

**Diseño de un muro de contención tipo gavión para el relave de la mina Buriticá -
Antioquia**

Santiago Gañan Zamora
D7302955

Universidad Militar Nueva Granada
Programa de Ingeniería Civil – FAEDIS
2024

Contenido

Tabla de Ilustraciones	3
Tabla de cuadros	5
Resumen.....	6
Abstract	7
Introducción	8
Descripción del área problemática.....	13
Formulación del problema	16
Justificación	16
Objetivos	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos	20
Marco de referencia	21
Metodología	35
Resultados y discusión.....	39
Conclusiones	59
Bibliografía	63

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 Relaves Buriticá.....	14
Ilustración 2 Perímetro y área de la zona de disposición.....	15
Ilustración 3 Relave de estudio	17
Ilustración 4 Vertimiento de relave en el rio Montaro Perú	18
Ilustración 5 Nomenclatura taludes y laderas	22
Ilustración 6 Nomenclatura remoción en masa.....	23
Ilustración 7 Deslizamiento rotacional	25
Ilustración 8 Deslizamiento suelos blandos	25
Ilustración 9 Clasificación de deslizamientos de Skempton – Hutchinson	26
Ilustración 10 Parámetros inestabilidad.....	26
Ilustración 11 Factores naturales	27
Ilustración 12 Factores humanos	27
Ilustración 13 Partes muro de contención	29
Ilustración 14 Tipos de muro de contención.....	30
Ilustración 15 Estándar practicas eficientes.....	34
Ilustración 16 Proceso metodológico para la elaboración del proyecto	35
Ilustración 17 Geometría del muro	38
Ilustración 18 Geometría de diseño	38
Ilustración 19 Zonas de amenaza sísmica NSR10	44
Ilustración 20 Material de separación del relave	52
Ilustración 21 Gavión de ensamblaje.....	53
Ilustración 22 Muro gavión en planta	54
Ilustración 23 Sección de corte	55

Ilustración 24 Perfil del muro gavión	56
---	----

Tabla de cuadros

Tabla 1 propiedades físicas y mecánicas del suelo	37
Tabla 2 Propiedades y características del gavión	37
Tabla 3 Análisis de estabilidad	40
Tabla 4 Verificación factores de seguridad	49
Tabla 5 Presupuesto muro gavión.....	50

Resumen

Mediante el siguiente documento de investigación se busca realizar el diseño de una estructura de contención tipo gavión con la cual se pretende estabilizar el relave generado por las actividades de extracción en la mina de Buriticá – Antioquia, dichos residuos en caso de remoción son una amenaza directa para la infraestructura que comunica el municipio de Buriticá y para la quebrada Bennejal que desemboca directamente sobre el río Cauca.

Ahora el diseño de dicha estructura de contención es fundamental para el municipio en dos aspectos:

Movilidad es necesario preservar la funcionalidad de la única vía que permite la conectividad del municipio con el resto de Antioquia una remoción de material sobre esta vía generaría el bloqueo permanente de la misma.

Ambiental una remoción podría generar la contaminación de la quebrada Bennejal lo cual afectaría directamente toda la cuenca hídrica del río Cauca.

Los factores anteriormente expuestos en caso de remoción sin duda alguna generarían afectaciones significativas a los habitantes del municipio.

Palabras Clave: Gaviones, Contención, Mina, Relaves, Riesgo

Abstract

The following research document seeks to design a gabion-type containment structure with which it is intended to stabilize the tailings generated by the extraction activities in the Buriticá mine – Antioquia, said waste in case of removal is a direct threat. for the infrastructure that connects the municipality of Buriticá and for the Bennejal stream that flows directly into the Cauca River.

Now the design of said containment structure is fundamental for the municipality in two aspects:

Mobility: it is necessary to preserve the functionality of the only road that allows the connectivity of the municipality with the rest of Antioquia. A removal of material on this road would generate its permanent blockage.

Environmental: a removal could generate contamination of the Bennejal stream which would directly affect the entire Cauca River watershed.

The factors previously exposed, in the event of removal, would undoubtedly generate significant effects on the inhabitants of the municipality.

Keywords: Gabions, containment, mine, tailings, risk

Introducción

La mina de Buriticá se encuentra en la zona media del río Cauca es decir en la región norte occidental de Colombia, de acuerdo con (continentalgold, 2024) La mina de Buriticá cuenta con la aprobación de licencia ambiental desde diciembre de 2016 por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), cuya extracción comercial de oro inició en julio de 2020.

Vale la pena recalcar que en Buriticá convergen factores como calidad, metalurgia, infraestructura y crecimiento, por lo cual se implementan procesos de vanguardia y maquinaria de alta tecnología, que permitirán extraer cerca de dos mil quinientas (2.500) toneladas de material mineral por día y producir un aproximado de doscientos cuarenta mil (240.000) onzas de oro al año. (continentalgold, 2024) Por lo tanto el proyecto es de vital importancia para la industria minera, por que pretende duplicar la producción de oro anual en Colombia lo cual conlleva con generación de empleo y regalías significativas para el departamento de Antioquia.

Ahora aunque el crecimiento en el sector económico es significativo es importante determinar acciones relevantes para el manejo ambiental, de acuerdo con la ANLA se logra estimar que la mina en cuestión genera 38.000 m³ de material al mes para relave (ANLA, 2024) , esta situación permite dimensionar la problemática que genera el almacenamiento adecuado de estos residuos.

Los proyectos de carácter minero que realizan procesos de transformación de minerales relacionados al Hierro (Fe), Oro (Au), Plata (Ag), Cobre (Cu), etc. Requieren de un lugar de almacenamiento de los desechos producidos por esta actividad, ya sea de forma definitiva o temporal.

Estos desechos se denominan como relaves y su manejo deriva en el depósito de estos residuos en presas o rellenos, este tipo de estructuras son construidas con el fin de contener el

relave desde su origen hasta cientos de años posteriores al cierre de la mina, ahora este tipo de estructuras contemplan cierta cantidad de etapas que van desde la planificación, el diseño, la operación y su cierre, estas etapas es necesario abordarlas desde una visión que se base en la gestión del riesgo, que se anticipe a los posibles impactos que pudiesen generar en el ambiente, la sociedad, la infraestructura y la economía. (Asesorías técnicas geológicas, 2020)

En su gran mayoría los depósitos construidos para la disposición final de los relaves a nivel corresponden a presas de relaves, estructuras que son construidas con la finalidad de mantener de forma adecuada una relación entre la estructura física y química que perdure en el tiempo por lo cual este tipo de estructuras cobran una mayor importancia en temas ecológicos a nivel mundial debido a la amenaza que representan para el medio ambiente ante un manejo inadecuado.

En Colombia no existe un marco normativo que sea claro y permita un manejo adecuado de estos residuos de relave, de tal manera las organizaciones mineras que administran y construyen este tipo de depósitos y las entidades encargadas de realizar control y vigilancia de este tipo de actividad, toman como documento rector el programa de trabajos e inversiones (PTI, 2025), este fue otorgado mediante el Decreto 2655 de 1988 y rige a todos los títulos mineros anteriores a la implementación del actual código de minas (LEY 685, 2001); En estos documentos se hace una introducción a elementos relacionados con la disposición y manejo de los residuos de relave, dentro del documento se disponen temas técnicos que van desde las instalaciones, caracterizaciones del sector de influencia, planes de recuperación y caracterización, planes de cierre de la infraestructura entre otros.

Otros documentos como:

- Las Guías Minero-Ambientales (ANM, 2002)

- Metodología General para la presentación de Estudios de Impacto Ambiental (MINAMBIENTE, 2018)
- Términos de Referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA (MINAMBIENTE, 2006),

Estos documentos abordan en cierta manera elementos como lo son ubicación, tratamiento, seguimiento y transporte de los residuos de relave los cuales tratan de manera superficial el tema y toda vez que se centran más en la caracterización de zonas para la ejecución de proyectos mineros, lo cual no permite una focalización en la gestión de los relaves y la importancia en una disposición adecuada. (Asesorías técnicas geológicas, 2020)

Ahora es importante conocer el proceso de disposición de los relaves. Este material no es más que el residuo sólido sobrante del proceso de extracción de minerales y para poder darle inicio a la disposición, este se traslada a unos tanques en los cuales se realiza el proceso de detoxificación, lo cual permite oxidar el cianuro presente en la mezcla al precipitarlo insoluble. El material producido de esta reacción química se le realiza un proceso de espesado lo cual permite aumentar la densidad del material para que finalmente sea bombeado, transportado a la planta de pasta mediante un sistema de transporte de banda. (continentalgold, 2024)

Posteriormente se produce la etapa de secado y fundición donde mediante un horno se aumenta la temperatura del residuo hasta unos 800° C de tal manera que se pueda evaporar la humedad del mismo, mediante este proceso se logra eliminar el mercurio y se realiza la separación de otro residuo catalogado como peligroso y se le denomina Respel. (continentalgold, 2024)

Ahora es importante mencionar que Continental Gold cuenta con un plan de manejo ambiental adecuado (Resolución 1443 de 2016) autorizado por la ANLA, sin embargo es importante que desde la ingeniería civil se puedan ofrecer soluciones para poder garantizar la

estabilidad de estos residuos, de esta manera cobra importancia el diseño del muro gavión para la contención del relave, por lo cual mediante esta investigación se definirán los cálculos y la discriminación de los parámetros necesarios para la contención de dichos residuos.

Al realizar el diseño de obras de infraestructura en este caso un muro de contención es importante contar con una descripción detallada de la zona de influencia donde se va a llevar a cabo el proyecto, en este caso se dispondrá de un estudio de suelos que permitirá comprender las propiedades del mismo, que a su vez nos permitirá llevar a cabo los cálculos necesarios para identificar si el suelo soportara la estructura a diseñar, también es importante conocer los materiales para el caso en cuestión se dispone de las especificaciones suministradas por el INVIAS lo cual permite analizar correctamente cada detalle para la generación de un diseño óptimo.

Una vez descrita la situación en relación a los relaves se busca mediante este proyecto de grado realizar el diseño de un muro de contención tipo gavión que soporte el momento desestabilizante producido por el residuo de relave producto de las labores de extracción de oro en la mina de Buriticá Antioquia, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Antecedentes

Para la presente investigación se logra definir una amplia bibliografía, la cual permite identificar diversos modelos y metodologías para diseñar estructuras de contención. Mediante el marco teórico del presente estudio es importante mencionar el libro “Diseño de estructuras de contención” en su capítulo 9 correspondiente a estructuras de contención tipo gavión en el cual se realiza una descripción mediante la presión lateral de la masa de tierra, por factores como el tipo y magnitud de los movimientos dinámicos y de las presiones estáticas que debe soportar el muro (Rodríguez, 2011).

También se han realizado diferentes investigaciones como el trabajo de grado “Recrecimiento de depósito de relaves utilizando muros de suelo reforzado con geomallas” (Peralta, 2021). Esta investigación aborda el diseño de un muro de contención tipo gavión con la finalidad de contener un relave de características similares a las propuestas en este estudio.

El trabajo de grado “metodología de diseño y cálculo estructural para muros de contención con contrafuertes en el trasdós, basados en un programa de cómputo”, (Gómez, 2013) en el cual se definen parámetros con base en la resistencia al corte del suelo y el uso de un software de diseño. Vale la pena aclarar que el diseño propuesto en esta investigación es inherente al área de influencia y que dichas investigaciones anteriormente mencionadas sirvieron como guía metodológica para identificar los parámetros de diseño.

Otro trabajo de grado que permite identificar una metodología de diseño de gaviones optima titulado “Elección de la estructura de contención basado en la geotecnia de la zona” donde el autor con base en las características mecánicas de un suelo logra determinar entre varias opciones de muro de contención cual es la más optima. (Espitia, 2022)

El trabajo de grado titulado “diseño de un puente vehicular sobre el río plátanos en la aldea el copante y el diseño de un sistema de muro de contención de gaviones para el desfogue de agua pluvial en la aldea pontezuelas del municipio de San José del golfo, departamento de Guatemala” Donde el autor a pesar de realizar un solo apique en el correspondiente estudio de suelos logra diseñar una sección de 1.000 m de muro de gavión, el autor en sus conclusiones permite identificar claramente los beneficios de la construcción de muro tipo gavión en relación a otros muros de gravedad.

El documento titulado “Lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería” del MINENERGIA brinda una guía que

mediante experiencias y metodologías técnicas focaliza la disminución de los riesgos y amenazas en el proceso de administración de un depósito de relaves. En cierta manera este documento nos permite adoptar estándares más modernos para el manejo adecuado de los residuos de relave (MINENERGIA, 2020)

Planteamiento del problema

Descripción del área problemática

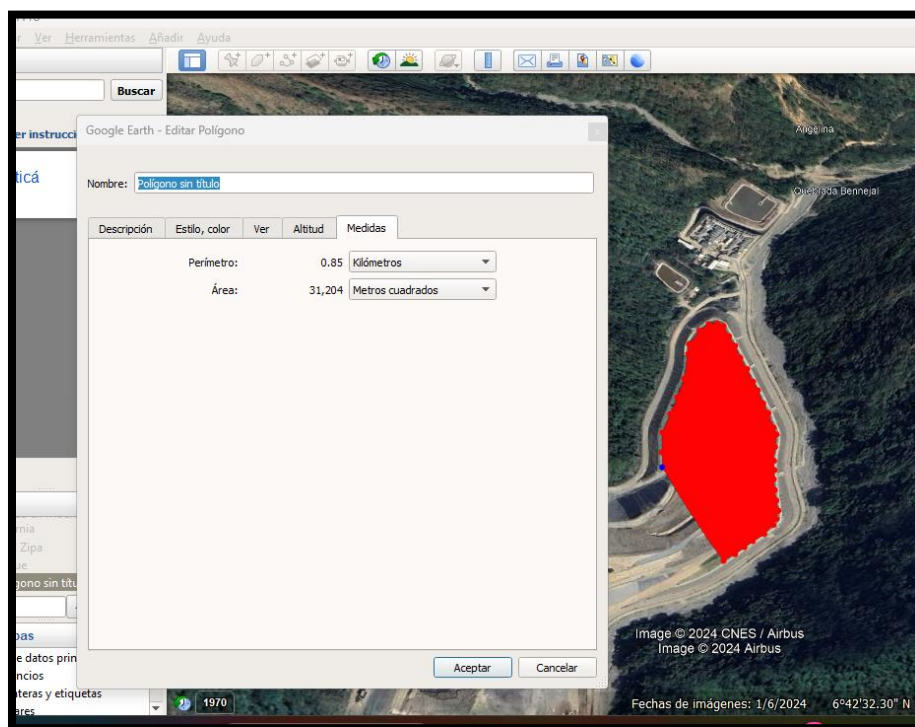
El proyecto Buriticá en la actualidad es la mina más importante de Colombia, esta posee un área de 70.678 hectáreas y alrededor de 23 concesiones registradas que cubren 29.465 hectáreas, esta mina abarca las veredas Mogotes, Higabra, Murrapal, Los Asientos y el corregimiento El Naranjo del municipio de Buriticá, la mina tiene reservas minerales correspondientes a 3.7 millones de onzas de oro y 10.7 millones de onzas de plata y se estima que logra extraer 2.500 toneladas diarias de material (Parra, 2019). Dichas actividades generan una gran acumulación de residuos, de acuerdo con la ANLA se estima que se producen un aproximado de 38.000 m³ de material al mes.

Ilustración 1 Relaves Buriticá

Nota: Tomado de <https://www.paisminero.com>

Una vez expresada la situación actual de la mina, es importante determinar que la zona de disposición de residuos corresponde a las coordenadas 6°42'10"N 75°54'04"W. El sitio de disposición posee un área aproximada de 31.204 m² con un perímetro de 850 m aproximadamente. La zona se encuentra en medio de un terreno escarpado y la atraviesa una vía de dos carriles uno por sentido vial que conecta a Buriticá con el oriente antioqueño y permite el tránsito de vehículos con mercancías y productos del sector agrícola hacia los municipios aledaños.

Ilustración 2 Perímetro y área de la zona de disposición



Nota: Tomado de Google Earth

A la fecha el relave tiene un volumen 250.000 m³ y una altura que promedia los 20 m con un ángulo aproximado de 38 ° respecto a la horizontal, esto de acuerdo con la información suministrada por (continentalgold, 2024) ahora el tema cobra mayor trascendencia por que el relave se encuentra a una distancia inferior a los 50 m de la vía y de la quebrada.

Es importante entender que las remociones en masa corresponden a un fenómeno que no tiene soluciones radicales, debido a que en su mayoría son producto de procesos de la naturaleza aunque en este caso la disposición se haga por medios mecánicos la lluvia puede afectar la composición del material y la cohesión del mismo, por esta razón es indispensable abordar las posibles soluciones que surgen desde la ingeniería civil para tratar de minimizar los daños que surgen y por ende garantizar condiciones óptimas de la infraestructura del sector.

Formulación del problema

Una vez descrita la situación que se presenta en el proyecto se logra entender cuál es la importancia de diseñar una estructura de contención tipo gavión en las coordenadas 6°42'10"N 75°54'04"W de la mina de Buriticá la cual permita evitar el daño de la infraestructura y la contaminación de la quebrada Benejal por lo cual se plantea el siguiente problema: *“¿Es posible estabilizar el talud del depósito de relaves compactados en la mina Buriticá mediante el diseño de un muro de contención tipo gavión, garantizando la seguridad y mitigando los riesgos viales y ambientales?”*

Justificación

Esta investigación se basa en la disposición de residuos en la mina de Buriticá la más grande de Colombia, como se ha expresado en los capítulos anteriores y debido a la gran capacidad de extracción de la mina, la cual genera una cantidad considerable de residuos que son acoplados en capas en la zona de disposición de residuos implementada por el Plan de Manejo Ambiental (PMA) de la mina, a la fecha y de acuerdo con la información suministrada por (continentalgold, 2024) hay un volumen total de 250.000 m³ de relave lo cual representa una amenaza considerable para las comunidades aledañas al proyecto.

El relave en cuestión tiene una longitud de aproximadamente 850 m y 20 m de altura en su escarpe superior, hasta la fecha no se han presentado desprendimientos de material.

Siendo así las cosas y teniendo en cuenta que ya existen unos estudios previos, vale la pena analizar si se puede implementar una estructura de contención tipo gavión que no solo soporte la carga a la que va a ser sometida sino que disminuya los costos a largo plazo, es por esto por lo que surge la idea de realizar los cálculos necesarios para argumentar la

implementación de este tipo de infraestructura que mitiguen o disminuyan la afectación que puede generar este relave.

A continuación se anexa registro fotográfico donde se logra evidenciar las características físicas del relave en cuestión

Ilustración 3 *Relave de estudio*



Nota: Tomado de Consorcio Higabra Vial

Justificación ambiental

¿Qué riesgos conllevan el colapso de un relave minero? De acuerdo con la bibliografía consultada las afectaciones son irreversibles en el tema ambiental ya que se puede generar la contaminación de aguas dulces superficiales y de acuíferos freáticos por descargas de aguas de relaves, normalmente con alta carga residual química y de elementos disueltos (Herrera, 2011), esta es una problemática que se debe atender teniendo en cuenta la ubicación del relave con el afluente hídrico. Ahora es importante comprender que las aguas de la quebrada Bennejal

abastecen los acueductos de los municipios aledaños obviamente después de procesos de tratamiento, sin embargo una emisión alta de los químicos utilizados en los procesos de extracción minera podría ocasionar la contaminación y que esta agua no fuera potable para consumo humano (SPDA, 2019)

Ilustración 4 *Vertimiento de relave en el río Montaro Perú*



Nota: Tomado de <https://www.actualidadambiental.pe>

Otro factor para tener en cuenta es la contaminación de aire y los suelos mediante el levantamiento y arrastre de material fino por acción del viento, lo cual desencadenaría en erosión y afectación en las actividades agropecuarias y ganaderas de la zona (AIDA, 2019)

Justificación social

El municipio de Buriticá cuenta con una población 9.354 personas de acuerdo con (DANE, 2025). Ahora el impacto social generado por la remoción de un relave comprendería varios aspectos que van de la mano con el componente ambiental, según (Herrera, Relaves Mineros y sus Efectos en Salud, Medio Ambiente, 2011) la contaminación del medio ambiente por la incursión de los químicos usados en el ciclo de extracción minero puede representar un riesgo de

intoxicación y cáncer para las poblaciones, este efecto a su vez conlleva con el desplazamiento de la comunidad y la pérdida de servicios en: salud, educación, comercio minorista e infraestructura crítica.

Justificación económica

La implementación de un muro de contención tipo gavión para el área en cuestión tiene un costo aproximado de 7.000.000 de pesos m/c lo cual en cierta manera representa una cuantía significativa, sin embargo la inoperancia de este puede desencadenar gastos incalculables que repercuten en el medio ambiente y en la infraestructura del sector.

en el factor hídrico estaríamos hablando de la contaminación de un caudal de 5.6 l/s que a su vez hace parte de la cuenca del río Cauca esto repercutiría en la contaminación de múltiples ecosistemas que tardarían muchos años en restablecer.

Por otra parte según el (DANE, 2025) el 70% de las actividades económicas de la población son derivadas de la agricultura por lo tanto la contaminación del agua acabaría con el sustento de la población, ahora lo anteriormente mencionado nos permite dimensionar que es el daño económico es incalculable

Objetivos

Objetivo general

- Realizar el diseño de un muro de contención tipo gavión para estabilizar el relave de la mina de Buriticá.

Objetivos específicos

- Identificar si el muro tipo gavión es una opción eficiente para el manejo de la problemática presentada en la mina de Buriticá teniendo cuenta los factores económicos, técnicos y de durabilidad.
- Evaluar los factores de seguridad para el muro de construcción tipo gavión, teniendo en cuenta los requisitos mínimos exigidos por la normatividad INVIAS y NSR10.
- Realizar la modelación del muro con base en todos los parámetros necesarios para la elaboración de un diseño adecuado.

Marco de referencia

La inestabilidad en terrenos naturales deriva de la pendiente natural del terreno entre otros factores, esta pendiente puede ser variable dependiendo de diversos componentes como lo es la gravedad, el ángulo de fricción del material y el nivel freático entre otros, ahora la inestabilidad artificial es generada por la acción del hombre. (Diaz, 1998)

Rellenos: los rellenos abarcan todo lo relacionado con depósitos artificiales elaborados por el hombre en la mayoría de las construcciones civiles.

Relaves: estos corresponden a un subproducto de la minería. Tras extraer de la tierra el mineral que contiene un producto económicamente recuperable, este se extrae en una planta de procesamiento o molino. Una vez extraído el producto valioso del mineral, el flujo de residuos resultante se denomina relaves. Normalmente, los relaves de molino varían en tamaño de partícula, desde arena hasta limo-arcilloso.

En el proceso final, antes del almacenamiento, se separa el agua de la pulpa de relaves en tanques especiales llamados espesadores para formar una pasta. Dependiendo de la cantidad de agua en los relaves, generalmente menos de una parte de agua por cada tres partes de sólidos finamente molidos, el material resultante puede tener la textura de una pasta de dientes. La pasta se bombea a una instalación de almacenamiento. Generalmente, hay una pequeña cantidad de solución decantada que se bombea de regreso al proceso.

En ocasiones, la pasta y el cemento se mezclan y se bombean de regreso a una mina subterránea para su almacenamiento, lo que ayuda a los mineros a rellenar los huecos y proporcionar soporte al terreno. También reduce la superficie que se utilizaría para la instalación de relaves en pasta. (MINENERGIA, 2020)

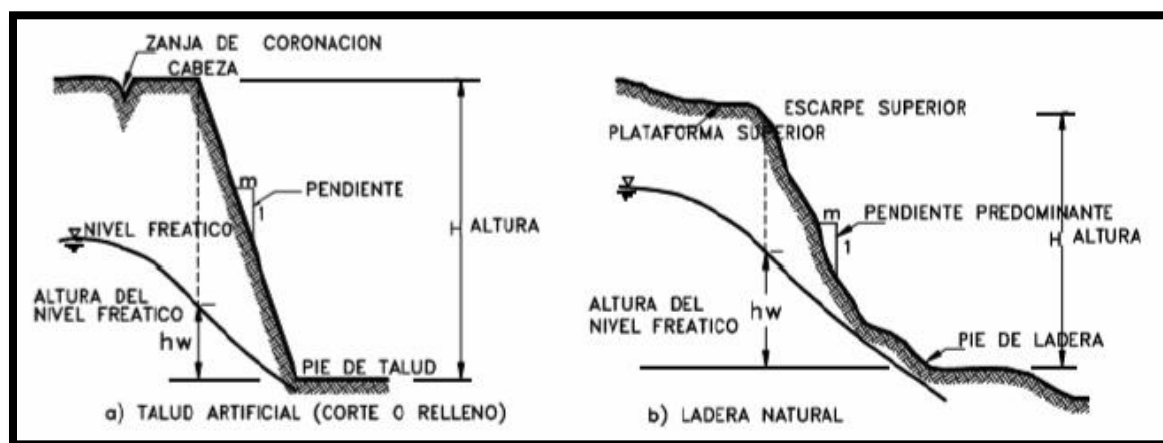
Nomenclatura de un talud.

El talud corresponde a una extensión de tierra una que presenta pendiente o cambios de altura significativos. En términos técnicos se define como “ladera” cuando sus características físicas corresponden a un proceso natural y talud cuando son el resultado de actividades mecánicas conformadas.

Los taludes pueden ser concebidos de manera temporal o permanente esto de acuerdo con la función para la cual allá sido diseñado, el material del que está compuesto corresponde al mismo suelo, roca o muro y su funcionalidad depende de la capacidad de soportar la tensión producida por el terreno sin colapsar.

La nomenclatura corresponde a la estructura del talud dentro de la cual se logra identificar dos partes en este caso la parte alta “cabeza del talud” y la parte baja “pie del talud”. Aunque la nomenclatura de un talud hay otros conceptos importantes como lo son la altura del talud, y la altura del nivel freático como se logra evidenciar en la siguiente ilustración.

Ilustración 5 *Nomenclatura taludes y laderas*



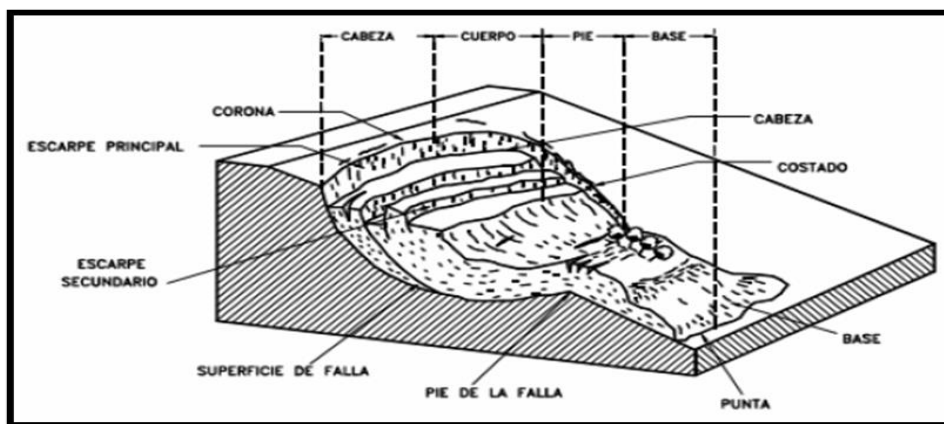
Nota: Tomado de (Diaz, 1998)

En la anterior ilustración se describe la nomenclatura de la siguiente manera:

- **Altura:** esta corresponde a la distancia en metros entre la cabeza y el pie de este vale la pena recalcar que esta distancia es fácil de identificar en taludes artificiales, pero en la ladera es dispendiosa debido a que la nomenclatura no está bien demarcada puesto que ni el pie y la cabeza no son accidentes topográficos.
- **Pie:** este es la cota más baja del sitio, donde se produce un incremento considerable en la pendiente.
- **Cabeza o escarpe:** esta es la cota más alta del sitio, donde se produce una disminución considerable en la pendiente.
- **Altura de nivel freático:** esta es la distancia del pie del talud hasta el nivel de agua que esta debajo de la parte alta del mismo.
- **Pendiente:** esta corresponde netamente a la inclinación del talud, que a su vez puede ser representada en porcentaje, grados o en relación $\frac{1}{m}$ donde m es la distancia horizontal en relación de 1 (unidad) de distancia en el plano vertical. (Castaño, 2005)

En la siguiente grafica se describe nomenclatura de un talud ante una remoción en masa

Ilustración 6 *Nomenclatura remoción en masa*



Nota: Tomado de (Diaz, 1998)

- **Escarpe principal:** este es la superficie de mayor inclinación del área en movimiento, el cual es originado por el desplazamiento del suelo por fuera del terreno original.
- **Escarpe secundario:** esta es la superficie con una menor inclinación que el escarpe principal la cual es producto del desplazamiento diferencial en la masa que origino el movimiento desestabilizante.
- **Cabeza:** esta es la parte superior del material removido y el escarpe principal
- **Corona:** Aquí se encuentra el material sin ninguna alteración en la cota más alta del talud.
- **Superficie de falla:** esta es el área posterior del movimiento que permite identificar la cantidad de material desplazado, por lo cual este volumen de material debajo de la superficie de falla no se mueve.
- **Pie de la falla:** esta es la línea de interceptación entre la superficie de rotura y el terreno (algunas veces no se logra identificar a raíz del movimiento del material).
- **Base:** este es el material producto de la remoción que se sitúa en el pie de la superficie de falla.
- **Punta o uña:** el punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- **Costado o flanco:** un lado (perfil lateral) del movimiento.
- **Superficie original del terreno:** la superficie que existía antes de que se presentará el movimiento. (Díaz, 1998).

Deslizamiento.

Este término corresponde al desplazamiento en corte a lo largo de la superficie o terreno, estos movimientos se pueden categorizar de la siguiente manera:

- **Deslizamiento rotacional:** en este deslizamiento la falla conforma una curva la cual se encuentra situada en la parte superior del centro de gravedad del material en movimiento.

En la siguiente ilustración se puede identificar el deslizamiento

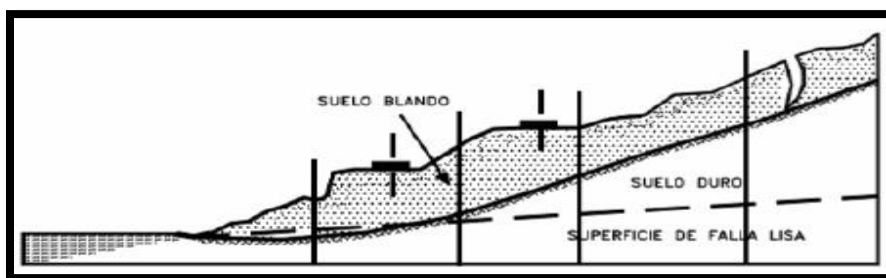
Ilustración 7 *Deslizamiento rotacional*



Nota: Tomado de (Diaz, 1998)

- **Deslizamiento de translación:** en este tipo de deslizamiento el movimiento del terreno surge con un desplazamiento hacia la parte inferior o hacia afuera de una superficie de características más o menos plana lo cual anula el volteo

Ilustración 8 *Deslizamiento suelos blandos*



Nota: Tomado de (Diaz, 1998)

Ahora hay que tener en cuenta que los movimientos denominados como deslizamientos se originan para generar equilibrio en los suelos ya que estos al igual que toda masa buscan este principio.

En la siguiente ilustración se puede evidenciar la clasificación de los deslizamientos en relación con el tipo de material y la velocidad de este.

Ilustración 9 *Clasificación de deslizamientos de Skempton – Hutchinson*



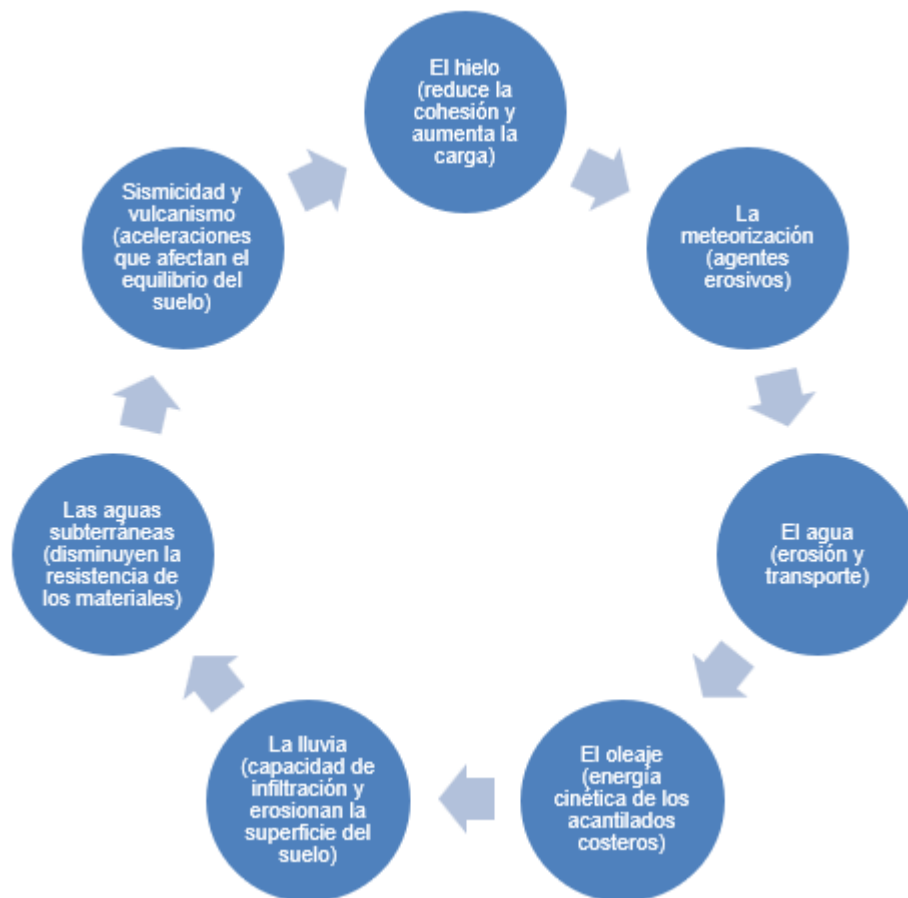
El origen de las inestabilidades surge mediante el aumento indiscriminado de las fuerzas gravitacionales lo cual conlleva a una disminución de forma gradual en la resistencia al corte del suelo de tal manera es necesario distinguir ciertos parámetros que aumentan el riesgo de que se origine una inestabilidad.

Ilustración 10 *Parámetros inestabilidad*



factores desencadenantes naturales:

Ilustración 11 *Factores naturales*



+

Factores desencadenantes humanos

Ilustración 12 *Factores humanos*



El movimiento depende de factores como:

- Velocidad: esta corresponde a la interacción de factores como pendiente del talud, superficie de rotura y las propiedades físicas de los suelos
- Clase de material y volumen de este
- Frecuencia: esta es directamente proporcional al tipo de material, nivel de precipitación y su correspondiente meteorización.

En la siguiente parte se va a explicar los muros de contención, tipos y características.

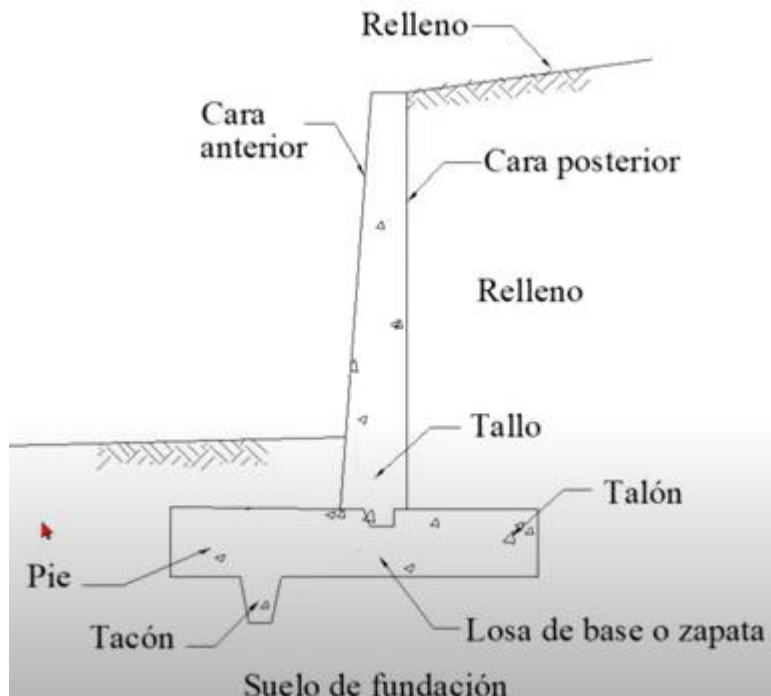
Muros de Contención: de acuerdo con (DAS, 1985) Los muros de contención corresponden a estructuras con la capacidad de contención de empujes y presiones generados por una carga, en general este tipo de estructuras son diseñados con la finalidad de ser sometidos por suelos, materiales granulares o rellenos (artificiales) lo cual permite contener pendientes que físicamente no se pueden estabilizar.

Características: Los muros de contención están diseñados para crear zonas niveladas en terrenos inclinados, proporcionar soporte adicional a las pendientes naturales con riesgo de derrumbes y maximizar el espacio de desarrollo, creando terrazas para que la infraestructura discorra a lo largo de las pendientes. También ayudan a formar los muros de sótanos, aparcamientos subterráneos y estaciones de metro en pueblos y ciudades.

Partes del muro de contención

En la siguiente ilustración se logran evidenciar las diferentes partes que componen un muro de contención.

Ilustración 13 Partes muro de contención



Nota: Tomado de principios de ingeniería de cimentación

- Puntera: Parte de la base del muro (cimiento) que queda debajo del intradós y no introducida bajo el terreno contenido.
- Tacón: Parte del cimiento que se introduce en el suelo para ofrecer una mayor sujeción.
- Talón: Parte del cimiento opuesta a la puntera, queda por debajo del trasdós y bajo el terreno contenido.
- Alzado o cuerpo: Parte del muro que se levanta a partir de los cimientos de este, y que tiene una altura y un grosor determinados en función de la carga a soportar.
- Intradós: Superficie externa del alzado. Trasdós: Superficie interna del alzado, está en contacto con el terreno contenido.



En la siguiente Ilustración se logran identificar los diferentes tipos de muro de contención

Ilustración 14 Tipos de muro de contención



Nota: Tomado de principios de ingeniería de cimentación

Muros de gravedad: Los muros de contención de gravedad utilizan la fuerza gravitacional de su propio peso para resistir la presión lateral del terreno subyacente, lo que evita derrumbes y deslizamientos. Son el tipo de muro de contención más simple y antiguo registrado. Construidas en hormigón, mampostería, ladrillo, bloques u hormigón in situ, estas resistentes estructuras se basan en su gran peso para resistir derrumbes y deslizamientos causados por la presión lateral del terreno subyacente.

Los muros de contención de gravedad suelen diseñarse con una base más ancha y caras inclinadas, lo que les permite resistir las mayores presiones laterales del terreno en profundidad. Por lo tanto, este tipo de muro de contención es fácil de construir y adecuado para alturas de contención de hasta aproximadamente 3 m.

A pesar de sus ventajas, los muros de contención de gravedad no son adecuados para alturas de contención superiores a 3 m. Si se construyen a mayor altura, las estructuras de contención tienden a ocupar demasiado espacio y pueden resultar demasiado pesadas para el terreno subyacente, lo que provoca un fallo en la capacidad portante. En última instancia, esto puede provocar que el muro no pueda retener el suelo.

Muros de gaviones: Se ejecutan principalmente para estabilizar el suelo detrás del muro, pero también pueden utilizarse como muro de cobertura. El muro se construye con cestas de gaviones apiladas en una o más filas, según la altura del muro. Las cestas tienen forma de jaula y están cerradas por todos lados. Están hechas de mallas hexagonales galvanizadas y roca quebrada que se coloca en su interior. Las estructuras de contención se forman apilando cestas de gaviones en una distribución adecuada y representan una solución alternativa para las estructuras de hormigón en el ámbito de la estabilización del suelo.

Beneficios de los muros de gaviones:

- Estética: los muros de gaviones tienen un aspecto natural al usar materiales naturales, se integran con el entorno.
- Compatibilidad con el medio ambiente: al usar material obtenido mediante excavaciones, se reducen significativamente los costos de adquisición y transporte.
- Se utiliza como sistema de refrigeración en climas cálidos y proporciona refrigeración pasiva mediante el movimiento del aire.
- Permeabilidad al agua: los muros de gaviones son permeables y no se dañan con el paso del agua.
- La eficiencia de los muros de gaviones puede aumentar con el tiempo, ya que la vegetación rellena los huecos y refuerza la estructura del muro.
- Los movimientos del suelo no afectan negativamente a los muros de gaviones, lo cual representa una ventaja con respecto a las estructuras más rígidas (muros de hormigón armado).
- Durabilidad: los bloques de piedra son materiales de uso frecuente debido a su durabilidad, estabilidad y longevidad. (Macaferri, 2005)

Características

Según (Macaferri, 2005) “Se suelen llamar tipo caja a aquellos cuya altura varía entre 0.50 m – 1.00 m y tipo colchón a aquellos cuya altura varía entre 0.17 m – 0.30 m. Interiormente, los gaviones pueden estar divididos por diafragmas formando celdas cuya longitud no debe ser mayor a una vez y media el ancho de la malla. Usualmente, esta separación es de 1 m. Las aristas de los paneles de malla son reforzadas con alambres de mayor diámetro”.

Muros de contención cantiléver

Los muros en voladizo se construyen con hormigón armado, con una cimentación en forma de L o T invertida. Este tipo de muro de contención consta de un fuste y una losa de base (o zapata) que se asienta bajo el relleno. La tensión vertical detrás del muro se transfiere a la cimentación, evitando el derrumbe por la presión lateral de la tierra, permitiendo que los muros en voladizo se mantengan en pie sin obstrucciones.

Además, una cimentación en forma de T se beneficia del peso del suelo (y, por lo tanto, de la tensión vertical) frente al muro, lo que proporciona mayor estabilidad a la estructura de contención. Las cimentaciones a veces incluyen una cuña en su base, que se clava en el terreno para evitar deslizamientos.

Una gran ventaja de los muros en voladizo en comparación con otros tipos de muros de contención es que ocupan poco espacio una vez construidos y son adecuados para alturas de contención de hasta 5 m. Sin embargo, la construcción requiere espacio detrás del muro, por lo que estos muros de contención no son especialmente adecuados para soportar taludes existentes a menos que se proporcione un soporte temporal.

Muros de contención empotrados

Los muros de contención empotrados se extienden a mayor profundidad que la excavación para aprovechar la presión pasiva del terreno. En algunos casos, pueden alcanzar los 40 m de profundidad. Este tipo de muro de contención se utiliza para formar estructuras subterráneas cercanas a la superficie, como sótanos, aparcamientos y estaciones de metro.

Los muros de contención empotrados funcionan contrarrestando la presión activa del terreno que se ejerce sobre el muro superior. Estas estructuras de contención se soportan adicionalmente mediante apuntalamiento interno, generalmente desde la losa de cimentación, la losa de cimentación y cualquier losa intermedia, o mediante anclajes instalados a través del muro.

Se pueden construir utilizando diversos métodos, dependiendo de las condiciones del terreno, la estanqueidad de la excavación, la viabilidad constructiva (es decir, el tiempo, el coste y el método de excavación) y la profundidad de contención requerida.

Se pueden utilizar diversos tipos de cimentaciones con pilotes para soportar los muros de contención. Para excavaciones profundas, se utilizan muros pantalla y paneles, así como pilotes de hormigón perforados, donde los pilotes se entrelazan (secantes) o se instalan uno junto al otro (contiguos). Para excavaciones superficiales y temporales, se suelen utilizar tablestacas y muros de postes rey

Muros Estructurales: estos corresponden a muro contruidos de hormigón que presentan características de flexibilidad debido a que su cuerpo trabaja en tipo función voladizo la relación del espesor del mismo va en función de su altura de tal manera mayor altura mayor espesor

Sus características físicas corresponden a una cimentación o talón que se apoya dentro del terreno por lo cual los dos elementos trabajan en conjunto brindando mayor estabilidad y resistencia

Los elementos anteriormente mencionados sirvieron para definir el tipo de estructura que se busca diseñar y también serán aplicados en la metodología con el fin de permitir una concepción del diseño del muro de una forma más técnica y práctica.

Contexto Normativo internacional

A nivel internacional, el Estándar Global de la Industria para la Gestión de Relaves (GISTM, 2020) enfatiza el diseño y operación de instalaciones de relaves con el objetivo de prevenir fallas catastróficas, incorporando mejores prácticas en estabilidad, monitoreo y planes de emergencia. Si bien el presente diseño es de escala menor, adopta principios acordes como asegurar factores de seguridad elevados, drenaje adecuado y flexibilidad de la estructura (características intrínsecas del muro de gaviones) para minimizar el riesgo, ahora el estándar maneja temas cruciales que permitirán adoptar practicas mucho más eficientes y seguras dentro de las cuales se encuentran las siguientes:

Ilustración 15 Estándar practicas eficientes

Participación significativa de las personas afectadas por el proyecto durante todo el ciclo de vida de la instalación de relaves mineros.

- Aumento de los requisitos relacionados con los derechos humanos.

Fortalecimiento de los requisitos de protección ambiental, incluida una mayor atención a los efectos cambiantes del cambio climático en las instalaciones de relaves mineros y la restauración.

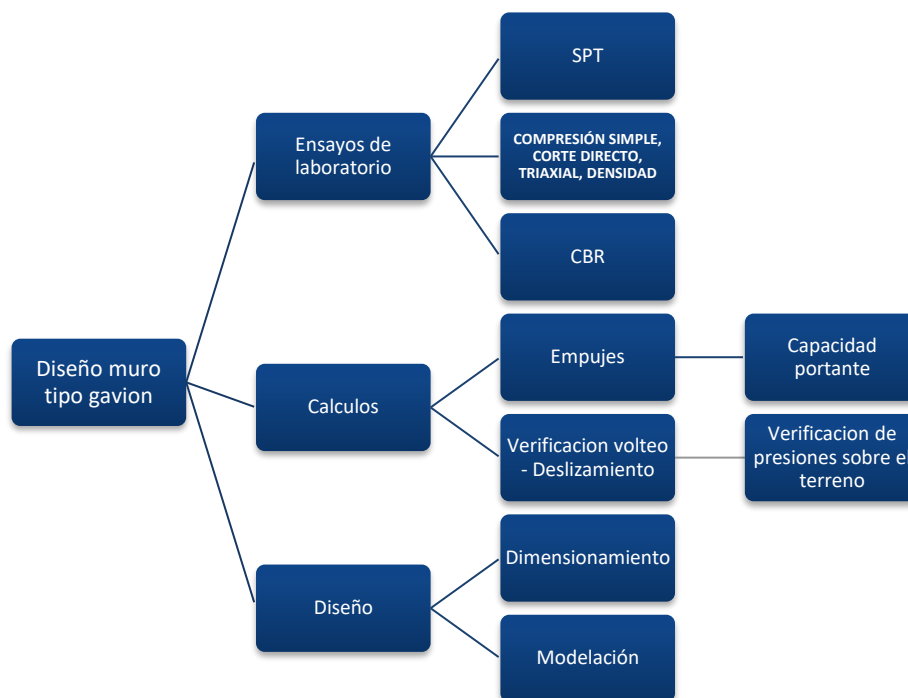
- Aplicación de un enfoque estructurado y sólido para la clasificación de riesgos de las instalaciones ya en funciones y aquellas por construirse.

Establecimiento de un mecanismo de gobernanza para la gestión de las instalaciones de relaves, así como la identificación de la responsabilidad de alto nivel para la implementación del Estándar

Metodología

En este capítulo se definirán los parámetros de diseño, la geometría del muro, se calcularán los empujes y los correspondientes factores de seguridad con la finalidad de presentar el diseño final del muro.

Ilustración 16 Proceso metodológico para la elaboración del proyecto



Ensayos de laboratorio: Estos ensayos y muestreos fueron suministrados por la compañía Continental Gold mediante un estudio geotécnico que realizó la consultoría Integral Ingenieros Consultores en octubre de 2019 y cuya información se adjuntará como anexo a este trabajo de investigación.

Se realizó la recolección de las muestras tomadas en el estudio geotécnico correspondientes a los siguientes ensayos:

- SPT

- CBR
- Compresión simple
- Corte directo
- Triaxial
- Densidad

los cuales fueron tratados, organizados e identificados previamente con la finalidad de determinar las siguientes características del suelo:

Los materiales encontrados en la zona de estudio corresponden principalmente a depósitos de vertiente, conformado por gravas y una matriz limo-arenosa, este tipo de suelos es susceptible a procesos superficiales como erosión laminar, surcos, cárcavas o en mayor escala, a partir de los 6 m de profundidad aproximadamente se presentan los horizontes de meteorización transición suelo-roca y roca meteorizada de las Diabasas de San José de Urama, que consiste en rocas ígneas volcánicas meteorizadas, y que cuenta con mejores características de resistencia al corte.

En general se observa que el terreno tiene gravas sin plasticidad que corresponden al depósito de vertiente superficial encontrado en el sitio, con un porcentaje de gravas que entre el 82% y 89%, de arenas entre el 7,6% y 12,3% y de finos entre 3,14% y 5,3%. La fracción fina no presenta plasticidad, por lo que es un material principalmente friccionante del ensayo SPT se obtuvo una cohesión de 13,4 kPa y una fricción de 43,9°, el peso del terreno corresponde a 1.5 t/m³. (ver anexo 1)

Parámetros de diseño

Se tendrán en cuenta las siguientes características del suelo y de los gaviones para la correcta elaboración del diseño y su posterior verificación.

Tabla 1 *propiedades físicas y mecánicas del suelo*

Propiedades físicas y mecánicas del suelo		
Peso del terreno	γ_s	1,50 tn/m ³
Peso de la piedra	γ_r	2,50 tn/m ³
Ángulo de fricción	ϕ	43,90°
Ángulo que forma el relleno	β	38,00°
Capacidad portante	σ_c	0,85 kg/cm ²

Tabla 2 *Propiedades y características del gavión*

Propiedades y características del gavión		
Peso del concreto	γ_c	1,50 tn/m ³
Peso de la piedra	γ_p	2,50 tn/m ³
Porosidad del gavión	n	25%
Malla y diámetro del alambre	β	8*10cm ϕ 2.7 mm

Los datos anteriormente en relación a las propiedades y características del gavión corresponden a lo estipulado en la norma a INV E-506 del INVIAS. (INVIAS, 2019)

Geometría del muro

De acuerdo en las características del terreno se procede a seleccionar una geometría adecuada para los gaviones y la ubicación de las cajas que posteriormente serán sometidas a un análisis el cual permitirá identificar si el diseño es funcional para la zona de estudio.

El predimensionamiento de la base se realiza mediante la siguiente formula:

$$B = \frac{1}{2}(1 + H_T)$$

$$B = \frac{1}{2}(1 + 7)$$

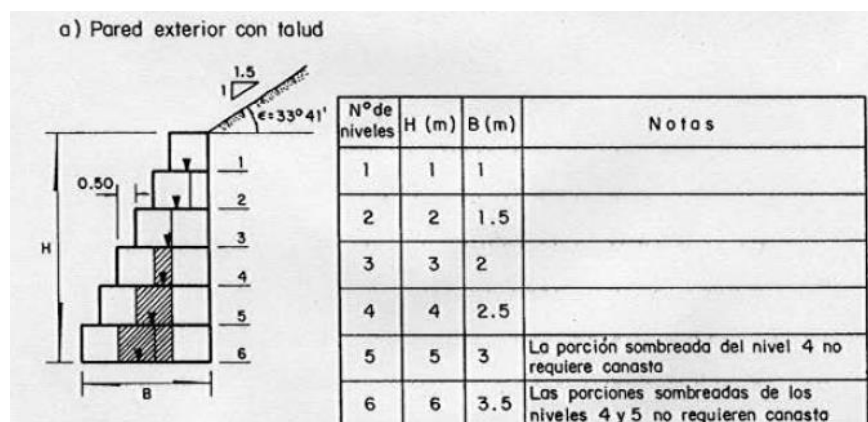
$$B = 4m$$

Donde

H_T es la altura total del muro

Ahora teniendo la altura total del muro y la longitud de la base se dispone a realizar la geometría según (Franco, 2001) esta sería una geometría adecuada para muros de más de 4m

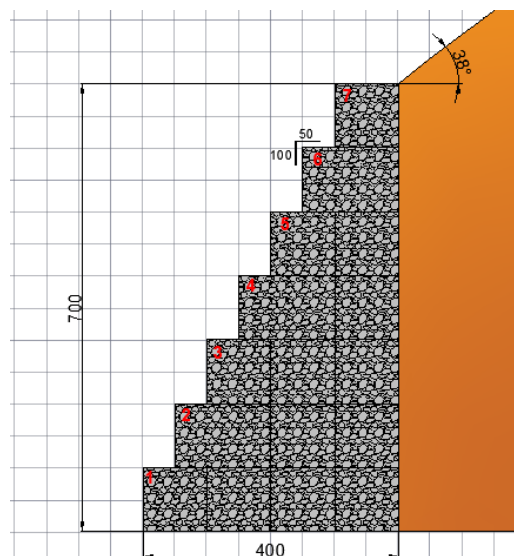
Ilustración 17 Geometría del muro



Nota: Tomado de Manual de gaviones

Por lo cual se propone la siguiente geometría:

Ilustración 18 Geometría de diseño



Teniendo una propuesta de geometría es necesario verificar que esta resista la carga a la que es sometida por el terreno, para lo cual se utilizara la metodología propuesta en el libro Manual de Gaviones del Ingeniero Víctor Franco (Franco, 2001) en el capítulo 5 “muros de contención”.

Resultados y discusión.

Empujes.

Coeficiente de empuje activo: se realizará la determinación de este coeficiente mediante la siguiente ecuación.

$$K_a = \cos \beta * \left(\frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \right)$$

$$K_a = \cos 38 * \left(\frac{\cos 38 - \sqrt{\cos^2 38 - \cos^2 43.9}}{\cos 38 + \sqrt{\cos^2 38 - \cos^2 43.9}} \right)$$

$$K_a = 0.334$$

Donde

K_a coeficiente de empuje activo.

β Angulo formado por el plano del empuje y la horizontal en grados.

ϕ Angulo de fricción interna del material.

Empuje activo: se realizará la determinación de este valor mediante la siguiente ecuación.

$$E_A = \frac{1}{2} * K_a * \gamma_s * H_T^2$$

$$E_A = \frac{1}{2} * 0.334 * 1.50 * 7$$

$$E_A = 12.27 \text{ t/m}$$

Donde

E_a empuje activo, en t/m

K_a coeficiente de empuje activo

γ_s peso específico del suelo, en t/m³

H_T altura del muro en m

Altura de aplicación del empuje activo:

$$Y = \frac{H_T}{3} =$$

$$Y = \frac{7}{3} = 2.333 \text{ m}$$

Análisis de la estabilidad

Mediante la siguiente tabla se logra determinar el cálculo del peso total y el momento resistente para cada uno de los cajones

Tabla 3 *Análisis de estabilidad*

FIG.	TIPO	ÁREA (m ²)	PESO UNITARIO	PESO PARCIAL	BRAZO X (m)	MOMENTO (tn-m)
1	Gavión	4,000	2,50 tn/m ³	10,00 tn/m	3,500	35,0000
2	Gavión	3,500	2,50 tn/m ³	8,75 tn/m	3,000	26,2500
3	Gavión	3,000	2,50 tn/m ³	7,50 tn/m	2,500	18,7500
4	Gavión	2,500	2,50 tn/m ³	6,25 tn/m	2,000	12,5000
5	Gavión	2,000	2,50 tn/m ³	5,00 tn/m	1,500	7,5000
6	Gavión	1,500	2,50 tn/m ³	3,75 tn/m	1,000	3,7500
7	Gavión	1,000	2,50 tn/m ³	2,50 tn/m	0,500	1,2500
			Σ =	43,75 tn/m	Σ =	105,000

De la tabla anterior se logra concluir:

- Peso total (P) = **43.75 tn/m**
- Momento resistente (M_r) = **105 tn/m**

Una vez obtenidos los anteriores datos procedemos a determinar las fuerzas actuantes en el muro de contención.

El momento producido por el empuje activo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M_A = E_A * Y$$

$$M_A = 12.27 * 2.333$$

$$M_A = \mathbf{28.628 \text{ tn/m}}$$

Donde

E_A empuje activo en tn/m

Y altura de aplicación del empuje activo en m

Ahora se procede a realizar las verificaciones correspondientes a deslizamiento, volteo y presiones sobre el terreno

Verificación por deslizamiento: de acuerdo con (Franco, 2001) En ningún de los casos el cociente de las fuerzas de estabilización podrá ser menor que el coeficiente de deslizamiento que hay entre el terreno y el muro por lo cual este deberá ser igual o mayor a 1.5. el autor también recomienda que debido a la altura de diseño del muro este tenga una inclinación de 6° de tal manera.

$$E_y = E_a \sin(90^\circ + \delta - \beta)$$

$$E_h = E_a \cos(90^\circ + \delta - \beta)$$

$$E_y = 12.27 * \sin(90^\circ + 43.9^\circ - 38^\circ) = \mathbf{12.2 \text{ tn/m}}$$

$$E_h = 12.27 * \cos(90^\circ + 43.9^\circ - 38^\circ) = \mathbf{9.7 \text{ tn/m}}$$

Donde,

E_a Empuje activo

β Angulo formado por el plano del empuje y la horizontal en grados.

$\emptyset$ Angulo de fricción interna del material

Ahora es necesario identificar el peso específico de los gaviones, este cálculo se determinará mediante la siguiente formula:

$$Y_g = Y_s(1 - n)$$

$$Y_g = 2.5(1 - 0.25) = \mathbf{2\ t/m^3}$$

El peso del muro de retención, por unidad de ancho corresponde a

$$W = (\text{Área de la sección del muro}) * Y_g$$

$$W = 17m^2 * (2t/m^3) = \mathbf{34t/m}$$

Una vez realizados los cálculos, se procede a realizar la evaluación de estabilidad del muro tipo gavión, esta evaluación debe cumplir con los siguientes factores:

- Factor de seguridad por deslizamiento
- Factor de seguridad por volcamiento
- Factor de seguridad capacidad portante
- Factor de seguridad por excentricidad

Estos factores nos permiten comprobar si el muro es estable, ahora es necesario que cada factor de seguridad cumpla la condición mínima estipulada en la norma NSR-10 título H

- Verificación deslizamiento

Se procede a determinar el coeficiente de deslizamiento mediante la siguiente ecuación

$$C_D = \frac{[(W + E_v)\cos\alpha + E_h\sin\alpha]\tan\phi + (W + E_v)\sin\alpha + CB}{E_h\cos\alpha}$$

$$C_D = \frac{[(34 + 12.2)\cos 6^\circ + 9.7 \sin 6^\circ]\tan 43.9^\circ + (34 + 12.2)\sin 6^\circ + 1.36 * 4}{9.7\cos 6^\circ}$$

$$C_D = \mathbf{5.74 \geq FSV\ 1.5\ Cumple}$$

Se logra identificar que el coeficiente de desplazamiento es mayor a 1.6 lo cual nos indica que cumple, por que en ningún caso el cociente de las fuerzas estabilizantes y desestabilizantes debe ser menor que el coeficiente de deslizamiento entre el terreno donde se construye el muro y este.

Verificación por volcamiento

este cálculo se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{M_r}{M_A} \geq FSV$$

$$C_v = \frac{105}{28.628} = \mathbf{3.67 \geq FSV 2.0 \text{ Cumple}}$$

Donde,

M_r Momento resistente

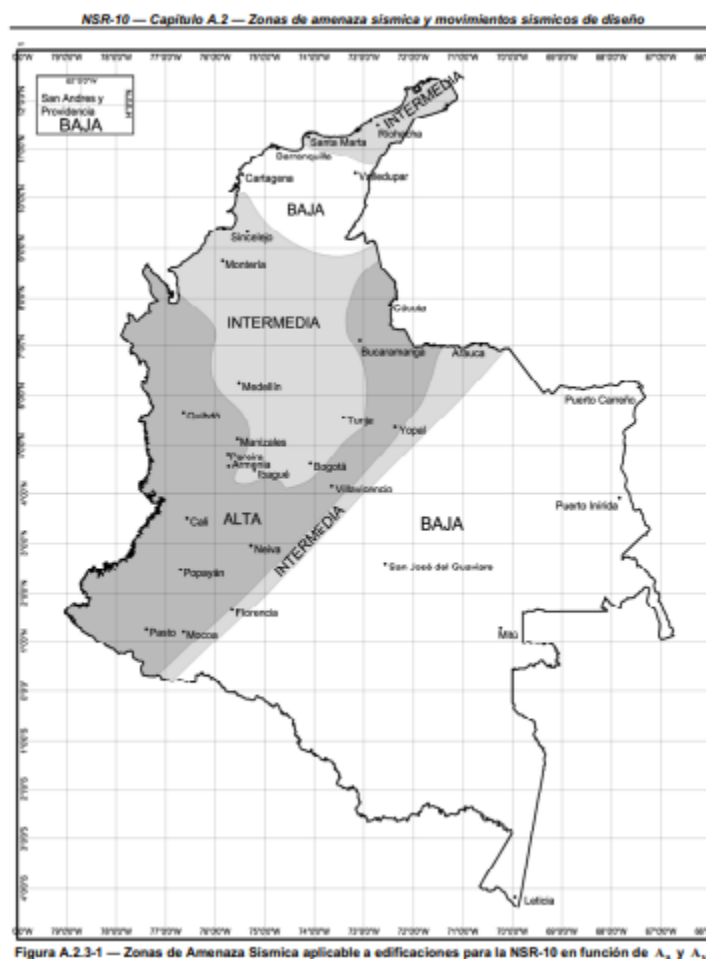
M_a Momento empuje activo

Se obtienen un coeficiente de 3.67 que cumple con lo establecido en la NSR-10, este coeficiente nos indica que en ningún caso el momento de volteo producido por las fuerzas desestabilizantes debe ser mayor que el momento resistente generado por las fuerzas estabilizantes

Análisis sísmico del diseño

Teniendo en cuenta que el departamento de Antioquia se identifica como una zona de amenaza sísmica intermedia, esto de acuerdo con la norma técnica (NSR-10, 2023)

Ilustración 19 Zonas de amenaza sísmica NSR10



Nota: Tomado de NSR10 Capítulo A2

Es importante realizar un análisis seudoestático que permita identificar que el diseño del muro pueda soportar las fuerzas desestabilizantes producidas por un sismo, para realizar este análisis es importante realizar los siguientes cálculos:

Cálculo del coeficiente sísmico horizontal

$$K_h = \frac{A_s}{R}$$

$$K_h = \frac{0.15}{1} = 0.15$$

Nota: Para muros de contención, generalmente se usa un coeficiente $R=1.0$

Donde:

A_s = Coeficiente de aceleración sísmica del sitio (según la NSR-10, Tabla A.3-2).

R = Factor de reducción de respuesta o ductilidad.

Cálculo del coeficiente sísmico vertical

$$K_v = \frac{2}{3} K_h$$

$$K_v = \frac{2}{3} 0.15 = 0.1$$

Cálculo del Empuje Activo Sísmico: Mononobe-Okabe

El empuje sísmico del suelo se obtiene mediante la Teoría de Mononobe-Okabe (M-O), que extiende el modelo de Coulomb para condiciones sísmicas, de tal manera se procede a calcular:

Modelo activo dinámico

$$K_a^e = \frac{\cos^2(\varphi - \theta - \eta)}{\cos \eta \cos^2 \theta * \cos(\delta + \theta + \eta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) * \sin(\varphi - \alpha - \eta)}{\cos(\delta + \theta + \eta) * \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2}$$

$$K_a^e = \frac{\cos^2(43.9 - 6 - 9.46)}{\cos 9.46 \cos^2 6 * \cos(22 + 6 + 9.46) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(43.9 + 22) * \sin(43.9 - 38 - 9.46)}{\cos(22 + 6 + 9.46) * \cos(38 - 6)}} \right]^2}$$

$$= 0.667$$

Donde

φ Angulo de fricción interna del suelo 43.9°

θ Angulo de cara del muro con la horizontal 6°

δ Angulo de fricción material vs suelo $\frac{1}{2} \varphi = 22^\circ$

α Angulo vertical entre el muro y el relleno 38°

$$\eta = \tan^{-1} \left(\frac{Kh}{1 - Kv} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.15}{1 - 0.1} \right) = 9.46^\circ$$

Empuje activo sísmico

$$P_a^e = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a^e$$

$$P_a^e = \frac{1}{2} * 1.50 * 7^2 * (0.667) = 24.51$$

Donde:

γ = Peso unitario del suelo en t/m³

H = Altura del muro 7m

K_a^e = Coeficiente activo dinámico 0.667

Verificación de Deslizamiento y Volcamiento

- Resistencia al deslizamiento

$$F_r = \mu * W$$

$$F_r = 0.96 * 43.75 = 42$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción entre la base del muro y el suelo. $\tan 43.9^\circ = 0.96$

W = Peso del muro t/m

- Factor de seguridad contra deslizamiento

$$FS_{des} = \frac{F_r}{P_a^e}$$

$$FS_{des} = \frac{42}{24.51} = \mathbf{1.71 \text{ Cumple}}$$

Del análisis de deslizamiento se logra obtener un factor de seguridad optimo el valor obtenido para el diseño es de 1.87 en condiciones estáticas (≥ 1.5) y en condiciones sísmicas (≥ 1.1), esto de acuerdo con los parámetros establecidos en (NSR-10, 2023)

Análisis de volcamiento

El volcamiento corresponde a la relación desproporcionada de los momentos desestabilizadores sobre los estabilizadores de tal manera se procede a calcular:

- Momento desestabilizador

$$Md = P_a^e * \frac{H}{3}$$

$$Md = 24.51 * \frac{7}{3} = 57.19$$

- Momento estabilizador

$$Me = W * e$$

$$Me = 43.75 * 2.7 = 118.125$$

Donde:

e = Distancia del centro de gravedad del muro desde la base (momento total/peso del muro) 2.7 m

- Factor de seguridad contra volcamiento

$$FS_{vol} = \frac{Me}{Md}$$

$$FS_{vol} = \frac{118.25}{57.19} = \mathbf{2.07 \text{ Cumple}}$$

Del anterior análisis se logra identificar que el factor de seguridad del diseño 2.01 cumple con los parámetros normativos para las condiciones estáticas (≥ 2.0) y sísmicas (≥ 1.5) esto de acuerdo con los parámetros establecidos en (NSR-10, 2023)

- Verificación capacidad portante

Para poder identificar las tensiones es necesario encontrar el punto de aplicación de la fuerza resultante, este cálculo se llevará a cabo mediante la siguiente formula

$$X_0 = \frac{M_r - M_A}{P} =$$

$$X_0 = \frac{105 - 28.628}{43.75} = 1.75 \text{ m}$$

Donde,

M_r Momento resistente

M_a Momento empuje activo

P Peso total

De acuerdo con este valor, la resultante se localiza dentro del tercio medio de la base por lo cual se reduce la sección de trabajo de la base, como puede ocurrir en los muros con gaviones por su gran flexibilidad; por lo cual la excentricidad real valdrá en este caso.

Ahora se procede a calcular la excentricidad de la fuerza resultante mediante la siguiente formula

$$e = \frac{B}{2} - X_0$$

$$e = \frac{4m}{2} - 1.75m = 0.254m$$

Para este caso se debe obtener un cumplimiento el cual debe quedar sobre el tercio central del muro, para ello se puede realizar el cálculo de la siguiente formula que debe ser menor.

$$e < \frac{B}{6} = 0.666$$

$$0.254 < 0.666 \text{ Cumple}$$

Resultados obtenidos de las verificaciones

Tabla 4 Verificación factores de seguridad

Verificación	Criterio NSR10	Valor obtenido	Cumple
Deslizamiento estático	≥ 1.5	5,74	SI
Deslizamiento sismo	≥ 1.1	1,71	SI
Volcamiento estático	$\geq 2,0$	3,67	SI
Volcamiento sismo	$\geq 1,5$	2,07	SI
Excentricidad	$\leq B/6$ (0,666)	0,254	SI
Capacidad portante	$\geq 1,5$	1,75	SI

Del diseño se logra determinar, que la geometría propuesta cumple con los parámetros necesarios para soportar las fuerzas desestabilizantes del terreno, toda vez que las verificaciones de deslizamiento, volcamiento, excentricidad y capacidad portante fueron satisfactorias en concordancia con los parámetros establecidos por la NSR10.

Una vez establecido el diseño se procede a modelar el perímetro con la finalidad de conocer la longitud del depósito de relave para proyectar un presupuesto que nos permita identificar los costos y si efectivamente este tipo de muro es la opción más eficiente en términos técnicos y económicos.

El perímetro en total del depósito corresponde a 900 m aproximadamente por lo cual el presupuesto se proyectará con base en esta longitud, el análisis de precios unitarios corresponde al INVIAS Antioquia (INVIAS, 2024)

Tabla 5 Presupuesto muro gavión

ITEM	DESCRIPCION	UNIDA D	CANTIDA D TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	Instalación de Geomembrana HDPE de 60 mil IDS, Super Gripnet AGRU o equivalente	M2	19.000,00	\$ 13.010	\$ 247.190.000
2	Instalación de cama de material fino para instalacion de geomebranas sobre enrocado.	M2	6.000,00	\$ 22.354	\$ 134.124.000
3	Instalación de gaviones de 1mx1mx1m y 1mx1mx1,5m. Incluye la selección de material e instalación del mismo en los gaviones (Rocas de tamaño entre 100 mm y 200 mm)	M3	12.600,00	\$ 100.913	\$ 1.271.503.800
4	Instalación de relleno general de roca reforzado con material de la excavaciones sobre geomembrana, con retiro de sobretamaños a 250mm.	M3	15.120,00	\$ 59.140	\$ 894.196.800
5	Instalación de relleno general de roca , con retiro de sobretamaños a 250mm.	M3	6.200,00	\$ 48.022	\$ 297.736.400
6	Suministro e instalación de acero de refuerzo figurado para las cunetas de concreto.	KG	5.600,00	\$ 9.630	\$ 53.928.000
7	Construcción de cunetas en sección V sobre gabiones o rellenos compactados. ; incluye la instalación del concreto, la formaleta y el curado, así como la excavación y la perfilada del material.	M3	230,00	\$ 206.503	\$ 47.495.690
8	Construcción de cunetas en sección U en la base de gaviones o rellenos compactados. ; incluye la instalación del concreto, la formaleta y el curado, así como la excavación y la perfilada del material.	M3	200,00	\$ 319.871	\$ 63.974.200
10	INSTALACIÓN GEOMALLA BIAXIAL TENSAR BX 1200 (Gaviones)	M2	34.400,00	\$ 7.955	\$ 273.652.000
11	INSTALACION GEOMALLA BIAXIAL TENSAR BX 1200 (Enrocado drenaje)	M2	74.000,00	\$ 7.955	\$ 588.670.000
SUBTOTAL					\$ 3.872.470.890

	UTILIDAD 3%	\$ 116.174.127
	IVA (s/u) 19%	\$ 22.073.084
	TOTAL (INC. Iva)	\$ 4.010.718.101

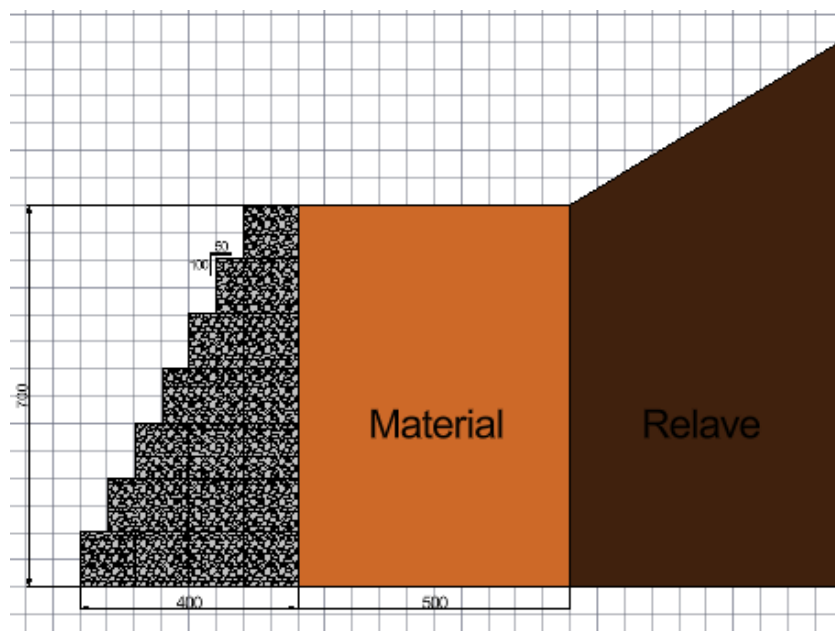
Del anterior presupuesto se logra identificar que el valor total para los 901 m del muro tipo gavión diseñado corresponde a 4.010.718.191 mil millones de pesos M/C incluido IVA es decir que el metro lineal todo costo equivaldría a 4.500.000 de pesos M/C

Vale la pena recalcar que no fue necesario seccionar el diseño debido a que de acuerdo con la normatividad técnica (Asesorías técnicas geológicas, 2020) debe existir un material aislante entre el muro de contención y el relave, este a su vez debe ser recubierto por una geomembrana, lo cual permitió que mediante un movimiento de tierras la cota fuera de 7 m para todo el talud.

Del anterior presupuesto se logra identificar que el valor total para los 901 m del muro tipo gavión diseñado corresponde a 4.010.718.191 mil millones de pesos M/C incluido IVA es decir que el metro lineal todo costo equivaldría a 4.500.000 de pesos M/C

Vale la pena recalcar que no fue necesario seccionar el diseño debido a que de acuerdo con la normatividad técnica (Asesorías técnicas geológicas, 2020) debe existir un material aislante entre el muro de contención y el relave, este a su vez debe ser recubierto por una geomembrana, lo cual permitió que mediante un movimiento de tierras la cota fuera de 7 m para todo el talud.

Ilustración 20 Material de separación del relave



Para el proceso de modelación es importante comprender la capacidad máxima del depósito de relave seco, mediante la Resolución No. 2179 del 25 de septiembre de 2023 (CORANTIOQUIA, 2024) CORANTIOQUIA autoriza la construcción de un depósito de relave seco con capacidad de 6 Mm³ con una altura máxima de 50 m.

La unidad de ensamblaje fue realizada con las siguientes características

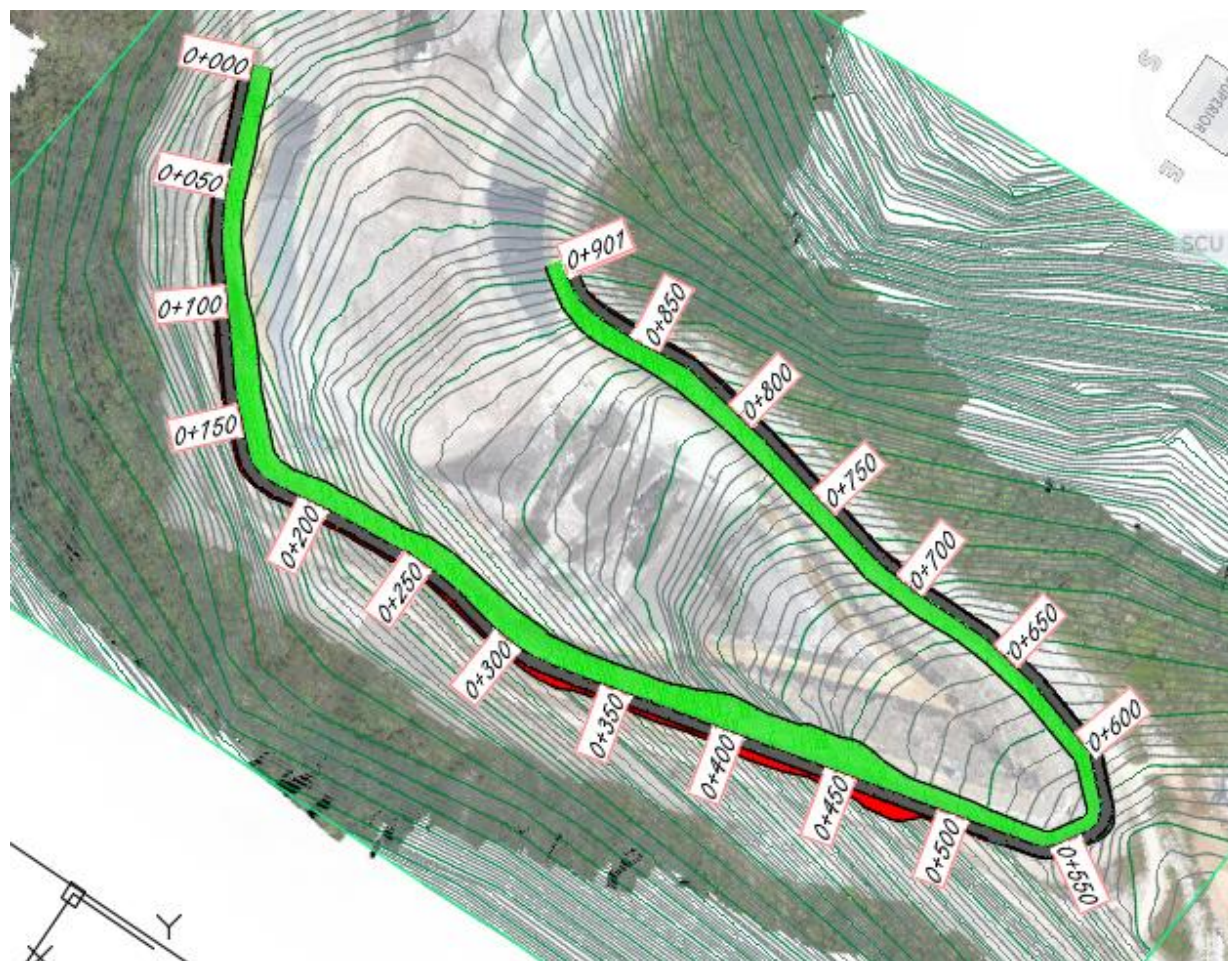
- Ancho de base 4m
- Altura 7m
- Gavión tipo A 1*1 m
- Gavión tipo B 1.5*1 m
- Inclinación 6°

Ilustración 21 Gavión de ensamblaje



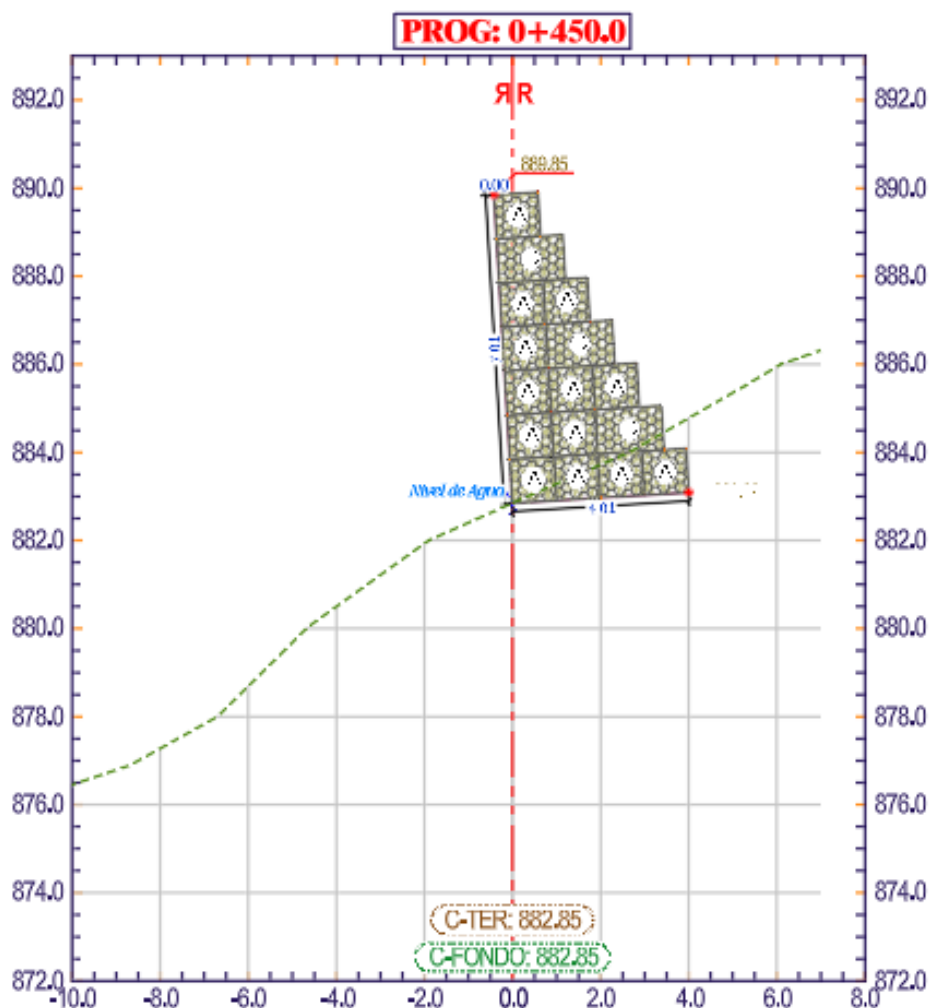
Una vez realizada la modelación del muro mediante el software Civil3D se logra determinar que la longitud total del muro corresponde a 901 m, el área representada con el achurado verde nos indica el lugar de disposición de la primera capa de material de soporte para el relave y el achurado rojo nos muestra aquellas áreas que requieren corte.

Ilustración 22 Muro gavión en planta



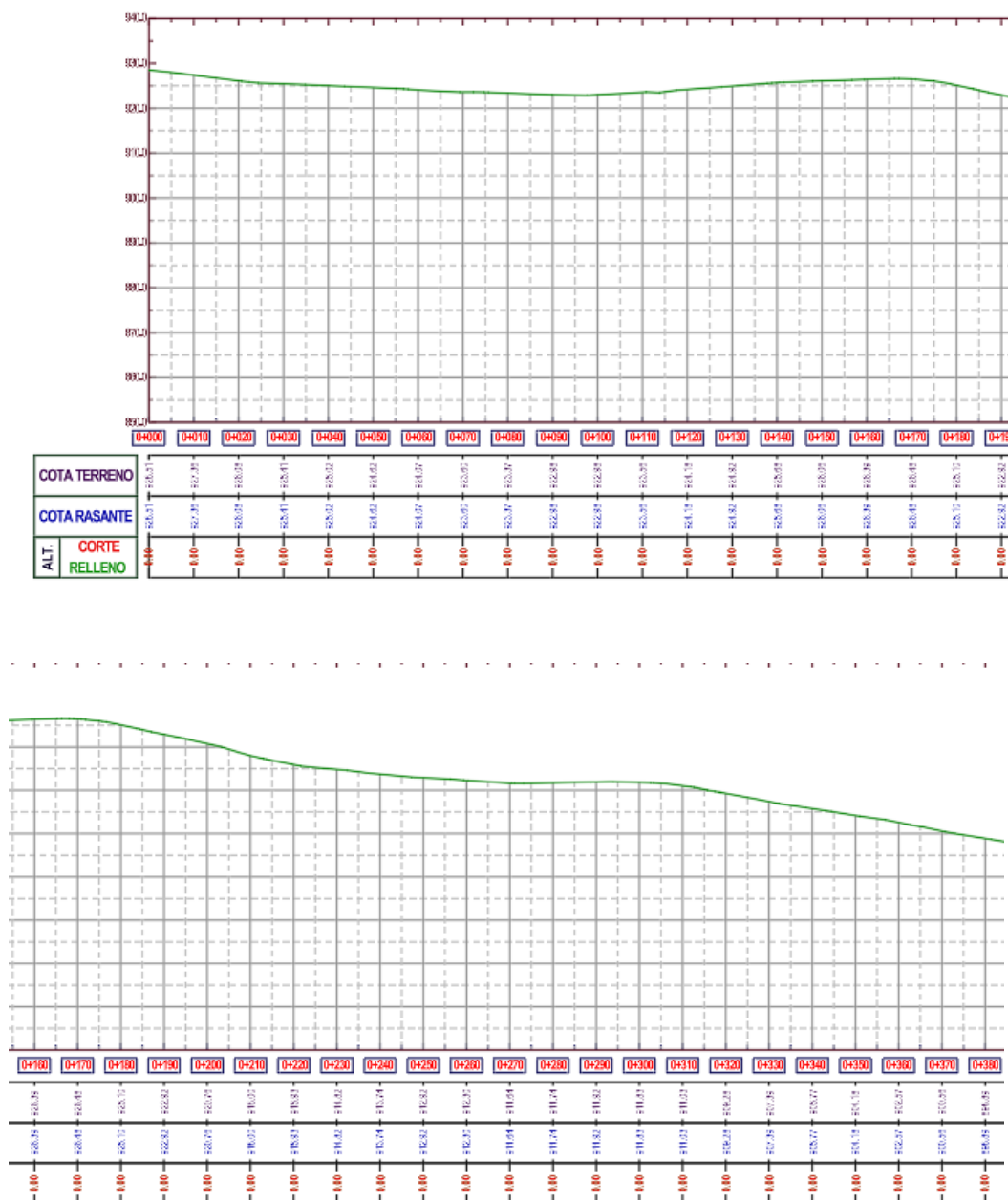
El sector crítico se encuentra en el PR 450 AL PR 480 donde se requieren aproximadamente 450 m³ de corte

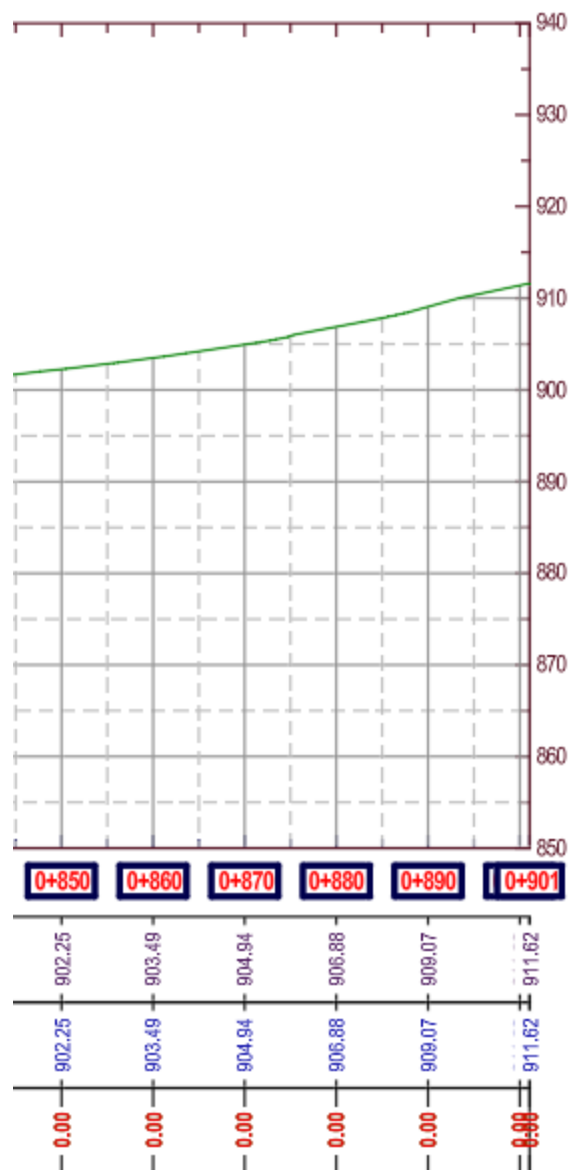
Ilustración 23 *Sección de corte*



Del terreno se puede evidenciar que la zona donde se llevaría a cabo la construcción no tiene una diferencia considerable de altitud, oscilando en su punto más alto en los 928 msnm y el punto más bajo a los 863 msnm

Ilustración 24 Perfil del muro gabi3n





Conclusiones

Para la elaboración de un diseño tipo gavión es fundamental disponer de un estudio de suelos detallado que permita conocer las características mecánicas y físicas del mismo para definir los parámetros de diseño del muro, en este caso el estrato disponía de una transición suelo - roca que genera alta resistencia al corte lo cual es beneficioso y optimiza la función del muro de contención.

Mediante los manuales de diseño de muros de contención (Macaferri, 2005), (Franco, 2001) se logra definir una geometría adecuada para el diseño del muro de contención que una vez sometida a todos los tipos de falla como los son volteo, deslizamiento, global, etc. Cumplió con los estándares definidos en estos manuales y garantizara que el muro resista el empuje que genera el material que contiene el relave.

Mediante la elaboración del diseño del muro se pudo evidenciar que el tipo gavión tiene ciertas ventajas sobre los demás, una de las ventajas es que su estructura proporciona al muro flexibilidad debido a que la malla tiene un comportamiento dúctil ante los movimientos que generan las fuerzas de empuje, pero a su vez su estructura se mantiene integra, lo cual evita rupturas.

Otro punto importante consiste en la permeabilidad puesto que la porosidad de la estructura evita que se generen presiones inducidas por niveles freáticos lo cual evita que se genere una falla estructural

El proceso de construcción del muro de gavión se caracteriza por ser rápido y efectivo, es decir tienen un funcionamiento inmediato, el proceso de construcción de este no requiere de mano de obra calificado y se puede realizar bajo cualquier tipo de condición climatológica.

Para el muro en cuestión se proyectó un presupuesto el cual es de valor de \$2.480.142.500 ahora en suponiendo una relación costo – beneficio entre otras opciones como

son un muro tipo pantalla se puede decir que se incrementaría el presupuesto el doble y el beneficio sería el mismo por lo tanto el muro tipo gavión es la opción más económica y eficiente.

En relación con la durabilidad de acuerdo con (Fracassi, 2018) el muro tipo gavión que no es sometido al salitre del agua salada puede llegar a durar más de 50 años sin embargo existen nuevos tipos de mallas recubiertas con PVC que pueden hacer que se triplique el tiempo útil por lo tanto la relación costo – durabilidad es satisfactoria puesto que este tipo de muro no requieren de un mantenimiento constante.

En relación con los factores de seguridad sugeridos por la normatividad del Instituto Nacional de Vías “INV-681-13” (INVIAS, 2024) considera los siguientes parámetros para determinar si el muro de contención tipo gavión es seguro

Diseño: en relación con el diseño se logró garantizar mediante los cálculos anteriormente realizados que el muro no se va a desplazar o volcar, también el muro podrá resistir la presión lateral de la tierra o en este caso el relave.

También se logró determinar que el peso del muro no sobrepasara la capacidad de carga del terreno

Recubrimiento: con relación a este aspecto se sugiere por parte del diseñador la implementación de gaviones clase 3 y 4 que cuentan con un recubrimiento (cloruro de vinilo) (PVC) y a su vez que se usen de acuerdo a las características empleadas en los parámetros de diseño del muro.

Resistencia a la presión lateral: este aspecto ya comprende el proceso de llenado de los gaviones por lo cual se recomienda que las rocas utilizadas tengan una resistencia a la compresión simple superior a 250 veces el nivel de esfuerzos a que estará sometida la estructura.

Mediante el programa Civil3D se logró realizar la modelación de la estructura, este programa permite simular varios parámetros que conllevan al diseñador a identificar mejoras sustanciales en el alineamiento, es decir el sitio por donde estar dispuesto el muro, estas mejoras son en razón a las actividades de relleno y corte, con el fin de disminuir costos y minimizar el impacto en el medio ambiente.

Este proyecto de investigación sin duda alguna represento un desafío personal en relación a que la mayoría de proyectos constructivos de muros de contención son consecuencia de un accidente geográfico, lo cual quiere decir que estas estructuras propenden por garantizar la seguridad de las comunidades y proteger la infraestructura, por lo cual es de suma importancia que todos los cálculos y las verificaciones realizadas se hagan con un control estricto, que se tenga la certeza de que el muro diseñado cumpla el objetivo de soportar la carga impuesta.

En el componente ambiental, el proceso constructivo de las presas de relaves inicia con una excavación de gran magnitud en forma de cuenca, la cual se recubre con geomembrana de 80 mils para garantizar la impermeabilización del sistema. Posteriormente, se instalan drenajes tipo espina de pescado, diseñados con una línea colectora que canaliza las aguas hacia la planta de tratamiento. En este sentido, la mina Zijin Continental Gold cuenta con una moderna Planta de Tratamiento de Agua (WTP), reconocida como una de las más avanzadas de Latinoamérica. Esta instalación realiza un tratamiento en siete etapas, incluyendo un sistema de ósmosis inversa de tres fases con cristalización, logrando un proceso sin vertimiento de residuos líquidos (ZLD), y permitiendo la remoción eficiente de sólidos suspendidos, cloruros y sulfatos.

Posteriormente, se procede con la construcción de diques en material de rezaga, proveniente de los túneles de explotación. Estos diques actúan como primera barrera de contención para el relave. Una vez el nivel del relave supera la altura de los diques de rezaga, se inicia la construcción de los muros de gaviones, los cuales refuerzan el sistema de contención. Es importante destacar que, en todo momento, el relave permanece aislado mediante una geomembrana, con el fin de evitar el contacto del agua de escorrentía con los afluentes cercanos.

Una vez finalizada la etapa de contención, se lleva a cabo el cierre ambiental. Este consiste en recubrir la capa superior del relave con material orgánico en espesores que oscilan entre los 4 y 6 metros, seguido de un proceso de revegetalización. Este sistema doble de protección—geomembrana y cobertura orgánica—cumple una función crítica: la geomembrana previene la infiltración de aguas superficiales hacia cuerpos hídricos cercanos, mientras que la capa vegetal reduce la emisión de partículas contaminantes y evita el contacto del relave con superficies no tratadas.

Bibliografía

- AIDA. (2019). *aida-americas.org*. Obtenido de *aida-americas.org*: <https://aida-americas.org/es/blog/presas-de-desechos-mineros-una-historia-de-fallas>
- ANLA. (2024). *www.anla.gov.co*. Obtenido de *www.anla.gov.co*: https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/proyectos/03_seguimiento/18_buritica/Auto11300_27122021.pdf
- ANM. (2002). *www.anm.gov.co*. Obtenido de *www.anm.gov.co*: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/normativas/guia_mineroambiental_de_exploracion.pdf
- Asesorías técnicas geológicas. (2020). *Lineamientos técnicos de buenas prácticas para estandarizar el manejo de relaves*. Colombia.
- CBR. (20 de 03 de 2025). *www.cbr-ingenieria.com.mx*. Obtenido de <https://blog.cbr-ingenieria.com.mx/>
- continentalgold. (2024). *continentalgold.com*. Obtenido de *continentalgold.com*: <https://www.continentalgold.com/mina-buritica-2021/>
- CORANTIOQUIA. (26 de 02 de 2024). *www.corantioquia.gov.co*. Obtenido de *www.corantioquia.gov.co*: <https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2023/09/ANLA-160HX-COE2309-40452.pdf>
- DANE. (27 de 03 de 2025). *www.dane.gov.co*. Obtenido de *www.dane.gov.co*: https://sitios.dane.gov.co/cnpv/app/views/informacion/perfiles/05113_infografia.pdf
- DAS, B. M. (1985). *Principio de Ingeniería de Cementación*.
- Díaz, J. S. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigación sobre Erosión y Deslizamientos.
- Espitia, J. P. (08 de 2022). *repository.unimilitar.edu.co*. Obtenido de *repository.unimilitar.edu.co*: <https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/234717ad-8cb0-49d5-a285-53a0e02e6611/content>
- Fracassi, G. (10 de 2018). *www.ina.gob.ar*. Obtenido de *www.ina.gob.ar*: https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_285.pdf
- Franco, V. (2001). *Manual de Gaviones*. Ciudad de México: UNAM.
- GISTM. (2020). *www.globaltailingsreview.org*. Obtenido de *www.globaltailingsreview.org*: https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
- Gómez, H. G. (2013). *repositorio.escuelaing.edu.co*. Obtenido de *repositorio.escuelaing.edu.co*: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/53/G%F3mez%20Rodr%EDguez,%20Herney%20Gustavo-2013.pdf;jsessionid=583E9CC65097EB0CC038E614E08F6F43?sequence=1>
- Herrera, L. (2006). *Relaves Mineros y sus Efectos en Salud, Medio Ambiente y Desarrollo Económico. Ejemplo de Relave en el Valle de Chacabuco-Polpaico*. Chile.
- Herrera, L. (2011). *Relaves Mineros y sus Efectos en Salud, Medio Ambiente*. Chile: Universidad Católica de Chile.
- IGAC. (2023). *www.geoportal.igac.gov.co*. Obtenido de *www.geoportal.igac.gov.co*: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- INVIAS. (2019). *INV E-506 Elaboración de canastas de alambre para gaviones y colchogaviones*. Bogotá: INVIAS.

- INVIAS. (26 de 12 de 2024). *www.invias.gov.co*. Obtenido de *www.invias.gov.co*:
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>
- LEY 685. (2001). *www.funcionpublica.gov.co*. Obtenido de *www.funcionpublica.gov.co*:
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202>
- Macaferri. (2005). *Obras de contención manual técnico*. SaoPablo.
- MINAMBIENTE. (2006). *www.minambiente.gov.co*. Obtenido de *www.minambiente.gov.co*:
<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/terminos-de-referencia-para-la-elaboracion-de-estudios-ambientales/>
- MINAMBIENTE. (2018). *www.minambiente.gov.co*. Obtenido de *www.minambiente.gov.co*:
<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/metodologia-general-para-la-elaboracion-y-presentacion-de-estudios-ambientales-mgepea/>
- MINENERGIA. (2020). *Presas de relaves*. Bogota: MINENERGIA.
- NSR-10. (2023). *Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente*. Bogotá.
- Parra, A. R. (2019). *Gobierno privado del oro en Colombia. El caso del municipio de Buriticá, Antioquia*. Medellin: <https://revistas.udea.edu.co/>.
- Peralta, F. N. (2021). *repositorioslatinoamericanos.uchile.cl*. Obtenido de *repositorioslatinoamericanos.uchile.cl*:
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2358124?show=full>
- PTI. (2025). *www.anla.gov.co*. Obtenido de *www.anla.gov.co*:
<https://www.anla.gov.co/eureka/documentos-estrategicos/documentos-tecnicos/1451-exploracion-y-programa-de-trabajos-e-inversiones-pti-mediana-y-gran-mineria>
- Rodriguez, P. J. (2011). *Diseño de estructuras de contención*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- SPDA. (2019). *Desastre ambiental: 67 mil metros cúbicos de relave minero afectaron al río Mantaro*. Peru.
- Suarez, J. (2008). *Deslizamientos: Analisis Geotecnico*. Bogotá.