelo orgánico, necesitándose el transporte del compost y el raigrás desde la ciudad más cercana.

Zona 2: Para la realización del modelo en esta zona, se requiere personal operario de maquinaria amarilla y volquetas. El acceso como se ha mencionado anteriormente se ve dificultado por agentes externos. En la zona hay disponibilidad de cal, suelo orgánico y raigrás (CDPMM; IDEAM., 2006), obligándose el transporte de compost.

2.7.3 Costos: Este apartado se realiza con el objetivo de obtener aproximaciones al valor monetario necesario para llevar a cabo dichos modelos, tomando como referencia un valor de 5 para el modelo más económico. Los costos se estimaron a partir de sitios web de proveedores, los cuales, se encuentran en el anexo 04.

2.7.3.1 Modelo de cobertura A

Zona 1: Para estimar los costos que implican la aplicación de este modelo, en primer lugar, se debe tener en cuenta el área de la zona, la cual es 1129.58 m^2 . En la operación y

transporte de maquinaria, los costos se establecen por el volumen de los recursos manipulados, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Costos de material y Operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura A en la zona 1

	Cantidad	Precio Unitario	Valor
Gravilla de cuarzo	56.48m ³	\$55000	\$3088140
Geo-compuesto	1129.58 m ²	\$1300	\$1468454
Material estéril	451.83m ³	\$0	\$0
Suelo orgánico	282.4m ³	\$0	\$0
Volquetas <1km	734.23m ³	\$910	\$668151
Maquinaria amarilla	46 horas	\$180800	\$8316800
Volquetas > 1km	56.48m ³ *60km	\$910	\$3083800
		TOTAL	\$16625345

Fuente: Los autores

Zona 2: Para el caso de esta zona, el área es equivalente a 9787.86m². De la misma manera que para la zona 1, los costos dependerán de los recursos, el transporte y la maquinaria, como se observa en la tabla 4.

Tabla 4

Costos de material y Operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura A en la zona 2

	Cantidad	Precio Unitario	Valor
Gravilla de cuarzo	489.39m ³	\$55000	\$2691645
Geo-compuesto	9787.86 m ²	\$1300	\$1272421
Material estéril	3915.14m ³	\$0	\$0
Suelo orgánico	2446.96m ³	\$0	\$0
Volquetas <1km	6362.1m ³	\$910	\$5789511
Maquinaria amarilla	398 horas	\$180800	\$7195840
Volquetas > 1km	489.39m ³ *80km	\$910	\$3562759
		TOTAL	\$15301617

Fuente: Los autores

Cabe aclarar que, esta estructura de costos solo tuvo en cuenta los valores estimados de materiales y transporte de los mismos, pero no los pagos de los honorarios al personal requerido. Del mismo modo, se aplica para los demás modelos de cobertura.

2.7.3.2 Modelo de cobertura B

Zona 1: En la tabla 5, se muestran los costos unitarios y el valor total del volumen de cada uno de los materiales usados en este modelo de cobertura, además de los precios de transporte y operación de la maquinaria. Del mismo modo que para el modelo A, se tiene en cuenta el área de la zona.

Tabla 5

Costos de material y Operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura B en la zona 1

	Cantidad	Precio Unitario	Valor
Gravilla de cuarzo	56.48m ³	\$55000	\$3088140
Compost	135.55m ³	\$106250	\$14402187
Material estéril	451.83m ³	\$0	\$0
Suelo orgánico	282.4m ³	\$0	\$0
Lodos PTARD	203.32m ³	\$0	\$0
Volquetas <1km	1073.1m ³	\$910	\$976521
Maquinaria amarilla	46horas	\$180800	\$8316800
Volquetas > 1km	56.48m ³ *60km	\$910	\$3083800
		TOTAL	\$29867448

Fuente: Los autores

Zona 2: Para esta zona se consideran los mismos ítems de la zona 1 asociados a este modelo de cobertura, tal como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6

Costos de material y Operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura B en la zona 2

	Cantidad	Precio Unitario	Valor
Gravilla de cuarzo	489.39m ³	\$55000	\$26916450
Compost	1174.54 m ³	\$106250	\$12479521
Material estéril	3915.14m ³	\$0	\$0
Suelo orgánico	2446.96m ³	\$0	\$0
Lodos PTARD	1761.81m ³	\$0	\$0
Volquetas <1km	9298.31m ³	\$910	\$8461462
Maquinaria amarilla	398 horas	\$180800	\$71958400
Volquetas > 1km	489.39m ³ *80km	\$910	\$35627592
		TOTAL	\$267759119

Fuente: Los autores

2.7.3.3 Modelo de cobertura C

Zona 1: Para este modelo se muestran en la tabla 7 los costos de cada uno de los elementos necesarios junto con su valor unitario, cantidad correspondiente y valor total de la implementación del modelo.

Tabla 7

Costos de material y Operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura C en la zona 1

	Cantidad	Precio Unitario	Valor
Relaves	282.4m ³	\$0	\$0
Compost	28.24 m ³	\$106250	\$3000500
Cal	8.5m ³	\$110000	\$935000
Suelo orgánico	245.66m ³	\$0	\$0
Raigrás	56.48kg	\$2500	\$141197
Volquetas <1km	564.8m ³	\$910	\$513968
Maquinaria amarilla	33horas	\$180800	\$5966400
		TOTAL	\$10557065

Fuente: Los autores

Zona 2: En esta zona en particular, la cantidad de elementos necesarios aumenta, esto se observa en la tabla 8, donde se muestra el valor total necesario en la elaboración del modelo.

Tabla 8

Costos de material y Operación/transporte de la maquinaria para elaborar la cobertura C en la zona 2

	Cantidad	Precio Unitario	Valor
Relaves	2446.97m ³	\$0	\$0
Compost	244.7m ³	\$106250	\$25999375
Cal	73.41m ³	\$110000	\$8075100
Suelo orgánico	2128.86m ³	\$0	\$0
Raigrás	489.39kg	\$2500	\$1223475
Volquetas <1km	318.11m ³	\$910	\$289480
Maquinaria amarilla	286horas	\$180800	\$51708800
		TOTAL	\$87296230

Fuente: Los autores

2.7.4 Tipo de tratamiento: El objetivo de este criterio, es definir si el modelo de cobertura aplicado funciona de manera pasiva o activa; obteniendo una calificación de 5 los modelos pasivos y una de 0 los modelos activos.

Para los tres modelos de cobertura independientemente de la zona seleccionada se cuenta con el mismo tipo de tratamiento, en estos casos, se trata de tratamientos de tipo pasivos.

2.7.5 Número de etapas constructivas: Este criterio corresponde a la cantidad de procesos necesarios para llevar a cabo la elaboración de la cobertura. Siendo el modelo con menor número de etapas el más eficiente, obteniendo una calificación de 5 y tomándolo como referencia para la evaluación de los demás modelos. Cabe mencionar que, la descripción de las siguientes etapas en cada uno de los modelos es igual para las zonas 1 y 2.

2.7.5.1 Modelo de cobertura A

Etapas 1: Dado que se va a depositar material sobre los relaves, se debe adecuar la zona superficialmente para evitar irregularidades que puedan fomentar la acumulación de agua en la superficie, erosión o variaciones en las dimensiones de la cobertura.

Etapas 2: Con el uso de volquetas, depositar homogéneamente sobre el terreno 5cm de altura de gravilla de cuarzo.

Etapas 3: Sobre la capa anterior, se procede a depositar de forma uniforme el material estéril de la mina, mediante el uso de la retroexcavadora hasta lograr una altura de 40cm.

Etapas 4: Se recubre por el personal especializado la superficie anterior con el GCL y posteriormente con el geo-compuesto de drenaje, hasta cubrir toda el área.

Etapas 5: Con la implementación de la retroexcavadora, se procede a extraer el suelo orgánico, para después, ser transportado por la volqueta y depositado encima de la superficie anterior de manera igualitaria, hasta conseguir una altura de 25cm de suelo orgánico.

Etapas 6: Por último, se requiere cubrir la zona con capa vegetal nativa, usando un tipo de raigrás.

2.7.5.2 Modelo de cobertura B

Para las etapas 1, 2, 3, 5 y 6 se requieren los mismos procedimientos descritos para el modelo de cobertura A.

Etapas 4: Sobre la superficie anterior, se procede a depositar con el uso de las volquetas, de forma uniforme sobre todo el área, el compost y el lodo PTARD en una proporción de 40:60 respectivamente, hasta lograr una altura de 30cm.

2.7.5.3 Modelo de cobertura C

Etapa 1: Inicialmente, se retira con la retroexcavadora 25cm de relaves presentes en la zona.

Etapa 2: Los relaves previamente extraídos, se mezclan homogéneamente con el compost, cal y suelo orgánico. Este último, debe ser extraído por medio de la retroexcavadora y transportado por la volqueta.

Etapa 3: Se deposita la mezcla sobre la zona utilizando la retroexcavadora y la volqueta, hasta conseguir una altura de 50cm de manera homogénea.

Etapa 4: Finalmente, se requiere cultivar la zona con semillas o capa vegetal de raigrás (*Lolium Perenne*).

2.7.6 Eficiencia en la disminución del drenaje y calidad del mismo: El alcance de este criterio, es determinar la efectividad de cada uno de los modelos, tomando en cuenta factores como: el volumen resultado de la infiltración, el aumento del pH, la disminución de la conductividad eléctrica y la presencia de metales pesados. Proporcionando a la cobertura más eficiente la puntuación de 5 y tomándola como referencia en la calificación de los demás modelos.

2.7.6.1 Modelo de cobertura A

La principal cualidad de esta cobertura es que reduce el volumen de agua filtrada a los relaves en un 95%. Sin embargo, el pH, la conductividad eléctrica y la presencia Fe, Cu, As y Al no varían de manera considerable en el drenaje resultante (Huancaya & Carrasco, 2017).

2.7.6.2 Modelo de cobertura B

Este modelo se destaca porque minimiza en un 99% el volumen de agua filtrada a los relaves. Del pH, la conductividad eléctrica y la presencia de metales pesados no se conoce

información, debido a que, la cantidad de drenaje resultante es insuficiente (Huancaya & Carrasco, 2017).

2.7.6.3 Modelo de cobertura C

En el caso de este modelo de cobertura, su principal función no es evitar la infiltración del agua a través de los relaves, sino, contrarrestar las reacciones químicas generadoras del drenaje ácido por la presencia de agua, lo cual, se demuestra con un aumento del pH cercano a 7.28 en los 90 días después de su realización. Por otro lado, la conductividad eléctrica y la presencia de metales se reduce más de un 70% para los primeros 90 días posteriores a su aplicación, además, el aumento del carbono orgánico total es del más del 100% para el mismo tiempo, generando un suelo más fértil (Benidire et al., 2021).

2.8 Calificación de los criterios de evaluación

2.8.1 Durabilidad:

Para la calificación de la durabilidad, se tomó en cuenta la infiltración como característica fundamental para la estabilidad del terreno y degradación de los materiales empleados, tal como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Calificación de la durabilidad de los modelos de cobertura

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Infiltración	5%	1%	Alta
Degradación	Baja	Baja	Media
Calificación	4	5	2

Fuente: Los autores

2.8.2 Logística:

Zona 1: En la tabla 10, se realiza una comparación entre el personal necesario, los equipos requeridos y los recursos no disponibles en la zona para los tres modelos de cobertura, esto con el fin, de facilitar la evaluación de los mismos.

Tabla 10*Calificación de la logística de los modelos de cobertura para la zona 1*

	Modelo A		Modelo B		Modelo C
Personal	Operarios especializado	y	Operarios		Operarios
Equipos	Maquinaria amarilla y volquetas		Maquinaria amarilla y volquetas		Maquinaria amarilla y volquetas
Recursos no disponibles en la zona	Geo-compuesto y gravilla de Cuarzo	y	Gravilla de cuarzo, compost y lodos PTARD		Compost y raigrás

Fuente: Los autores

Dando como resultado, que el modelo más factible logísticamente es el modelo de cobertura C, con 5 puntos, debido a que, no se requiere personal especializado y los recursos no disponibles en la zona son solo dos y más accesibles que los necesarios en el tipo de cobertura A. El modelo de cobertura B, obtiene una puntuación 3, debido a que no necesita personal especializado y finalmente, la cobertura tipo A, obtiene una puntuación de 1, porque necesita además de personal especializado, accesibilidad al geo-compuesto.

Zona 2: Para la comparación de logística entre los modelos, se tomaron 3 aspectos importantes, tal como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11*Calificación de la logística de los modelos de cobertura para la zona 2*

	Modelo A		Modelo B		Modelo C
Personal	Operarios especializado	y	Operarios		Operarios
Equipos	Maquinaria amarilla y volquetas		Maquinaria amarilla y volquetas		Maquinaria amarilla y volquetas
Recursos no disponibles en la zona	Geo-compuesto y gravilla de Cuarzo	y	Gravilla de cuarzo, compost y lodos PTARD		Compost

Fuente: Los autores

El modelo más viable logísticamente para la zona 2, es el modelo de cobertura C, con 5 puntos, debido a que, no se requiere personal especializado y el recurso no disponible en la zona es solo uno. El modelo de cobertura B, obtiene una puntuación 3, debido a que, no necesita personal especializado. La cobertura tipo A, obtiene una puntuación de 1, porque necesita además de personal especializado, accesibilidad al geo-compuesto.

2.8.3 Costos

Zona 1: Tomando como referencia los costos totales obtenidos para la implementación de cada modelo de las tablas 3, 5, y 7, se procede a compararlos en la tabla 12.

Tabla 12

Calificación de los costos de los modelos de cobertura para la zona 1

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
TOTAL	\$16625345	\$29867448	\$10557065
Calificación	3.2	1.8	5

Fuente: Los autores

Para la asignación de la calificación que se muestra en la tabla 12, se tomó como referencia el costo menor o más económico, en este caso, el modelo C con una puntuación de 5 y los demás se calcularon mediante una interpolación lineal simple, tomando como valor base la calificación y costo total del modelo C.

Zona 2: En la tabla 13, se observan los costos previamente calculados en las tablas 4, 6 y 8, con el fin, de realizar su calificación y comparación.

Tabla 13

Calificación de los costos de los modelos de cobertura para la zona 2

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
TOTAL	\$153016171	\$267759119	\$87296230
Calificación	2.9	1.6	5

Fuente: Los autores

Para la realización de las calificaciones se procedió de la misma manera que en la zona 1.

2.8.4 Tipo de tratamiento

Debido a que todos los modelos de cobertura corresponden a tratamientos pasivos sin importar la zona, la calificación otorgada a los tres modelos de cobertura en las zonas 1 y 2, corresponde a 5.

2.8.5 Número de etapas constructivas

Tomando en cuenta el número de etapas presentes en cada modelo, se realiza la respectiva calificación y comparación en la tabla 14.

Tabla 14

Calificación del número de etapas constructivas de los modelos de cobertura

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Numero de etapas	6	6	4
Calificación	3.3	3.3	5

Fuente: Los autores

Para la asignación de la calificación, se tomó como referencia el modelo con menor número de etapas y se realizó una interpolación lineal simple para el cálculo de las demás puntuaciones.

2.8.6 Eficiencia en la disminución del drenaje y calidad del mismo

En la tabla 15, se observa la comparación y calificación de los modelos según su eficiencia, para esto, se tomaron dos aspectos: la reducción y calidad del drenaje.

Tabla 15

Calificación de la eficiencia en la disminución y calidad del drenaje de los modelos de cobertura

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Reducción (drenaje)	95%	99%	Bajo
Calidad (drenaje)	Mala	No aplica	Buena
Calificación	4	5	4.5

Fuente: Los autores

2.9 Resultados

En la tabla 16, se observan los resultados para cada criterio, modelo y zona, donde se calculó un promedio con las puntuaciones de los criterios y se seleccionaron según el mismo las posiciones de los modelos de cobertura.

Tabla 16

Resultados de calificación según cada criterio de selección

Criterios / Modelo de Cobertura	Cobertura A		Cobertura B		Cobertura C	
	Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
	Durabilidad	4	4	5	5	2
Logística	1	1	3	3	5	5
Costos	3.2	2.9	1.8	1.6	5	5
Tipo de tratamiento	5	5	5	5	5	5
Número de etapas	3.3	3.3	3.3	3.3	5	5
Eficiencia en la disminución del drenaje y calidad del mismo	4	4	5	5	4.5	4.5
Promedio	3.42	3.37	3.85	3.82	4.42	4.42
Posición	3	3	2	2	1	1

Fuente: Los autores

2.10 Diseños de los modelos de cobertura seleccionados

2.10.1 Zona 1:

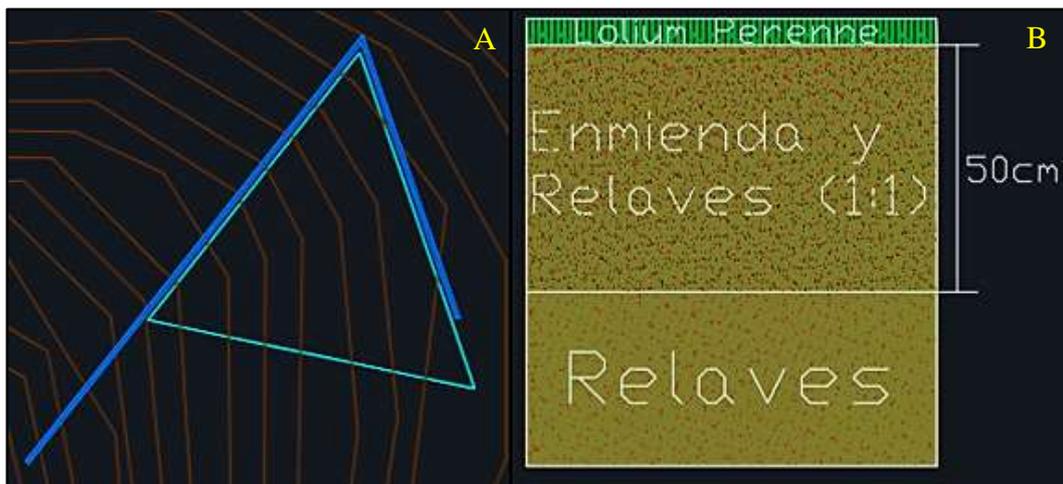
Como indica la tabla 16, el modelo más adecuado para implementarse en esta zona corresponde al tipo C, que requiere, una enmienda compuesta por: 28.24 m³ de compost (10%), 8.5m³ de cal (3%) y 245.66 m³ de suelo orgánico (87%), la cual, se mezcla homogéneamente

con $282.4m^3$ de relaves, formando una cobertura de 50cm de altura. Además, sobre esta, se cultiva 56.48kg en semillas de raigrás de la familia del *Lolium Perenne*. Para llevarse a cabo, se estimaron unos costos superiores a \$10'600,000.

En la figura 10, se muestra una vista de la cobertura que se debe aplicar sobre la superficie del triángulo que limita la zona de $1129.58m^2$ (Ver plano en el anexo 07). También, se observan los canales de drenaje de agua lluvia, con dimensiones de: 45m y 82m de longitud; 0.39m de ancho y 0.19m de altura.

Figura 10

Diseño del modelo de cobertura para la zona 1



Nota: En la figura 10A se observa la vista en 2D de la zona 1 y de la construcción de los canales y en la imagen 10B, se muestra el diseño de la cobertura con sus especificaciones. Fuente: Figuras extraídas de AutoCAD® 2D v2019, elaboradas por los autores

2.10.2 Zona 2

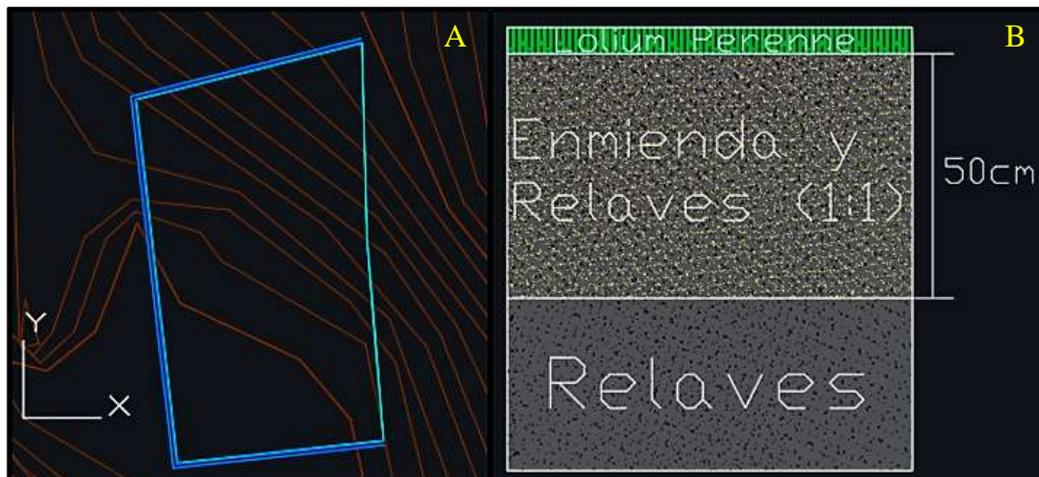
Como señala la tabla 16, el modelo más idóneo para ser ejecutado en esta zona corresponde al tipo C, que requiere, una enmienda compuesta por: $244.7 m^3$ de compost (10%), $73.41m^3$ de cal (3%) y $2128.86 m^3$ de suelo orgánico (87%), la cual, se mezcla homogéneamente con $2446.97m^3$ de relaves, integrando una cobertura de 50cm de altura.

Además, sobre esta, se cultiva 489.39kg en semillas de raigrás de la familia del *Lolium Perenne*. Para su elaboración, los costos estimados son superiores a \$87'300,000.

En la figura 11, se muestra una vista de la cobertura que se debe aplicar sobre la superficie del polígono que limita la zona de $9787.86m^2$ (Ver plano en el anexo 07). También, se observan los canales de drenaje de agua lluvia, con dimensiones: lateral 150m, parte superior 106m, parte inferior 92m de longitud; 1.22m de ancho y 0.61m de altura.

Figura 11

Diseño del modelo de cobertura para la zona 2



Nota: En la figura 11A se observa la vista en 2D de la zona 2 y de la construcción de los canales y en la imagen 11B, se muestra el diseño de la cobertura con sus especificaciones. Fuente: Figuras extraídas de AutoCAD® 2D v2019, elaboradas por los autores

3. Conclusiones

En la consulta de bases de datos e información de proyectos en diferentes zonas del país, se determinaron dos zonas con características geológicas, climáticas y pluviales diferentes con problemas en la disposición final de relaves mineros, la zona 1, localizada entre Vetas y California (Santander) y la zona 2, ubicada en la serranía de San Lucas en inmediaciones del

rio Tigüi. Con el uso de herramientas como Google Earth® y Global Mapper® v 22.1 se obtuvieron dimensiones reales, curvas de nivel y características de las zonas.

Con el implemento de criterios específicos de evaluación como durabilidad, logística, costos, tipo de tratamiento, numero de etapas y relación eficiencia/calidad del drenaje, se comparó cada uno de los modelos de cobertura seleccionados de manera cuantitativa, como se observa en la tabla 16, con el fin, de establecer el modelo más ventajoso en cada zona. En los resultados, se evidenció que la primera posición la obtuvo el modelo de cobertura tipo C con una puntuación de 4.42 en las dos zonas estudiadas, destacándose por ser una solución novedosa, sencilla, de bajo costo y eficiente. Adicionalmente, el modelo B alcanzó calificaciones de: 3.85 y 3.82 para la zona 1 y 2 respectivamente, obteniendo el segundo lugar y destacándose por ser un muy efectivo y durable, pero con un alto costo en su elaboración. Finalmente, el modelo A logró puntuaciones de 3.42 y 3.37 para la zona 1 y 2 respectivamente, adquiriendo buena calificación en efectividad y durabilidad, pero manifestando inconvenientes en su logística. Por lo cual, se asignó el modelo C como el más apropiado para ambas zonas.

El diseño de la cobertura seleccionada en AutoCAD® 2D v2019, está compuesto por una capa de 50cm de profundidad, la cual, contiene una mezcla homogénea (1:1) de relaves y una enmienda agrícola, esta última, compuesta por 10% de compost, 3% de cal y 87% de suelo orgánico, con una capa vegetal de *Lolium Perenne*. Aportando beneficios a los depósitos, tales como: fertilidad y estabilidad del suelo, propiedades antioxidantes, aumentos de pH, reducción de metales pesados y aumento de carbono orgánico. Adicionalmente, se diseñaron en AutoCAD® 3D civil v2020 los canales de drenaje de agua lluvia en cada zona, teniendo en cuenta, las características del terreno y la pluviosidad. Estos se construyeron basados en principios gravimétricos para su funcionamiento.

Referencias Bibliográficas

- Barrero, A, y Beltrán, D. (2018). *Diseño del Sistema de Recolección de Aguas Lluvias más Eficiente para el Plan Parcial de la Vereda San Bartolomé en el Municipio de Gachancipá Departamento de Cundinamarca* (tesis de especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16073/1/Documento%20Proyecto%20grado.pdf>
- Benidire, L., Madline, A., Pereira, S. I. A., Castro, P. M. L., & Boularbah, A. (2021, 1 enero). Synergistic effect of organo-mineral amendments and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the establishment of vegetation cover and amelioration of mine tailings. *Elsevier*, 262, 127803. Recuperado de:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653520319986>
- CDPMM, GAT HOLANDA, IDEAM, MAVDT, CSB, CORANTIOQUIA. (2006). *Serranía de San Lucas: Territorio en Ordenación para la Conservación y el Desarrollo humano Sostenible* (059).
https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/FLORA/AIRNR_CV_255_2006_1.pdf
- Díaz, R. (2016). *Durabilidad de las geo-membranas*. Grupo TDM.
<http://www.tdm.com.pe/noticias-32-durabilidad.php>
- Franco, O., Gonzales, O. (1981-2010). *Atlas climatológico de Colombia*. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.
<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- García, W. (2005). *Inventario Hídrico Regional Panzenú*.
https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/AGUA/AIRNR_CN_5803_2005.pdf

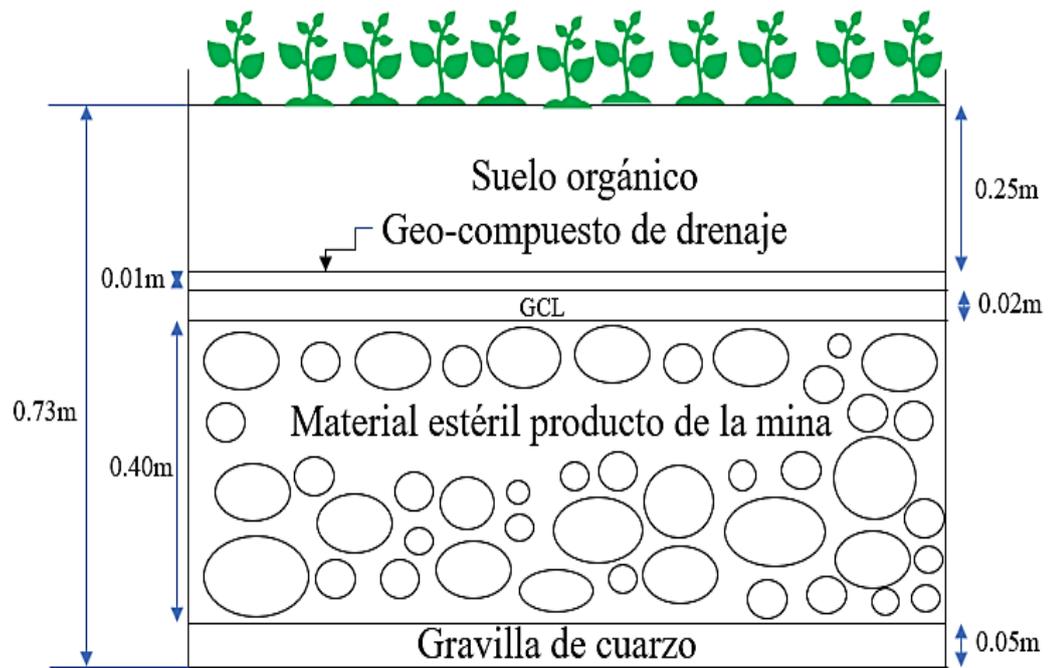
- Guerrero, A, (2018). *Propuesta para Cierre Técnico de Minas Subterráneas Abandonadas en el Sector la Bodega del Proyecto Soto Norte, Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S* (tesis de pregrado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Boyacá, Colombia.
<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2513/1/TGT-1099.pdf>
- Guevara, S., Oyarzún, J. y Maturana, H. (2006, enero- marzo). Geoquímica de las aguas del Río Elqui y de sus tributarios en el período 1975-1995: factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu y As. *Agricultura Técnica (Chile)*, 66(1), 57-69. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0365-28072006000100007&script=sci_arttext&tlng=e
- Hallan cinco minas ilegales en reserva forestal del sur de Bolívar, (9 julio de 2016). *El Tiempo*, <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16640477>
- Helbix. (productor). (2019). *Diseño de un canal rectangular, medidas*. <https://www.youtube.com/watch?v=QRb2QrqZ8vw&t=163s>
- Huancaya, R, y Carrasco, C. (2017). *Investigación en cierre de minas* (tesis de postgrado). Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. Lima, Perú.
<https://iimp.org.pe/pptjm/jm16022017-Investigaciones-en-Cierre-de-Minas-la-zanja.pdf>
- ITGME. (1989). *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales*. Madrid, España: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- López, C, Aduvire, O, Escribano, M, García, P, Mataix, C, Vaquero I. (2006). *Manual de Construcción y Restauración de escombreras*. Gráficas Arias Montano, S.A.
- Oyarzún, J., (2003, diciembre). Los riesgos de contaminar aguas con metales pesados. *Minería Chilena*, (266), pp. 1-4.

- Oyarzún J. (2008). Planes de Cierre Mineros - Curso Resumido. Diplomado en Gestión Ambiental Minera (GAM – ULS.). Universidad de La Serena, La Serena, Chile, 119. Recuperado de: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Cierres%20mineros%20-%20Jorge%20Oyarz%C3%BAAn.pdf>
- Pabst, T., Bussièreb, B., Aubertina, M., & Molson, J. (2018, 1 julio). Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydro-geochemical assessment. *Elsevier*, 214, 39-53. Recuperado de: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016977221730270X>
- Restrepo, J, Escobar, A. (2007). *Evaluación de algunos parámetros fisiológicos del Raygrass Bestfor (Lolium perenne), bajo condiciones de estrés hídrico*. Universidad CES, Medellín, Colombia.
- Sánchez, L. (2000). Drenaje de minas a cielo abierto. En F. Restrepo, C. Karez. (Eds.), *II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental* (pp. 251-264). Organización UNESCO.
<http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/cierre%20de%20minas.pdf>
- ¿Sismicidad registrada en Santander, es normal? (23 de julio de 2020). *Servicio geológico colombiano*. <https://www2.sgc.gov.co/Documents/Boletin-santander.pdf>

Anexos

Apéndice 01

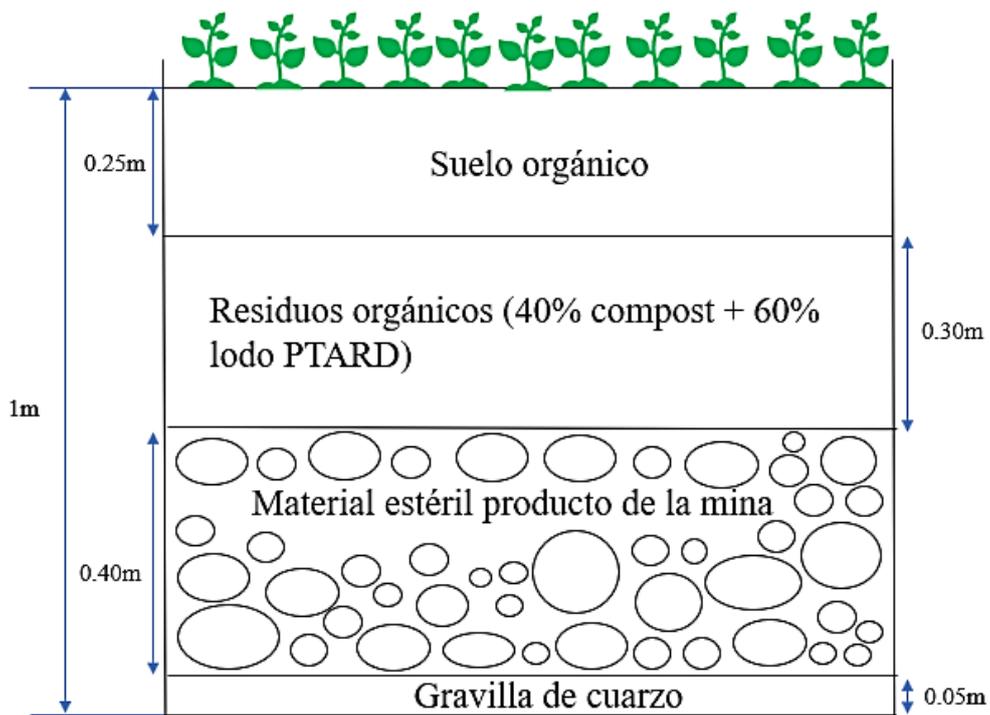
Esquema ilustrado del modelo de cobertura A



Fuente: Adaptado de Huancaya, R, y Carrasco, C. (2017)

Apéndice 02

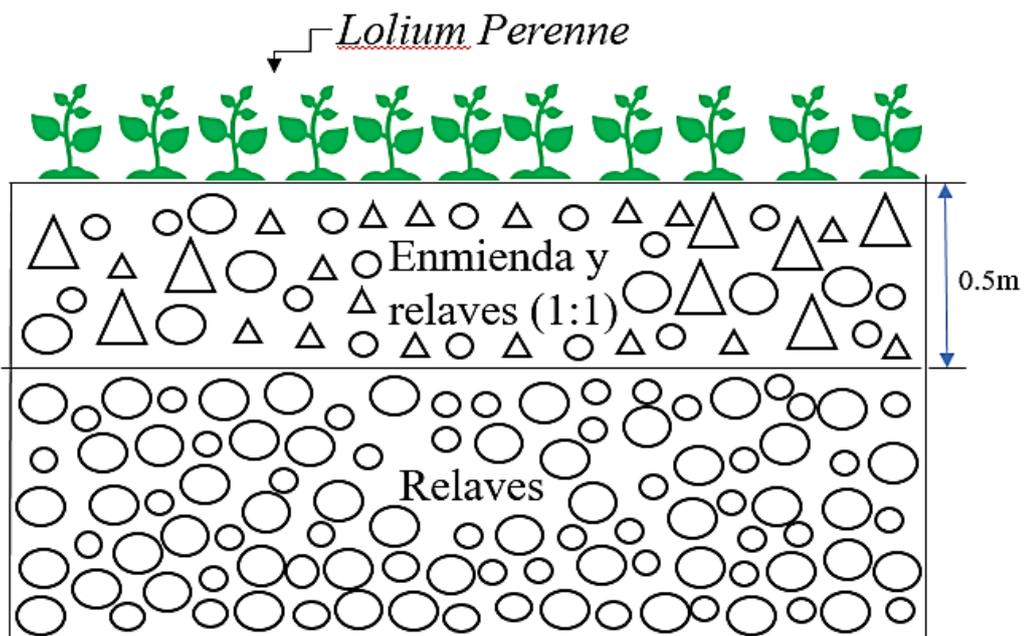
Esquema ilustrado del modelo de cobertura B



Fuente: Adaptado de Huancaya, R, y Carrasco, C. (2017)

Apéndice 03

Esquema ilustrado del modelo de cobertura C



Fuente: Concepto tomado de (Benidire et al., 2021). Elaborado por los autores

Apéndice 04

Lista de Materiales y sus respectivos proveedores

Material	Proveedor	Sitio Web
Gravilla de Cuarzo	Adinko SAS	https://www.planetacolombia.com/gravilla-o-triturado-1-2-3-4-base-sub-base-toda-al-mismo-precio-puesta-en-obra-F1008C30119D2#:~:text=Bucaramanga-,Gravilla%20o%20Triturado%201%2F2%203%2F4%20Base%20%2D%20Sub,obra%20en%20Bucaramanga%20%7C%20%24COP%2055000&text=el%20precio%20comercial%20es%20de,dependie%20el%20sitio%20de%20entrega.
Geo-compuesto de Drenaje	Gerfor	https://www.gerfor.com/wp-content/uploads/2021/03/Lista_de_Precios_Geosis_temas_2021.pdf
Compost	Vidagro	https://www.infoagro.com/compraventa/oferta.asp?id=65826
Cal	SS SYNC SAS	https://www.croper.com/98-agrosync/25-fertilizantes/3699-acondicionador-de-suelos/8780-cal-dolomita-caliza-de-magnesio
Raigrás (Lolium Perenne)	La casa del prado	https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-603460138-grama-prado-cesped-rye-perenne-golf-premiun-plus-_JM#position=6&search_layout=stack&type=item&tracking_id=af47301-cfcc-4737-9e17-6272345b1f08
Volquetas	SECOP II	https://community.secop.gov.co/Public/Archive/RetrieveFile/Index?DocumentId=23373777
Maquinaria Amarilla	SECOP II	https://community.secop.gov.co/Public/Archive/RetrieveFile/Index?DocumentId=23373777

Fuente: Los autores

Apéndice 06

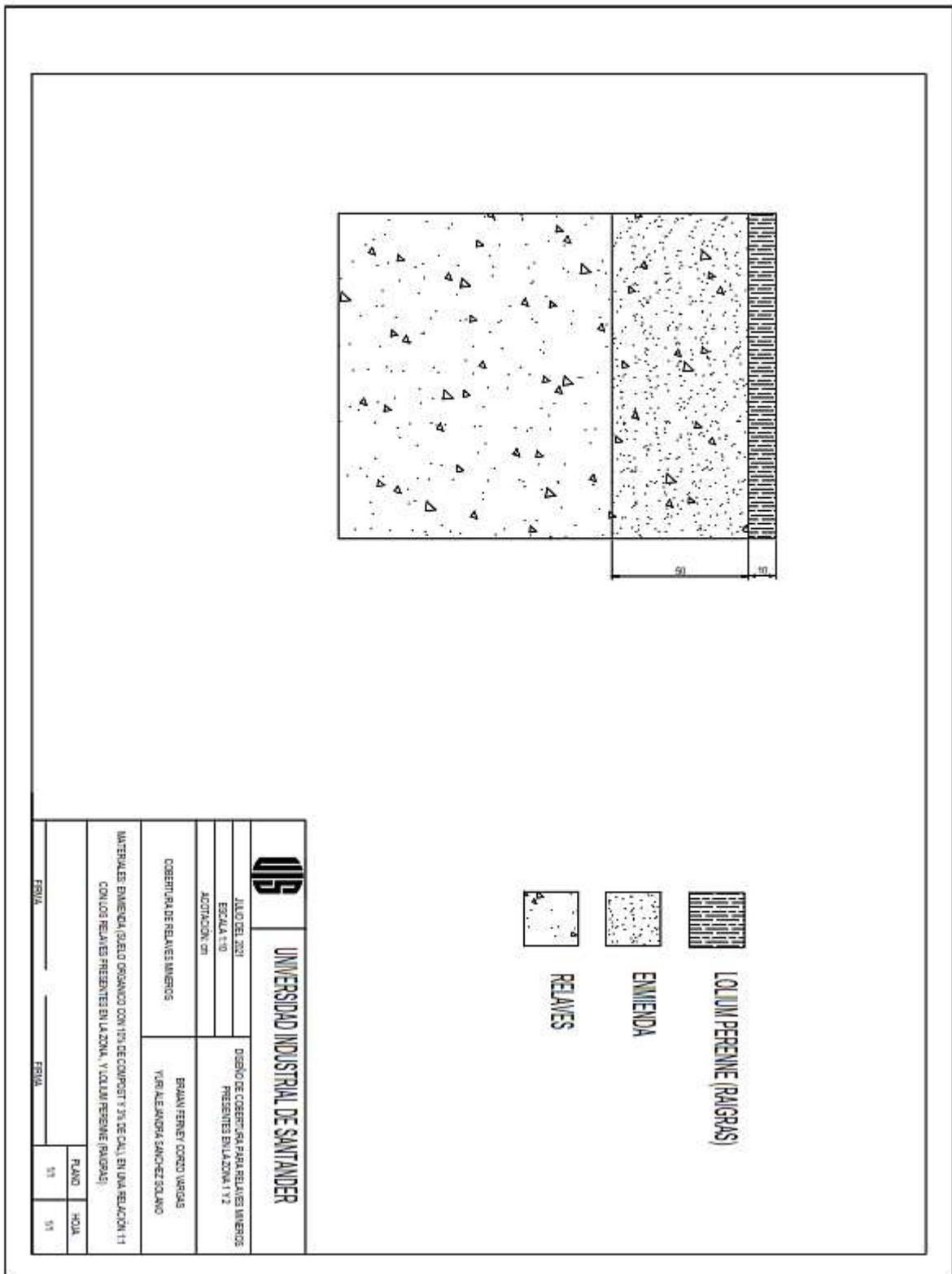
Plano del diseño de los canales para la zona 2



Fuente: Imagen tomada de AutoCAD® 3D v2020, elaborada por los autores

Apéndice 07

Plano del diseño de cobertura para la zona 1 y 2



Fuente: Imagen extraída de AutoCAD® 2D v2019, elaborada por los autores