



**Estudio de los relaves generados en la planta de beneficio de oro de la empresa Mona Minas S.A. mediante el análisis de peligrosidad y proposición de alternativas de revegetación de las relaveras en la fase de cierre y abandono del proyecto minero.**

Johny Ferney Echeverri Rivera

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Ambiental

Tutores

Sergio Esteban Herazo Areiza, Magíster (MSc)

Yony Alejandro Zapata Murillo, Especialista (Esp)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

<b>Cita</b>	(Echeverri Rivera, 2023)
<b>Referencia</b>	Echeverri Rivera, J.F., (2023). <i>Estudio de los relaves generados en la planta de beneficio de oro de la empresa Mona Minas S.A. mediante el análisis de peligrosidad y proposición de alternativas de revegetación de las relaveras en la fase de cierre y abandono del proyecto minero, 2016 – 2023</i> [Semestre de Industria] Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Julio Cesar Saldarriaga Molina

**Jefe departamento:** Lina Berrouët Cadavid

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Con cariño y gratitud, dedico este trabajo a mi familia y pareja, quienes han sido mi fuente de fuerza, sabiduría, paciencia y amor a lo largo de este recorrido. Cada día, su apoyo incondicional ha sido la luz que me ha guiado a través de los desafíos. Sus palabras de aliento y amor inquebrantable han sido mi mayor motivación. Gracias por estar siempre a mi lado. Este logro es de nosotros. ¡Los amo!

## **Agradecimientos**

En este viaje que ha sido mi formación, expreso mi más profundo agradecimiento a aquellos que han dejado una huella en mi camino. A mis padres, hermanos y pareja, mi soporte inquebrantable, mi refugio de amor y sabiduría, les debo el fundamento de quien soy y el éxito que he alcanzado. A mis amigos y compañeros, quienes se convirtieron en aliados valiosos en la búsqueda constante de conocimiento, aportando claridad en los momentos de incertidumbre y ofreciendo su mano cuando me sentía perdido.

A la Universidad, por abrirme sus puertas y proporcionarme las herramientas para alcanzar una de mis metas más preciadas: la formación académica. A la empresa Mona Minas S.A., donde encontré no solo un lugar de trabajo, sino un tesoro de conocimiento compartido por individuos excepcionales que contribuyeron significativamente a este proyecto.

Y a todos aquellos cuyos nombres no alcanzo a mencionar pero que, de una forma u otra, dejaron su huella en este camino, les doy las gracias por acompañarme en esta travesía de aprendizaje y crecimiento.

## Tabla de contenido

Resumen .....	10
Abstract .....	11
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	15
1.1. Objetivo general .....	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
2. Marco teórico .....	16
3. Metodología .....	20
3.1. Etapa 1: Caracterización de los relaves mineros .....	21
3.1.1. Recolección de muestras de relaves .....	21
3.1.2. Análisis de propiedades fisicoquímicas de los relaves.....	24
3.1.3. Evaluación de peligrosidad de los relaves.....	26
3.2. Etapa 2: Selección de especies vegetales y técnicas de revegetación .....	29
3.2.1. Investigación y recopilación de información sobre especies vegetales .....	29
3.2.2. Selección de especies vegetales y evaluación de compatibilidad con relaves .....	30
3.2.3. Identificación de técnicas de revegetación.....	31
3.3. Etapa 3: Elaboración de la propuesta de revegetación .....	32
4. Resultados .....	33
4.1. Caracterización de los relaves .....	33
4.1.1. Resultados de pruebas de peligrosidad y comparación con la normativa .....	33
4.1.2. Análisis de resultados de las pruebas realizadas .....	36
4.1.3. Evaluación de peligrosidad de los relaves.....	36
4.2. Selección de especies vegetales y técnicas de revegetación .....	37
4.2.1. Selección de especies vegetales .....	37

4.2.2. Técnicas de revegetación recomendadas.....	50
4.3. Propuesta de revegetación.....	51
4.3.1. Uso potencial del suelo.....	51
4.3.2. Preparación del terreno a revegetar.....	52
4.3.3. Siembra.....	53
5. Análisis.....	56
6. Conclusiones.....	58
7. Recomendaciones.....	60
Referencias.....	61
Anexos.....	64

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Métodos, técnicas analíticas y equipos empleados por el laboratorio.....	25
<b>Tabla 2.</b> Algunas consideraciones para la selección de especies de plantas .....	31
<b>Tabla 3.</b> Limitaciones para siembra con diferentes técnicas de plantación.....	32
<b>Tabla 4.</b> Resultados de la caracterización fisicoquímica.....	33
<b>Tabla 5.</b> Resultados de la caracterización de reactividad .....	34
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la caracterización de reactividad al agua .....	34
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la caracterización de corrosividad (reserva ácido - álcali y corrosión al acero).....	34
<b>Tabla 8.</b> Resultados de la caracterización de toxicidad en el lixiviado para metales pesados - TCLP. ....	35
<b>Tabla 9.</b> Resultados de la caracterización de Toxicidad aguda en Daphnia Magna .....	35
<b>Tabla 10.</b> Resultados de la prueba de ecotoxicidad – algas Chlorella vulgaris.....	35
<b>Tabla 11.</b> Análisis del blanco de viaje.....	36
<b>Tabla 12.</b> Descripción del ambiente del perfil .....	41
<b>Tabla 13.</b> Descripción del perfil del suelo.....	42
<b>Tabla 14.</b> Coberturas vegetales presentes en la zona de estudio según metodología CCL.....	43
<b>Tabla 15.</b> Especies presentes en los Pastos Limpios .....	44
<b>Tabla 16.</b> Especies presentes en Pastos Enmalezados.....	44
<b>Tabla 17.</b> Especies presentes en el Bosque Fragmentado .....	44
<b>Tabla 18.</b> Familias y especies vegetales recomendadas para la revegetación.....	48

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama proceso de generación de Relaves .....	16
<b>Figura 2.</b> Fracciones de un relave minero .....	17
<b>Figura 3.</b> Esquema básico en planta de una relavera .....	17
<b>Figura 4.</b> Diagrama de flujo con metodología empleada .....	20
<b>Figura 5.</b> Ubicación de relaveras.....	21
<b>Figura 6.</b> Georreferenciación sitio de muestreo .....	22
<b>Figura 7.</b> Plan de muestreo en el tiempo aplicado .....	22
<b>Figura 8.</b> Temperatura media mensual, máxima media y mínima media estación Aeropuerto Otú .....	39
<b>Figura 9.</b> Comportamiento mensual precipitación, estación Aeropuerto Otú.....	40
<b>Figura 10.</b> Distribución espacial coberturas vegetales. ....	43

## **Lista de Fotografías**

<b>Fotografía 1.</b> Toma de muestras de relaves .....	23
<b>Fotografía 2.</b> Composición florística de la zona .....	47

## **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>EIA</b>	Estudio de Impacto Ambiental
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>JIG</b>	Concentrador Gravimétrico
<b>LCM</b>	Límite de Cuantificación del Método
<b>MSc.</b>	Maestría en Ciencias
<b>RESPEL</b>	Residuos Peligrosos
<b>TCLP</b>	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia
<b>UPB</b>	Universidad Pontificia Bolivariana

---

## Resumen

La empresa Mona Minas S.A. dedicada a la extracción de oro y otros metales preciosos, tiene sus operaciones en el municipio de Remedios, Antioquia, Colombia. Para el aprovechamiento del oro, cuenta con una planta de beneficio en la cual se generan residuos conocidos como relaves. Estos provienen de la trituración y molienda del mineral extraído en mina. Los relaves son conducidos por tuberías a depósitos conocidos como relaveras. Estas relaveras pueden representar un problema ambiental dado que tienen un impacto negativo en la atmósfera, el agua y, especialmente, en el suelo, donde se acumulan gran parte de los desechos. Se analizaron las características de los relaves mediante la aplicación de pruebas de peligrosidad, las cuales permitieron caracterizar los aspectos fisicoquímicos del residuo. De esta manera, se identificó y propusieron técnicas de revegetación, además, se proponen especies vegetales que contribuyan a la recuperación del suelo de las relaveras al momento del cierre y abandono del proyecto minero. Los resultados de las pruebas demuestran que los relaves generados no se consideran peligrosos según las metodologías utilizadas. Las técnicas de revegetación propuestas se basan en las características del suelo, el clima y la vegetación. Se recomiendan la siembra en hileras y la hidrosiembra debido a su idoneidad para el terreno y entorno local. Finalmente, se identificaron algunas especies vegetales en el área de estudio, así como en la literatura, las cuales se consideran indicadas para iniciar el proceso de recuperación de la cobertura vegetal en el área afectada.

*Palabras clave:* relaves, peligrosidad, relaveras, revegetación, suelo, minería, especies vegetales.

---

### **Abstract**

Mona Minas S.A., a company engaged in the extraction of gold and other precious metals, operates in Remedios, Antioquia, Colombia. It has a gold processing plant that generates waste known as tailings. The tailings come from crushing and grinding the ore extracted at the mine. Tailings are piped to deposits known as tailings dams. These tailings dams can represent an environmental problem since they have a negative impact on the atmosphere, water and, especially, on the soil, where much of the waste accumulates. The characteristics of the tailings were analyzed through the application of danger tests, which allowed characterizing the physicochemical aspects of the waste. In this way, revegetation techniques were identified and proposed, as well as plant species that contribute to the recovery of the tailings soil at the time of closure and abandonment of the mining project. Test results show that the tailings generated are not considered hazardous. The proposed revegetation techniques are based on soil, climate, and vegetation characteristics. Row seeding and hydroseeding are recommended because of their suitability for the local terrain and environment. Finally, some plant species were identified in the study area as well as in the literature, which are considered suitable to begin the process of recovering the vegetation cover in the affected area.

*Keywords:* tailings, danger, tailings dams, revegetation, soil, mining, plant species.

---

## Introducción

A lo largo de los años, la actividad minera ha estado estrechamente ligada al desarrollo económico, brindando beneficios a las comunidades en distintos países del mundo como un pilar fundamental de sustento económico. La minería ha impulsado el crecimiento económico y el avance tecnológico en diversos sectores. Sin embargo, como menciona Ledesma (2018), no se puede ignorar el impacto negativo que la explotación de yacimientos mineros puede tener en las áreas donde se lleva a cabo, y en muchas ocasiones, estas consecuencias se extienden más allá de los límites de las operaciones mineras. Esto puede resultar en una afectación severa del medio ambiente, la salud humana y los recursos naturales.

Si bien la minería tiene la responsabilidad de promover un desarrollo sostenible en las comunidades, en América Latina se ha experimentado un aumento significativo en la inversión minera desde principios de la década de 1990. Según estudios realizados por Castro (2017), las regiones latinoamericanas fueron receptoras de aproximadamente el 12% de la inversión minera mundial en aquel entonces, y se estima que este porcentaje se ha triplicado en la actualidad. Este crecimiento económico se ha reflejado en países como México, Bolivia y Colombia. No obstante, junto con los beneficios económicos, la actividad minera también ha generado grandes problemas ambientales como la destrucción de ecosistemas, la pérdida de belleza paisajística, disminución de áreas verdes, alta contaminación de aguas superficiales y subterráneas, contaminación de cultivos, etc. En general, la minería a lo largo de los años ha tenido muchos impactos negativos a gran escala en la atmósfera, el agua y especialmente el suelo que es el sitio a donde van a parar gran parte de los desechos sólidos y líquido de cualquier actividad humana y, además, son el receptáculo de los desechos no deseables de origen geológico, como por ejemplo las aguas ácidas con metales pesados, como lo menciona Romero (2015) en su trabajo.

Es inevitable que las actividades mineras tengan un impacto ambiental a pesar de los esfuerzos por minimizarlo, incluso si se aplicasen tecnologías muy avanzadas, ya que hay algunos impactos que permanecen en el tiempo aún después de que las respectivas medidas de prevención y mitigación han sido implementadas. En las actividades mineras se emplean diversos métodos de explotación que muchas veces incluyen la incorporación de plantas de beneficio para el procesamiento de los minerales y, a menudo, fundiciones adyacentes. En el proceso de beneficio se generan los residuos mineros conocidos como relaves, los cuales consisten en partículas finamente trituradas de silicatos, arcillas, carbonatos, óxidos y eventualmente sulfuros, son una mezcla de metales, tierra, agua y rocas, los cuales contienen sustancias químicas altamente

contaminantes, como ácidos, metales ionizados, cianuro de sodio y otros reactivos utilizados en la extracción del oro que llegan a afectar de forma directa e indirecta al suelo (Romero, 2015).

De acuerdo con Zanchi et al. (2022), la revegetación se presenta como una alternativa económica y eficiente para la recuperación de las áreas afectadas por las relaveras. Este proceso consiste en la adecuada selección y siembra de especies de plantas herbáceas de rápido crecimiento con el fin de rehabilitar el suelo, restablecer la cobertura vegetal y favorecer el retorno de servicios ecosistémicos (agua más limpia, formación de suelo, alimento, polinización, etc.), al tiempo que se reducen los costos asociados a la remediación de los impactos ambientales. Esta estrategia no solo contribuye a la estabilización de las superficies y a la mitigación de la erosión y contaminación, sino que también promueve la captura de CO<sub>2</sub>, aumenta la biodiversidad y genera un retorno de los beneficios ecológicos ya antes mencionados. La revegetación se posiciona, así como una opción rentable que combina la rehabilitación de las áreas impactadas con el impulso de la sostenibilidad económica y ambiental.

La empresa Mona Minas S.A., comprometida con prácticas sostenibles y ambientalmente responsables, se esfuerza por conservar y preservar los recursos naturales en todas las etapas del proyecto minero. En particular, en la fase de cierre y abandono, se ha establecido el objetivo de recuperar las áreas de las relaveras. Es por ello por lo que este trabajo se basó en explorar diversas alternativas de revegetación, respaldadas por una exhaustiva revisión literaria, como una posible solución eficaz y viable para el restablecimiento de la cobertura vegetal y la rehabilitación de los suelos en dichas áreas.

Para lograrlo, se llevaron a cabo pruebas de peligrosidad en los relaves generados en la planta de beneficio de la empresa. Estas pruebas tienen como objetivo determinar si los residuos generados por la planta de beneficio, que están siendo depositados en las grandes áreas de las relaveras, representan un riesgo tanto para la salud de las personas como para los ecosistemas circundantes. Los análisis proporcionaron información suficiente para concluir que los relaves no son considerados residuos peligrosos, ya que no cumplen con ninguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad e infecciosidad biológica.

Sin embargo, a pesar de que los relaves no se consideran peligrosos en los términos mencionados, al ser depositados en los suelos, causan impactos como la pérdida de cobertura vegetal, especies vegetales y usos del suelo, entre otros, lo que se traduce en la disminución de los servicios ecosistémicos. Una vez conocido el tipo de residuo generado y su impacto potencial en el suelo, se recomendaron a la empresa técnicas de revegetación, como la siembra en hileras y la hidrosiembra, junto con ciertas familias y especies vegetales presentes en la zona. Además, se

sugirieron otras especies basadas en la bibliografía consultada como alternativas para recuperar los suelos afectados y promover el retorno de la fauna a estos lugares.

Al implementar la revegetación como parte de las estrategias de cierre y abandono de las relaveras, Mona Minas S.A. demuestra su compromiso con la mitigación y compensación de los impactos ambientales causados, así como su responsabilidad hacia las comunidades locales. Esta iniciativa cumple no solo con los requisitos legales y ambientales de la empresa, sino también garantiza un legado positivo a largo plazo para las generaciones futuras.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Analizar las características de peligrosidad de los relaves generados en la planta de beneficio mineral de oro de la empresa Mona Minas S.A. y proponer alternativas de revegetación basadas en dichas características, con el fin de recuperar las áreas afectadas por las relaveras y minimizar los impactos ambientales.

### **1.2. Objetivos específicos**

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los relaves mineros, incluyendo la composición de metales pesados, pH, contenido de nutrientes y otras características relevantes para determinar su peligrosidad.

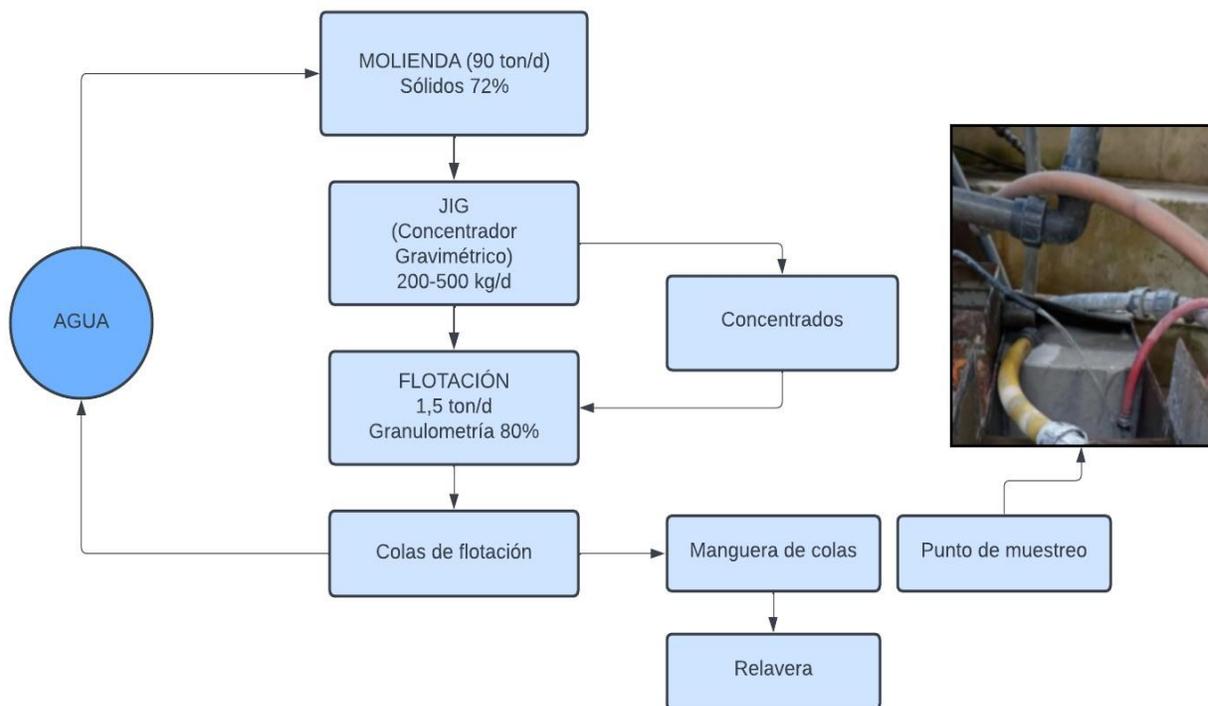
Identificar alternativas de revegetación basadas en las características de peligrosidad específicas de los relaves y las especies vegetales seleccionadas.

Proponer especies de plantas resistentes a la contaminación, así como técnicas de revegetación con el fin de compensar los efectos negativos causados por las relaveras y de esta manera ayudar a la recuperación de la cobertura vegetal y especialmente, ayudar a la restauración del suelo.

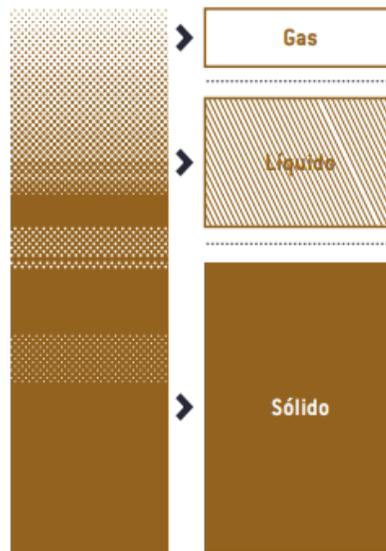
## 2. Marco teórico

En la minería, durante el proceso de beneficio que se da con la trituración, molienda y concentración de minerales por flotación (Figura 1), se genera un residuo denominado relave el cual está compuesto por una fase sólida, líquida y gaseosa (Figura 2); conformado entre otros elementos por partículas finamente trituradas de silicatos, arcillas, carbonatos, óxidos y eventualmente sulfuros conjuntamente, sin valor comercial (Camarena, Tumialan y Tauquino, 2010). El tratamiento de los relaves provenientes de los procesos de minería es manejado en grandes depósitos de relave llamados relaveras (Figura 3). En el caso de los lodos provenientes del proceso de flotación, estos son bombeados sin ninguna clase de tratamiento a la relavera, ya que los reactivos del proceso de flotación no afectan el medio ambiente, o por lo menos no se reportan datos técnicos al respecto.

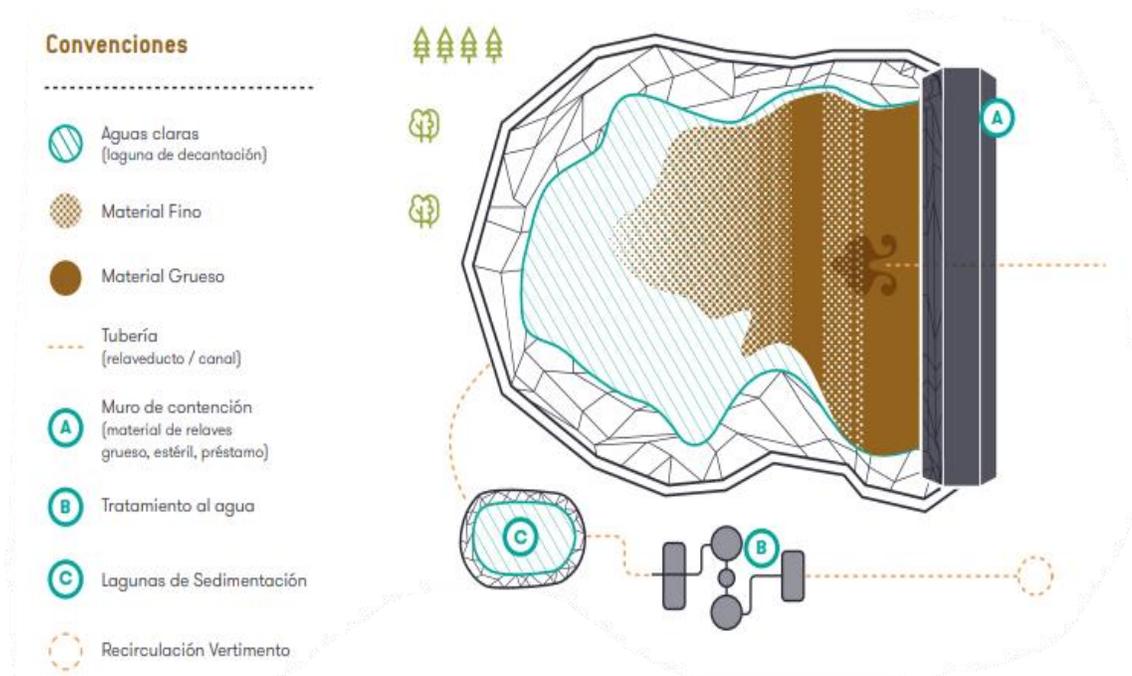
**Figura 1.** Diagrama proceso de generación de Relaves



Nota: Fuente: Mona Minas S.A., 2023.

**Figura 2.** Fracciones de un relave minero

Nota: Fuente: ATG, 2020.

**Figura 3.** Esquema básico en planta de una relavera

Nota: Fuente: ATG, 2020.

A la hora de hacer una adecuada disposición de los relaves, es de vital importancia hablar del diseño de una buena relavera, para lo cual Colombia cuenta con poca experiencia, conocimiento y seguimiento en la gestión y manejo de estas, además, se carece de una regulación clara respecto al tema; de manera que los proyectos de gran minería que se han desarrollado o están en planeación de este tipo de estructuras, se basan principalmente en estándares internacionales (Geológicas, 2020). Por ejemplo, países como Chile y Perú cuentan con Decretos Supremos (Decreto Supremo

N°248 y Decreto Supremo N° 018-92-EM respectivamente), los cuales dentro de su contenido reglamentan la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves (Galvis, J. A, s.f.). Ahora, Zhou et al. (2020) en su estudio señalan que, como fuente principal de contaminación por metales pesados en ecosistemas terrestres y acuáticos, los depósitos de relaves mineros abandonados representan un problema ambiental importante en todo el mundo y la recuperación de estos de una manera sostenible es un gran desafío, especialmente porque la acidificación de los residuos mineros está muy extendida, las características físico químicas de los relaves pueden variar de un lugar a otro y estos pueden llegar a considerarse como residuos peligrosos.

En cuanto a la clasificación y caracterización de los residuos peligrosos, el Decreto 1076 en su Sección 2, específicamente en el Artículo 2.2.6.1.2.1, establece que el generador de residuos tiene la responsabilidad de demostrar ante la autoridad ambiental que sus residuos no presentan características de peligrosidad, es decir, que por acción química el residuo o desecho pueda llegar a causar daños graves en los tejidos vivos que estén en contacto o que en caso de fuga pueda dañar gravemente otros materiales. Para tal efecto, el generador puede proponer a la autoridad ambiental los análisis de caracterización de peligrosidad a realizar, sobre la base del conocimiento de sus residuos y de los procesos que los generan, sin perjuicio de lo cual, la autoridad ambiental podrá exigir análisis adicionales o diferentes a los propuestos por el generador. Así mismo, el Artículo 2.2.6.1.2.2 del decreto establece que las características que confieren a un residuo o desecho la calidad de peligroso son: corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas y radiactivas; definidas en el Anexo III de dicho decreto.

Una vez se conoce el residuo generado, en el proceso de recuperación de las grandes áreas degradadas por los relaves mineros que han sido cerradas y/o abandonadas, la revegetación, tecnología basada en plantas para la restauración in situ, aparece como una alternativa ambientalmente sostenible y mucho más rentable que otras tecnologías fisicoquímicas tradicionales, y es que una cobertura vegetativa con alta funcionalidad ecosistémica y que se perpetúe a sí misma, es el método preferido para la protección contra la erosión por largo tiempo de las superficies de los relaves (Camarena, Tumialan y Tauquino, 2010). Desde la década de 1980, la revegetación se ha utilizado como método para estabilizar los residuos sólidos y relaves mineros, así como para restaurar áreas degradadas, con el fin de evitar pérdida de suelo y rehabilitar el medio ambiente debido a que el uso de plantas de rápido crecimiento activa la microbiota del suelo, lo que a su vez promueve cambios en las características físicas y químicas de los relaves (Pizarro et al. 2020).

---

Esta tecnología que se estudia para estabilizar y recuperar zonas de relaves requiere de plantas nativas locales adaptadas a dicha zona que logren atrapar los metales en sus raíces. Si bien un relave no es un suelo, es un desecho industrial que se puede restaurar a través de la revegetación (Romero, 2015). Lo más importante es que en el largo plazo, luego del manejo y la recuperación de los microorganismos recicladores de la materia orgánica del sustrato, los espacios revegetados sean capaces de mantenerse sin necesidad de riego ni cuidados posteriores, y mitiguen los efectos ambientales negativos (Zanchi et al. 2022). Por eso, como se menciona anteriormente, se hace necesario conocer las características del relave, así como las condiciones locales de cada asiento minero, para así determinar qué especies de plantas serán óptimas para la zona y así lograr remediar los compuestos que allí se encuentren y sus posibles impactos a los ecosistemas circundantes.

### 3. Metodología

Para conocer las características fisicoquímicas de los relaves generados en la planta de beneficio y, posteriormente identificar las especies vegetales más adecuadas para las condiciones del entorno se implementan tres etapas fundamentales. Estas etapas son diseñadas para guiar y ejecutar un proceso de restauración eficaz en las áreas afectadas por las relaveras, consecuencia de la actividad minera.

La metodología empleada para abordar los objetivos se basa en una combinación de enfoques científicos y técnicos, respaldados por una revisión exhaustiva de la literatura especializada en recuperación ambiental de zonas mineras afectadas. Cada etapa de la metodología se ha diseñado con el propósito de abordar aspectos clave, desde la caracterización inicial de los relaves mineros hasta la implementación práctica de un plan de revegetación integral. A continuación, en la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo que ilustra las etapas para el proceso de revegetación de las relaveras, este detalla de manera gráfica los pasos estratégicos que guían en la ejecución de la metodología de revegetación y de esta manera asegurar una restauración ambiental efectiva.

*Figura 4. Diagrama de flujo con metodología empleada*

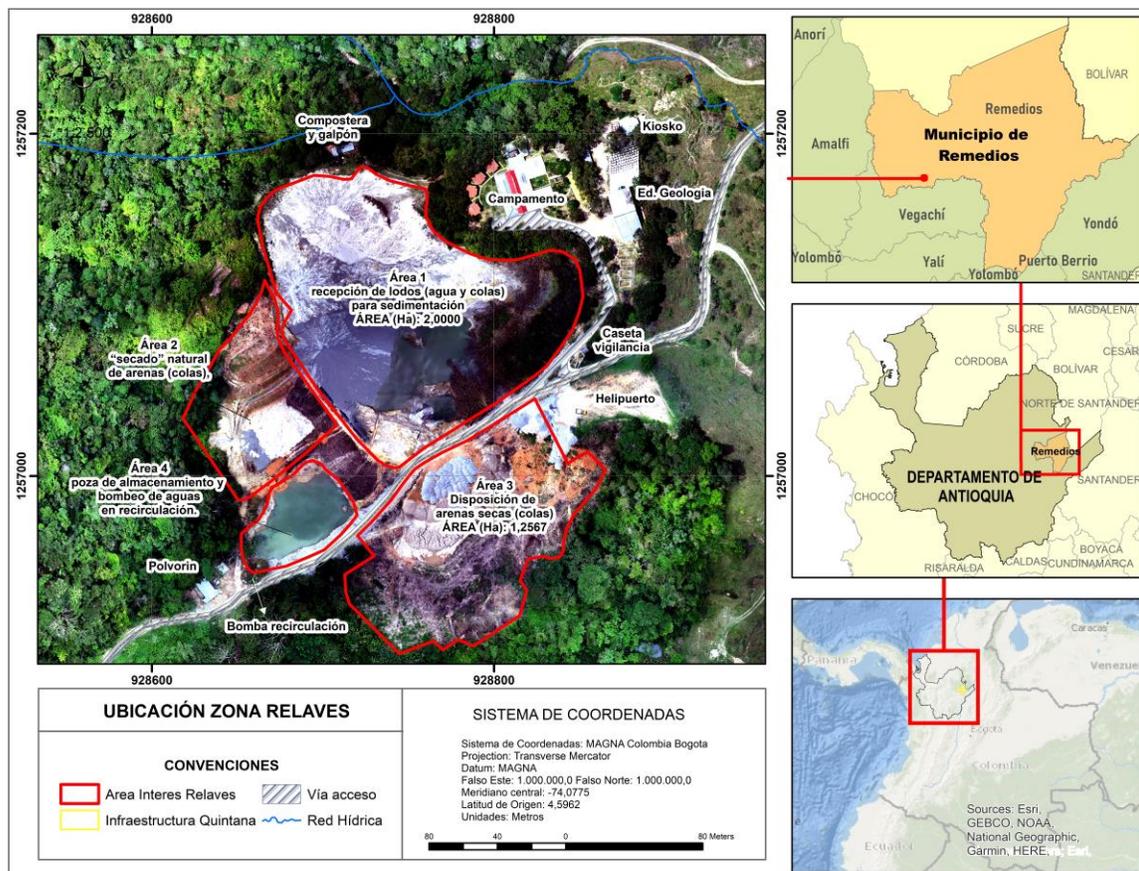


### 3.1. Etapa 1: Caracterización de los relaves mineros

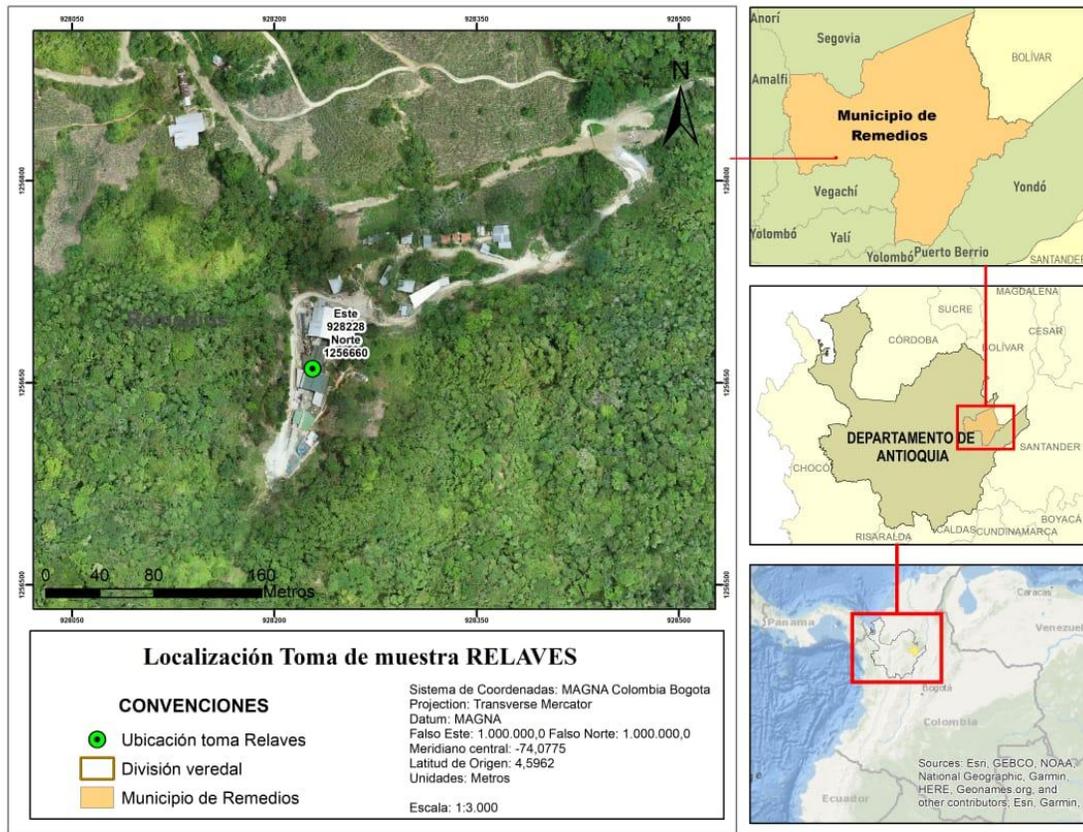
#### 3.1.1. Recolección de muestras de relaves

En esta primera etapa, se llevó a cabo la recolección de muestras de relaves mineros en diferentes instantes de tiempo. En compañía del laboratorio encargado, se elaboró un plan de muestreo el cual consistió inicialmente en realizar una visita al sitio de muestreo, es decir, a la planta de beneficio donde se genera el residuo (Figura 6), la cual está localizada en el municipio de Remedios, Antioquia. La muestra de relaves se tomó por personal del Laboratorio de Muestreo de la Universidad Pontificia Bolivariana, siguiendo los debidos instructivos establecidos para ello, de forma tal que se obtuviera una parte representativa del residuo bajo estudio, y que no ocurrieran cambios significativos en su composición antes del análisis.

*Figura 5. Ubicación de relaveras*

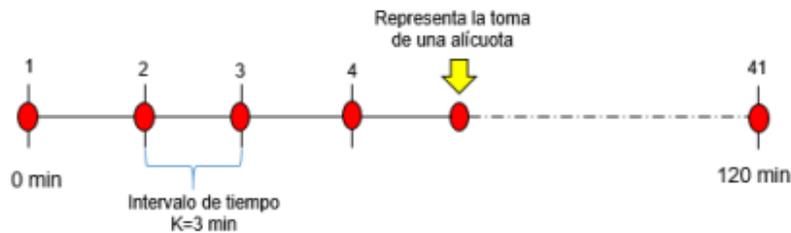


Nota Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022.

**Figura 6.** Georreferenciación sitio de muestreo

Nota: Fuente: Mona Minas S.A., 2023.

Para garantizar la representatividad de la caracterización de peligrosidad de los Relaves, se aplicó la metodología de Muestreo Probabilístico Sistemático Unidimensional en el Tiempo. Teniendo en cuenta que el residuo se generaba continuamente en el tiempo, el plan de muestreo consistió en establecer un período máximo de muestreo de 120 min y tomar una (1) alícuota cada 3 min (K), tomando un total de cuarenta y uno (41) alícuotas (ver Figura 7).

**Figura 7.** Plan de muestreo en el tiempo aplicado

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

Las muestras fueron recolectadas en la tubería de descarga de los relaves hacia el sistema de transporte hasta la relavera. Este proceso se llevó a cabo con un sacabocados, el cual fue utilizado por el personal del laboratorio para la recolección de alícuotas, posteriormente las muestras se depositaron al interior de un recipiente limpio y purgado con el relave, tal y como se observa en la Fotografía 1.

***Fotografía 1. Toma de muestras de relaves***



*Nota:* Fuente: Mona Minas S.A., 2023.

Durante el periodo de toma de muestras, se pudo identificar que los relaves presentaban las características de una suspensión sólido-líquido homogénea, con presencia de sólidos sedimentables, coloración gris y sin olor característico. Durante el tiempo de aplicación del plan de muestreo se recolectó 19.68 kg de muestra compuesta.

Para garantizar que las muestras de relaves conservaran su integridad y que fueran representativas del sitio de muestreo, se utilizó un blanco de viaje (Fotografía 1). Este consiste en una muestra preparada utilizando agua desionizada para evaluar el potencial de contaminación de las condiciones del sitio de muestreo no asociadas con el proceso de toma de muestra. Finalmente, Cabe resaltar que durante el proceso de muestreo no se presentaron inconvenientes por condiciones climáticas que interfirieran con las muestras o con la toma de estas.

---

### **3.1.2. Análisis de propiedades fisicoquímicas de los relaves**

Para llevar a cabo la caracterización de los relaves, el laboratorio encargado adoptó estándares y metodologías reconocidos internacionalmente, como las normas ASTM y los procedimientos recomendados por la EPA bajo el título "Analytical Methods for the National Sewage Sludge Survey". Además, se siguieron las directrices establecidas en la Resolución 0330 de 2017, el Título 6 del Decreto 1076 de 2015 y la Resolución 0062 de 2007, las cuales son relevantes en el contexto de la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de los relaves mineros.

En esta segunda parte de la etapa de caracterización de los relaves, la empresa Mona Minas S.A. solicitó al laboratorio correspondiente la realización de pruebas específicas. Estas pruebas incluyen la evaluación de la corrosividad, reactividad al agua, toxicidad por metales pesados, inflamabilidad y toxicidad acuática, en estricto cumplimiento con lo establecido en el Título 6 del Decreto 1076 de 2015, emitido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En la Tabla 1 se relaciona el método, la técnica analítica y el equipo empleado por el laboratorio para llevar a cabo los distintos análisis.

**Tabla 1.** *Métodos, técnicas analíticas y equipos empleados por el laboratorio*

Variable	Método	Técnica	Equipo	LCM
Toma de muestra	Resolución 0062 de 2007 del IDEAM, EPASW-846	Muestreo compuesto	Sacabocados, cuchara plástica	N.A.
Corrosividad	EPA-9045-D	Potenciometría	pH-metro	0-14 <sup>15</sup>
Reactividad Cianuros	EPA-9010-C EPA-9014 SM-4500-CN-I	Titulometría	Bureta	15.79 mg/kg (bs)
Reactividad Sulfuros	EPA-9030-B EPA-9034	Titulometría	Bureta	65.56 mg/kg (bs)
Inflamabilidad - sólidos	EPA-1030	Combustión	Tren de Ignición	N.A.
pH	EPA-9045-D	Potenciometría	pH-metro	0-14 <sup>16</sup>
Sólidos Totales	EPA-160.3 SM-2540-G	Gravimetría, (103 – 105°C)	Horno Balanza	10%
Toxicidad –TCLP (Toxic Characteristic Leaching Procedure)	EPA - 1311	Extracción	Equipo TCLP	Ver cada metal
Arsénico - Lixiviado	EPA-1311 SM-3113-B	Absorción Atómica Electrotérmica	Espectrofotómetro de Absorción Atómica – Horno de Grafito	0.0074 mg/L
Bario - Lixiviado	EPA-1311 SM-3030-F SM-3111-D	Digestión Ácida Absorción Atómica	Espectrofotómetro absorción atómica	0.548 mg/L
Cadmio – Lixiviado	EPA-1311 SM-3030-F SM-3111-B	Digestión Ácida Absorción Atómica	Espectrofotómetro absorción atómica	0.015 mg/L
Cromo Total - Lixiviado	EPA-1311 SM-3030-F SM-3111-B	Digestión Ácida Absorción Atómica	Espectrofotómetro absorción atómica	0.134 mg/L
Mercurio - Lixiviado	EPA-1311 EPA 7473	Vapor frío	Espectrofotómetro absorción atómica	0.0016 mg/L
Plata - Lixiviado	EPA-1311 SM-3030-F SM-3111-B	Digestión Ácida Absorción Atómica	Absorción Atómica	0.067 mg/L
Plomo – Lixiviado	EPA-1311 SM-3030-F SM-3111-B	Digestión Ácida Absorción Atómica	Espectrofotómetro absorción atómica	0.081 mg/L
Selenio - Lixiviado	EPA-1311 SM-3113-B	Absorción Atómica Electrotérmica	Espectrofotómetro Absorción Atómica - Horno de Grafito	0.0061 mg/L

Variable	Método	Técnica	Equipo	LCM
Toxicidad aguda para daphnia Magna	Numeral 6.3. Toxicidad aguda para Daphnia, Resolución 0062 de 2007 del IDEAM	Bioensayo	Incubadora	0 – 100 %
Ensayo de Inhibición en algas <i>Chlorella vulgaris</i>	Resolución 0062 de 2007 C3 Algal Inhibition Test de la Comunidad Europea	Bioquímica	N.A.	N.A.
Corrosividad	Resolución 0062 de 2007	Determinación Reserva ácido – álcali Cap. 2.2	Bureta, pH - metro	N.A.
Corrosividad	EPA 1110 A	Corrosividad al acero	Equipo para medida de corrosividad sobre acero SAE 1020	N.A.
Reactividad al agua	Literal 5.4 Resolución 0062 del IDEAM		Caudalímetro para gases	0.1 L/kg.h

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

### 3.1.3. Evaluación de peligrosidad de los relaves

La categoría de 'peligroso' se asigna a un residuo o desecho que muestra al menos una de las siguientes características: corrosivas, explosivas, tóxicas, ecotóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas. Esta clasificación se basa en los criterios establecidos en el Anexo III del Título 6 del Decreto 1076 de 2015, que se presentan a continuación:

- **Característica que hace a un residuo o desecho peligroso por ser Corrosivo:** característica que hace que un residuo o desecho por acción química, pueda causar daños graves en los tejidos vivos que estén en contacto, o en caso de fuga puede dañar gravemente otros materiales, y posee cualquiera de las siguientes propiedades:
  - a) Ser acuoso y presentar un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12,5 unidades.
  - b) Ser líquido y corroer el acero a una tasa mayor de 6,35 mm por año a una temperatura de ensayo de 55°C.
- **Característica que hace a un residuo o desecho peligroso por ser Reactivo:** es aquella característica que presenta un residuo o desecho cuando al mezclarse o ponerse en contacto

con otros elementos, compuestos, sustancias o residuos tiene cualquiera de las siguientes propiedades:

- a) Generar gases, vapores y humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar daños a la salud humana o al ambiente cuando se mezcla con agua.
  - b) Generar gases, vapores y humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar daños a la salud humana o al ambiente cuando se mezcla con agua.
  - c) Ser capaz de producir una reacción explosiva o detonante bajo la acción de un fuerte estímulo inicial o de calor en ambientes confinados.
  - d) Aquel que produce una reacción endotérmica o exotérmica al ponerse en contacto con el aire, el agua o cualquier otro elemento o sustancia. Provocar o favorecer la combustión.
- **Característica que hace a un residuo o desecho peligroso por ser Explosivo:** se considera que un residuo (o mezcla de residuos) es explosivo cuando en estado sólido o líquido de manera espontánea, por reacción química, puede desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que puedan ocasionar daño a la salud humana y/o al ambiente, y además presenta cualquiera de las siguientes propiedades:
    - a) Formar mezclas potencialmente explosivas con el agua.
    - b) Ser capaz de producir fácilmente una reacción o descomposición detonante o explosiva a temperatura de 25°C y presión de 1,0 atmósfera.
    - c) Ser una sustancia fabricada con el fin de producir una explosión o efecto pirotécnico.
  - **Característica que hace a un residuo o desecho peligroso por ser Inflamable:** característica que presenta un residuo o desecho cuando en presencia de una fuente de ignición, puede arder bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, o presentar cualquiera de las siguientes propiedades:
    - a) Ser un gas que a una temperatura de 20°C y 1,0 atmósfera de presión arde en una mezcla igual o menor al 13 % del volumen del aire.
    - b) Ser un líquido cuyo punto de inflamación es inferior a 60°C de temperatura, con excepción de las soluciones acuosas con menos de 24 % de alcohol en volumen.
    - c) Ser un sólido con la capacidad bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1,0 atmósfera, de producir fuego por fricción, absorción de humedad o alteraciones químicas espontáneas y quema vigorosa y persistentemente dificultando la extinción del fuego.
    - d) Ser un oxidante que puede liberar oxígeno y, como resultado, estimular la combustión y aumentar la intensidad del fuego en otro material.

- 
- **Característica que hace a un residuo o desecho peligroso por ser Infeccioso:** un residuo o desecho con características infecciosas se considera peligroso cuando contiene agentes patógenos; los agentes patógenos son microorganismos (tales como bacterias, parásitos, virus, rickettsias y hongos) y otros agentes tales como priones, con suficiente virulencia y concentración como para causar enfermedades en los seres humanos o en los animales.
  
  - **Característica que hace a un residuo peligroso por ser Radiactivo:** se entiende por residuo radiactivo, cualquier material que contenga compuestos, elementos o isótopos, con una actividad radiactiva por unidad de masa superior a 70 kBq/kg (setenta kilo becquerelios por kilogramo) o 2 nCi/g (dos nanocuries por gramo), capaces de emitir, de forma directa o indirecta, radiaciones ionizantes de naturaleza corpuscular o electromagnética que en su interacción con la materia produce ionización en niveles superiores a las radiaciones naturales de fondo.
  
  - **Característica que hace a un residuo peligroso por ser TÓXICO:** se considera residuo o desecho tóxico aquel que en virtud de su capacidad de provocar efectos biológicos indeseables o adversos puede causar daño a la salud humana y/o al ambiente. Para este efecto se consideran tóxicos los residuos o desechos que se clasifican de acuerdo con los criterios de toxicidad (efectos agudos, retardados o crónicos y Ecotóxicos) definidos a continuación y para los cuales, según sea necesario, las autoridades competentes establecerán los límites de control correspondiente:
    - a) Dosis letal media oral (DL50) para ratas menor o igual a 200 mg/kg para sólidos y menor o igual a 500 mg/kg para líquidos, de peso corporal.
    - b) Dosis letal media dérmica (DL50) para ratas menor o igual de 1.000 mg/kg de peso corporal.
    - c) Concentración letal media inhalatoria (CL50) para ratas menor o igual a 10 mg/l.
    - d) Alto potencial de irritación ocular, respiratoria y cutánea, capacidad corrosiva sobre tejidos vivos.
    - e) Susceptibilidad de bioacumulación y biomagnificación en los seres vivos y en las cadenas tróficas.
    - f) Carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad.
    - g) Neurotoxicidad, inmunotoxicidad u otros efectos retardados.
    - h) Toxicidad para organismos superiores y microorganismos terrestres y acuáticos.
    - i) Otros que las autoridades competentes definan como criterios de riesgo de toxicidad humana o para el ambiente.

Además, se considera residuo o desecho tóxico aquel que, al realizársele una prueba de lixiviación para característica de toxicidad (conocida como prueba TCLP), contiene uno o más de las sustancias, elementos o compuestos que se presentan en la Tabla 3 del Anexo III del Título 6 del Decreto 1076 de 2015 en concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles en el lixiviado establecidos en dicha tabla.

- **Característica que hace a un residuo peligroso por ser ECOTÓXICO** (Incluida dentro de la definición de Toxicidad): Una sustancia o material es ecotóxico si presenta las siguientes características:
  - a) Susceptibilidad de bioacumulación y biomagnificación en los seres vivos y en las cadenas tróficas.
  - b) Toxicidad para organismos superiores y microorganismos terrestres y acuáticos.
  - c) Otros que las autoridades competentes definan como criterios de riesgo de toxicidad humana o para el ambiente.

Según lo establecido en el Resolución 0062 de 2007, un residuo es Ecotóxico si:

- a) Al determinar el porcentaje de inmovilización de *Daphnia*, este es  $\geq 50$  %.
- b) Al determinar el porcentaje de reducción de crecimiento y reducción de la tasa de crecimiento de una especie de alga verde unicelular, estos son  $\geq 50$  %.

### **3.2. Etapa 2: Selección de especies vegetales y técnicas de revegetación**

#### **3.2.1. Investigación y recopilación de información sobre especies vegetales**

Se realiza una minuciosa investigación y recopilación de información con el objetivo de identificar las especies vegetales más adecuadas para llevar a cabo la revegetación de las áreas afectadas por los relaves mineros. Este proceso de investigación se basó en criterios específicos, incluyendo la resistencia a la contaminación, la capacidad de fitorremediación y restauración del suelo, así como la adaptabilidad a las condiciones particulares del sitio.

Para llevar a cabo esta tarea, se emplearon diversas fuentes de información, incluyendo bases de datos bibliográficas y motores de búsqueda especializados como Scopus, ScienceDirect, ResearchGate y Google Scholar, se emplearon palabras clave específicas en las búsquedas. Estas palabras clave incluyeron términos relevantes como 'relaves', 'revegetación' y 'relaveras'. La revisión de la literatura científica permitió recopilar datos relevantes sobre las especies vegetales que han demostrado un alto grado de éxito en la recuperación de suelos degradados por actividades mineras y la exposición a metales pesados.

### 3.2.2. Selección de especies vegetales y evaluación de compatibilidad con relaves

La segunda parte de esta etapa de la metodología se enfoca en la selección de especies vegetales que sean compatibles con las características de los relaves mineros. Esta selección se basa en dos fuentes clave de información: los resultados de las pruebas de peligrosidad de los relaves y la revisión de la literatura científica relacionada con especies vegetales. El objetivo principal es identificar familias, géneros y/o especies de plantas que muestren una destacada capacidad para contribuir a aspectos como la recuperación del suelo, llevar a cabo procesos de fitorremediación, establecer una sólida cobertura vegetal en las áreas afectadas por los relaves, entre otros. La selección de estas especies se basa en una evaluación que considera varios criterios para garantizar su compatibilidad con las características específicas de los relaves y sus propiedades de peligrosidad. Algunos de los criterios considerados son:

- a) **Tolerancia a la contaminación:** Se realiza una evaluación de la tolerancia de las especies vegetales a la contaminación por metales pesados y otros contaminantes presentes en los relaves. Se priorizan aquellas especies conocidas por su capacidad para sobrevivir y prosperar en suelos contaminados.
- b) **Fitorremediación:** Se investiga si las especies vegetales seleccionadas tienen la capacidad de fitorremediar, es decir, de absorber y acumular metales pesados en sus tejidos. Esto contribuirá a la remediación de los suelos contaminados.
- c) **Adaptabilidad local:** Se evalúa la adaptabilidad de las especies a las condiciones climáticas y edáficas específicas del lugar. Se considera si son especies nativas de la región o si se han adaptado previamente a condiciones similares.
- d) **Cobertura vegetal:** Se busca que las especies seleccionadas sean capaces de proporcionar una cobertura vegetal densa y efectiva, lo que ayudará a prevenir la erosión del suelo.
- e) **Compatibilidad con otras especies:** Se analiza cómo interactuarán las especies seleccionadas con otras plantas y organismos locales para promover la biodiversidad y la restauración ecológica.
- f) **Éxito en proyectos similares:** Se revisa el éxito de algunas especies vegetales en proyectos de revegetación similares, si está disponible, para respaldar su elección.

De acuerdo con Wilson, Brussiere y Guerrero (2007), las condiciones climáticas predominantes y, en menor medida, las propiedades del suelo son los principales determinantes de la distribución natural de las plantas. Estos factores de limitación cobran mayor relevancia en zonas con climas extremos, como las regiones de gran altitud. En la Tabla 2 se indican las

consideraciones generales que limitan de manera frecuente el crecimiento de las plantas en los programas de revegetación de coberturas de relaves.

**Tabla 2.** Algunas consideraciones para la selección de especies de plantas

Condiciones primarias	Tipo de planta
<b>Tipo de residuo</b>	
Metales tóxicos en alta concentración	Plantas tolerantes los metales por ejemplo <i>Senecio</i> en zonas altoandinas Colonizadores naturales de áreas mineralizadas.
Acidez y alcalinidad extrema	Colonizadores naturales de estos medios
Deficiencia de nutrientes	Leguminosas u otras plantas fijadoras de nitrógeno
<b>Clima</b>	
Fríos extremos con un periodo de corto crecimiento	Especies nativas o introducidas de rápido crecimiento ( <i>tréboles, festucas</i> ).
Condiciones áridas o semiáridas	Especies nativas o introducidas de lento crecimiento Especies agrícolas o forestales dependiendo del tipo de rehabilitación
Condiciones templadas	
<b>Uso del suelo</b>	
Para rápida estabilización y alta productividad	Especies agrícolas (avena forrajera)
Para vida silvestre	Variedades de especies nativas, que provean semilla, fruta, y espacios de protección y anidación
Para espacios de recreación	Especies resistentes a la intervención antrópica

*Nota:* Fuente: Wilson, Brussiere y Guerrero, 2007.

### 3.2.3. Identificación de técnicas de revegetación

En esta fase, se procede a identificar las técnicas de revegetación más apropiadas para las áreas impactadas por los relaves mineros. Esto implica la evaluación de las condiciones específicas del sitio, tomando en cuenta factores como la topografía, la calidad del suelo y las características de los relaves. Además, se lleva a cabo una revisión de la literatura científica para recopilar información sobre las técnicas de revegetación utilizadas en situaciones similares.

Según Wilson, Brussiere y Guerrero (2007), las técnicas consideradas se agrupan en tres categorías principales: siembra directa, plantación y técnicas mixtas. La siembra directa ofrece diversas opciones, como la siembra en hileras, a voleo convencional, hidrosiembra, siembra en hoyo, entre otras. Esta técnica permite establecer vegetación a partir de semillas en el suelo de las áreas afectadas, promoviendo la sucesión natural de especies vegetales.

La plantación, por otro lado, implica el trasplante de plántulas o plantas jóvenes a las áreas de relaves para acelerar la restauración. Finalmente, las técnicas mixtas combinan enfoques de siembra directa y plantación con elementos de bioingeniería, como muros vegetados o sistemas de retención con plantas, para estabilizar el suelo y mitigar los efectos erosivos de los relaves.

La selección final de la técnica de revegetación más apropiada para la zona se basará en su efectividad en la restauración de áreas degradadas y en su adaptabilidad a las condiciones locales, considerando su viabilidad práctica y económica en el contexto del proyecto de recuperación de las áreas impactadas por la relaveras. La Tabla 3 muestra algunas limitaciones o consideraciones que se pueden tener a la hora de elegir la técnica que mejor se ajuste a las condiciones de la zona donde se planea revegetar.

**Tabla 3.** Limitaciones para siembra con diferentes técnicas de plantación

Factor	Siembra en Hileras	Siembra al Voleo	Hidrosiembra
Pendiente	<15°	No se puede actuar en pendientes mayores de 20°	Con manguera se puede alcanzar 50 m y con brazo mecánico extensible hasta 500m
Precipitación	Importante	Critica	Critica
Pedregosidad o afloramientos rocosos	Libre de rocas y piedras	Critica, fisuras y grietas en las rocas y piedras permiten que las semillas se introduzcan y puedan encontrar mejores condiciones micro climáticas para germinar	
Compactación	Ligeramente aceptable	Inaceptable	Inaceptable
densidad de semillas	Bajas densidades	Altas densidades	
Distribución de las semillas	Uniforme en hileras	Aleatoria	Aleatoria
Establecimiento de las semillas	Muy efectiva	Resultados variables	Resultados variables
Fertilización	Operación separa de la siembra	Operación separada de la siembra	Se puede efectuar en la misma operación, pero no se realiza a profundidad
Paja	No es necesario	Necesario (operación diferente)	Necesario, se puede efectuar en una misma operación
Equipamiento	Tradicional	Método manual	Equipo especial
Costo	Bajo	Muy barato	Caro

Nota: Fuente: Wilson, Brussiere y Guerrero, 2007.

### 3.3. Etapa 3: Elaboración de la propuesta de revegetación

Para la elaboración de la propuesta de revegetación, se tuvieron en cuenta diversas fuentes de información y datos relevantes. En primer lugar, se consideraron los resultados de las pruebas de peligrosidad realizadas a los relaves, que proporcionaron información crucial sobre las características específicas de los relaves y sus posibles impactos ambientales. Además, se tuvo en cuenta la información recopilada durante la búsqueda bibliográfica, que abarcó estudios científicos, guías técnicas y experiencias previas relacionadas con especies vegetales utilizadas en la recuperación de áreas afectadas por relaves mineros.

Para garantizar una planificación efectiva y fundamentada, se consultaron documentos clave en el campo de la revegetación de áreas mineras, como el Plan Nacional de Restauración (MADS, 2015) la "Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros" (Wilson, Brussiere

y Guerrero, 2007), la “Guía ambiental para la vegetación de áreas disturbadas por la industria minero-metalúrgica” (MINAM, 2009), el Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y platino (MADS, 2012) y diferentes estudios. Estas guías proporcionan recomendaciones específicas sobre las mejores prácticas para la restauración de áreas impactadas por la minería.

La combinación de estos datos y la orientación de las guías técnicas estableció las bases para la formulación de una propuesta de revegetación adaptada a las condiciones de las relaveras en estudio. Esta propuesta se diseñó con el objetivo de maximizar la recuperación de la cobertura vegetal, fomentar la fitorremediación del suelo y promover la restauración ecológica de las áreas afectadas por la actividad minera.

## 4. Resultados

### 4.1. Caracterización de los relaves

#### 4.1.1. Resultados de pruebas de peligrosidad y comparación con la normativa

Los resultados de los análisis de las características fisicoquímicas de los relaves mineros se encuentran reflejados de la Tabla 4 a la Tabla 11. Estos resultados abarcan diferentes parámetros, incluyendo pruebas de corrosividad, reactividad, contenido de metales en el lixiviado, evaluación de la ecotoxicidad y finalmente el análisis del blanco de viaje. A través de estos análisis, se buscó evaluar la peligrosidad de los relaves y su conformidad con la normativa ambiental aplicable, lo que proporcionó una base para la posterior selección de especies vegetales y técnicas de revegetación.

**Tabla 4.** Resultados de la caracterización fisicoquímica

Variable	Unidades	Título 6 Decreto 1076/2015 y Regulación CFR EPA 40, Parte-261	RELAVES
Corrosividad	Positiva - Negativa	$\text{pH} \leq 2.0$ o $\text{pH} \geq 12.5$ (ver Nota 1)	Negativa
Inflamabilidad en sólidos	Positiva - Negativa	Velocidad $> 2.2$ mm/s (ver Nota 2)	Negativa
Sólidos Totales	%	No aplica	$57.85 \pm 0.24$
pH-Residuo	Unidades de pH	$\text{pH} \leq 2.0$ o $\text{pH} \geq 12,5$	$7.767 \pm 0.020$
pH-Lixiviado	Unidades de pH	No aplica	$5.672 \pm 0.020$

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Nota 1:** De acuerdo con la legislación, un residuo que presente un pH menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5 unidades tiene características de Corrosividad.22.

**Nota 2:** De acuerdo con la legislación, un residuo sólido que presente una velocidad de combustión mayor a 2.2 mm/s en 100mm analizados, tiene características de Inflamabilidad.

**Tabla 5.** Resultados de la caracterización de reactividad

Variable	Unidades	RELAVES
Cianuro Reactivo	mg CN <sup>-</sup> /kg (bs)	Menor de 15.79 ± 1.14
Sulfuro Reactivo	mg S <sup>2-</sup> /kg (bs)	Menor de 65.56 ± 10.06

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Nota 3:** En los parámetros de reactividad por Cianuros y Sulfuros no se realiza comparación con la norma. En la EPA-SW846– Capítulo 7 - Revisión 4 de 2004, no se estipulan los valores límites permisibles, debido a que en el año de 1998 la EPA emitió un memorando retirando los límites estipulados en la EPA- SW846 – Capítulo 7 - Revisión 3 de 1996. No existen límites máximos permisibles en la normatividad nacional.

**Tabla 6.** Resultados de la caracterización de reactividad al agua

Parámetro	Unidades	Resolución 0062/2007 IDEAM Literal 5.4	RELAVES
Reactividad al agua	L/kg.h <sup>26</sup>	Mayor a 1 L/kg sustancia.h.	< 0.1 ± 0.011

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Nota 4:** De acuerdo con lo establecido en la Resolución 0062 de 2007 del IDEAM, un residuo es reactivo al agua si la velocidad de desprendimiento de gases inflamables en contacto con agua es mayor a 1 L/kg sustancia.h., donde L/kg.h es la velocidad de liberación de gas.

**Tabla 7.** Resultados de la caracterización de corrosividad (reserva ácido - álcali y corrosión al acero)

Variable	Unidades	Literales 2.2 y 2.3 de la Resolución 0062/2007 IDEAM	RELAVES
Reserva ácido/álcali	Corrosivo - No corrosivo	pH + 1/12 reserva ácido/álcali ≥ 14.5 o pH - /12 reserva ácido/álcali ≤ 0.5	No Corrosivo
Corrosión al acero	Tasa de corrosión (mm/año)	Tasa de corrosión mayor a 6.35 mm/año	0.000022

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Tabla 8.** Resultados de la caracterización de toxicidad en el lixiviado para metales pesados - TCLP.

Variable	Unidades	LCM	Título 6 Decreto 1076/2015 y Regulación CFR EPA 40, Parte-261	RELAVES
Arsénico	mg As/L	0.0074	5.0	Menor de $0.074 \pm 0.0005$
Bario	mg Ba/L	0.548	100.0	Menor de $0.548 \pm 0.046$
Cadmio	mg Cd/L	0.015	1.0	$0.027 \pm 0.006$
Cromo Total	mg Cr/L	0.134	5.0	Menor de $0.134 \pm 0.058$
Mercurio	mg Hg/L	0.0016	0.2	Menor de $0.0016 \pm 0.0002$
Plata	mg Ag/L	0.067	5.0	Menor de $0.067 \pm 0.006$
Plomo	mg Pb/L	0.081	5.0	$1.731 \pm 0.012$
Selenio	mg Se/L	0.0061	1.0	Menor de $0.0061 \pm 0.0006$

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Tabla 9.** Resultados de la caracterización de Toxicidad aguda en *Daphnia Magna*

Variable	Unidad	Literal 6.3 de la Resolución 0062 de 2007 IDEAM	RELAVES
Toxicidad aguda con <i>daphnia Magna</i>	% de inmovilización	Si el porcentaje de inmovilización es mayor o igual a 50 %, el residuo es clasificado como	0.0
Ecotoxicidad a la <i>daphnia Magna</i>	Positiva - Negativa	<b>ECOTÓXICO</b>	Negativa

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Tabla 10.** Resultados de la prueba de ecotoxicidad – algas *Chlorella vulgaris*

Variable	Unidades	Literal 6.4 de la Resolución 0062/2007 IDEAM	RELAVES
Inhibición biomasa celular 72 h (%)	%	Si el porcentaje de inhibición de biomasa celular es mayor o igual a 50 %, el residuo es clasificado como	$18.4 \pm 3.5$
Inhibición tasa de crecimiento 72 h (%)		Si el porcentaje de inhibición de la tasa de crecimiento es mayor o igual a 50 %, el residuo es clasificado como	$25.7 \pm 3.3$
Ecotoxicidad a las algas <i>Chlorella vulgaris</i>	Positiva - Negativa	Resultado	Negativa

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

**Tabla 11.** *Análisis del blanco de viaje*

Variable	Unidades	LCM	BLANCO DE VIAJE RELAVES
Plomo	mg Pb/L	0.081	Menor de $0.081 \pm 0.012$

Nota: Fuente Laboratorio de Muestreo UPB, 2023.

#### 4.1.2. Análisis de resultados de las pruebas realizadas

Basado en los resultados detallados anteriormente, se llega a la conclusión de que el residuo minero en estudio:

- **No presenta características de corrosividad** por los métodos electrométrico, reserva ácido álcali y corrosión al acero.
- **No presenta características de inflamabilidad** para prueba en residuos sólidos.
- **No presenta características de reactividad** para la prueba de sustancias que en contacto con agua desprenden gases inflamables.
- **No presenta características de toxicidad** para los metales arsénico, bario, cadmio, cromo total, mercurio, plata, plomo y selenio.
- **No presenta características de toxicidad acuática** para las algas de la especie *Chlorella vulgaris*.
- **No Presenta características de toxicidad acuática** para *Daphnia* de la especie Magna.

Finalmente, el laboratorio contratado no realizó pruebas para determinar si el residuo es explosivo. Sin embargo, basados en que los relaves generados en la planta de beneficio son una mezcla de sólidos – líquida, la presencia de una cantidad significativa de minerales y sólidos inorgánicos que tienden a ser inertes y no reactivos en condiciones normales, limitan la posibilidad de que ocurra una reacción explosiva ya que se necesitaría una concentración específica de sustancias inflamables en forma de aerosol o vapor para que hubiese explosión. Por otro lado, las explosiones requieren de condiciones específicas de ignición, como calor, chispas, llamas o una fuente directa de ignición y las relaveras no suelen estar expuestas a tales condiciones en su entorno natural. Así, puede determinarse que el residuo:

- **No Presenta características de explosividad**

#### 4.1.3. Evaluación de peligrosidad de los relaves

Los valores obtenidos para las variables de corrosividad por los métodos electrométrico, reserva ácido-álcali, corrosión al acero, reactividad al agua, toxicidad por metales pesados

(incluyendo arsénico, bario, cadmio, cromo total, mercurio, plata, plomo y selenio), inflamabilidad en sólidos, y toxicidad acuática tanto para *Daphnia Magna* como para las algas *Chlorella vulgaris* cumplen con los límites establecidos por las normativas aplicables. Así, basado en las definiciones y características de peligrosidad que brinda el Decreto 1076 de 2015 y una vez evaluadas todas las condiciones que hacen que un residuo se considere peligroso, los resultados indican que los relaves mineros generados dispuestos en las relaveras (considerando que el proceso de beneficio no cambia en el tiempo, lo que la empresa confirma), ***NO presentan características de peligrosidad según los parámetros y métodos evaluados.***

#### **4.2. Selección de especies vegetales y técnicas de revegetación**

Los resultados de las pruebas de peligrosidad realizadas a los relaves evaluados indicaron que estos no presentan características que los califiquen como peligrosos según los parámetros analizados. En consecuencia, la selección inicial de especies vegetales y las técnicas de revegetación planeadas para mitigar los efectos negativos de los relaves podrían ser reconsideradas. Se abre la posibilidad de utilizar especies vegetales más versátiles en lugar de aquellas específicamente consultadas para entornos altamente contaminados. Esta adaptación en la estrategia de restauración podría resultar en un uso más eficiente de los recursos y una optimización de los costos asociados al proceso de revegetación.

##### **4.2.1. Selección de especies vegetales**

El proceso de selección de especies vegetales se basó en tres condiciones primarias fundamentales, como se señala en las pautas proporcionadas por Wilson, Brussiere y Guerrero (2007) y se detalla en la Tabla 2 de la metodología. Estas condiciones son el tipo de residuo, el clima de la zona y el uso del suelo. Estas variables proporcionan la base para determinar qué especies vegetales son las más adecuadas para el proceso de revegetación, garantizando su adaptabilidad y eficacia en la restauración de las áreas de las relaveras.

###### **4.2.1.1. Tipo de residuo**

En relación con el tipo de residuo generado en la planta de beneficio y depositado en las relaveras, los resultados arrojados indican que este es de metales pesados, los cuales se encuentran dentro de un rango considerado como aceptable. Además, los niveles de pH, tanto en el residuo como en el lixiviado, se sitúan en valores dentro de los márgenes adecuados. El pH del residuo se registra en 7.7, lo cual lo ubica en la categoría alcalina, mientras que el pH del lixiviado es de 5.6, señalando condiciones ligeramente ácidas. Esto sugiere que, tras la implementación de enmiendas

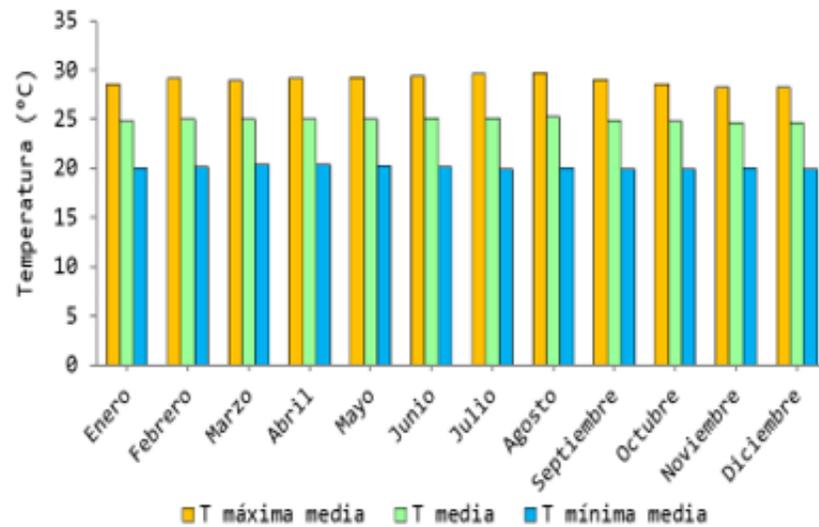
adecuadas, como la incorporación de capas con fertilizantes y nutrientes para las especies vegetales, es factible lograr la neutralización y una fertilización del suelo en los depósitos de relaves. Mantener estas condiciones resultaría beneficioso para la mayoría de los cultivos y plantas seleccionadas en el proceso de revegetación.

#### **4.2.1.2. Clima**

El factor climático es de suma importancia en la selección de especies vegetales para la revegetación de las relaveras. De acuerdo con la información obtenida del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) realizado por la empresa para la obtención de la Licencia Ambiental, la ubicación de las relaveras se sitúa a una altitud aproximada de 900 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). Esta región se caracteriza por poseer un clima cálido-húmedo, con precipitaciones anuales que oscilan entre los 2.000 y 3.500 mm, y temperaturas superiores a 22°C.

Cabe destacar que el área pertenece a la cuenca hidrográfica de la quebrada Las Camelias. Las condiciones meteorológicas de esta cuenca se basan en datos históricos de la estación del IDEAM Aeropuerto Otú (23175020), la más cercana a la zona. La temperatura promedio mensual muestra una baja variabilidad a lo largo del año, manteniéndose en torno al promedio anual de 24.9°C. Las temperaturas máximas mensuales se sitúan entre 29 y 30°C durante los primeros nueve meses del año, disminuyendo aproximadamente 1°C desde octubre hasta diciembre. Por su parte, las temperaturas mínimas mensuales no presentan una variación significativa a lo largo del año y se mantienen alrededor de los 20.0°C en todos los meses (ver Figura 8).

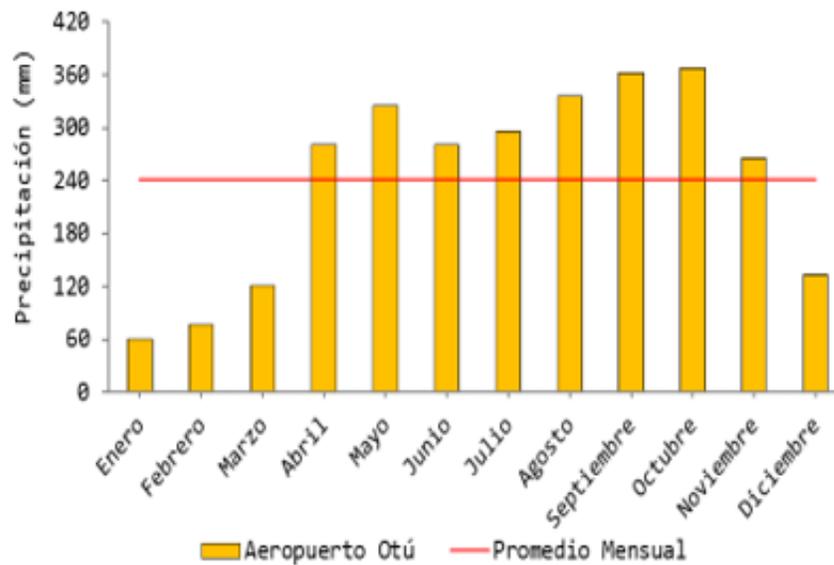
Lo anterior sugiere que el área generalmente experimenta condiciones de temperatura adecuadas para el crecimiento de una variedad de plantas. Dada la baja variabilidad en las temperaturas mensuales a lo largo del año, las especies vegetales seleccionadas deberían poder adaptarse a condiciones relativamente constantes de temperatura. Esto proporciona un contexto favorable para la restauración de las áreas impactadas por los relaves, ya que se pueden considerar especies que se desarrollan bien en condiciones de temperatura cálida.

**Figura 8.** Temperatura media mensual, máxima media y mínima media estación Aeropuerto Otú

Fuente: EIA- Mona Minas S.A., 2022.

En cuanto a la precipitación, la Figura 9 muestra el comportamiento mensual de la precipitación en la estación Aeropuerto Otú. El régimen de precipitaciones evidenciado en esta estación se asemeja a un comportamiento pseudo-bimodal. Se identifican dos períodos que podrían considerarse húmedos: abril-mayo y agosto-octubre. Sin embargo, es importante destacar que la transición entre estos dos períodos, correspondiente a los meses de junio y julio, no experimenta una reducción significativa en las precipitaciones y se mantiene dentro de lo que podría considerarse como época húmeda. Esta particularidad diferencia la región de los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, donde se observa una disminución marcada de las lluvias, definiendo claramente la época seca.

En el análisis de los valores mensuales, se destaca que enero registra las menores precipitaciones promedio, alcanzando un valor de 60.9 mm, mientras que octubre presenta las mayores precipitaciones, con un promedio de 368.0 mm. La precipitación total anual se estima en 2906.3 mm/año, y la precipitación promedio mensual a lo largo del año se sitúa en 242.2 mm/mes.

**Figura 9.** Comportamiento mensual precipitación, estación Aeropuerto Otú.

Nota: Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022.

Basándonos en la información proporcionada sobre el patrón de precipitaciones en la región, podemos inferir que la disponibilidad de agua es relativamente constante a lo largo del año, con dos períodos que podrían considerarse húmedos (abril-mayo y agosto-octubre) y una transición suave entre ellos (junio y julio). Esto sugiere que las condiciones de humedad del suelo son generalmente adecuadas para el crecimiento de una variedad de especies vegetales. Dado que la precipitación total anual es considerable (2906.3 mm/año) y la precipitación promedio mensual es relativamente uniforme (242.2 mm/mes), es probable que muchas especies vegetales tengan acceso suficiente a agua durante todo el año.

#### 4.2.1.3. Suelos y usos de la tierra

De acuerdo con "El Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia" realizado por el IGAC en el año 2007 y los diversos instrumentos de planificación territorial del municipio de Remedios (Alcaldía de Remedios, 2009), se puede caracterizar el área de estudio de la siguiente manera:

El relieve predominante en esta área está compuesto por colinas medias y bajas con cimas redondeadas. En términos de Zonas de Vida, esta región se encuentra principalmente en la categoría de bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical, además de abarcar la transición hacia el bosque muy húmedo premontano. Estos tipos de vegetación son típicos de áreas con climas cálidos y altos niveles de precipitación, lo que es coherente con las características climáticas previamente mencionadas.

Los suelos pertenecen a la unidad cartográfica Asociación Remedios, los cuales se caracterizan por ser profundos y superficiales, con limitaciones de roca y un buen sistema de drenaje. Las texturas de los suelos tienden a ser finas, y presentan una reacción muy fuerte a fuertemente ácida, lo que se traduce en una fertilidad relativamente baja, por lo que se reitera la importancia de realizar algunas enmiendas al suelo para lograr neutralizar el pH, en caso de que este sea alcalino o muy ácido, y fertilizantes como la gallinaza con el fin de suministrar los nutrientes necesarios para que las especies a sembrar tengan lo necesario para un buen desarrollo y crecimiento.

A continuación, en la Tabla 12 se presentan los resultados del muestreo del suelo que la empresa realizó para el EIA.

**Tabla 12.** Descripción del ambiente del perfil

<b>DESCRIPCIÓN DEL AMBIENTE DEL PERFIL DEL SUELO</b>		
<b>PERFIL</b>	Departamento	Antioquia
	Municipio	Remedios
	Localización (MAGANA Origen Nacional)	Este: 4.809.030,3238
		Norte: 2.321.769,6131
<b>RELIEVE</b>	Altitud (msnm)	886
	Pendiente	Fuertemente inclinada 12-25%
	Forma	Regular
	Posición geomorfológica	Colina
	Material geológico	Granodiorita
	Material parental	Cuarzodiorita a granodiorita
<b>CLIMA</b>	Precipitación media (mm/año)	2.300
	Temperatura media (°C)	28
<b>VEGETACIÓN</b>	Zona de vida	Bosque húmedo tropical – transición, Bosque muy húmedo
	Uso Actual	Pastoreo extensivo
<b>EROSIÓN</b>	Ligera	
<b>DRENAJE NATURAL</b>	Bien drenado	
<b>OBSERVACIONES</b>	Nivel freático	Profundo
	Pedregosidad	Escasa
	Encharcamiento	No
	Salinidad	No

*Nota:* Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022.

La descripción del perfil del suelo se muestra en la **Tabla 13**. Allí se detallan las características del suelo a diferentes profundidades, cabe mencionar que el pH en toda la profundidad del muestreo se mantuvo en 4.7, indicando que el suelo es ácido.

**Tabla 13.** Descripción del perfil del suelo

HORIZONTE		1	2	3
pH		4.7	4.7	4.7
PROFUNDIDAD (cm)		0 - 15	16 - 45	46 - 96
LIMITE	Nitidez	Claro Regular	Ondulado Difuso	
	Topografía	Ondulado	Ondulado	
COLOR	Horizonte	Amarillo-rojizo	Pardo rojizo claro	Pardo rojizo claro
	Moteados	No	No	No
TEXTURA		7.5 YR <sup>6</sup> / <sub>8</sub>	7.5 YR <sup>6</sup> / <sub>4</sub>	Arcillosa
ESTRUCTURA	Tipo	Granular – moderada	Bloques subangulares	Bloques subangulares débiles
	Clase	Fina	Media	
	Grado	Bien desarrollada	Moderado	
CONSISTENCIA	Húmedo	Friable	Plástica y pegajosa	Plástica y pegajosa
	Mojado	Plástico pegajoso	Friable	Friable
PROFUNDIDAD EFECTIVA		Superficial	Superficial	Superficial

Nota: Fuente: EIA- Mona Minas S.A., 2022.

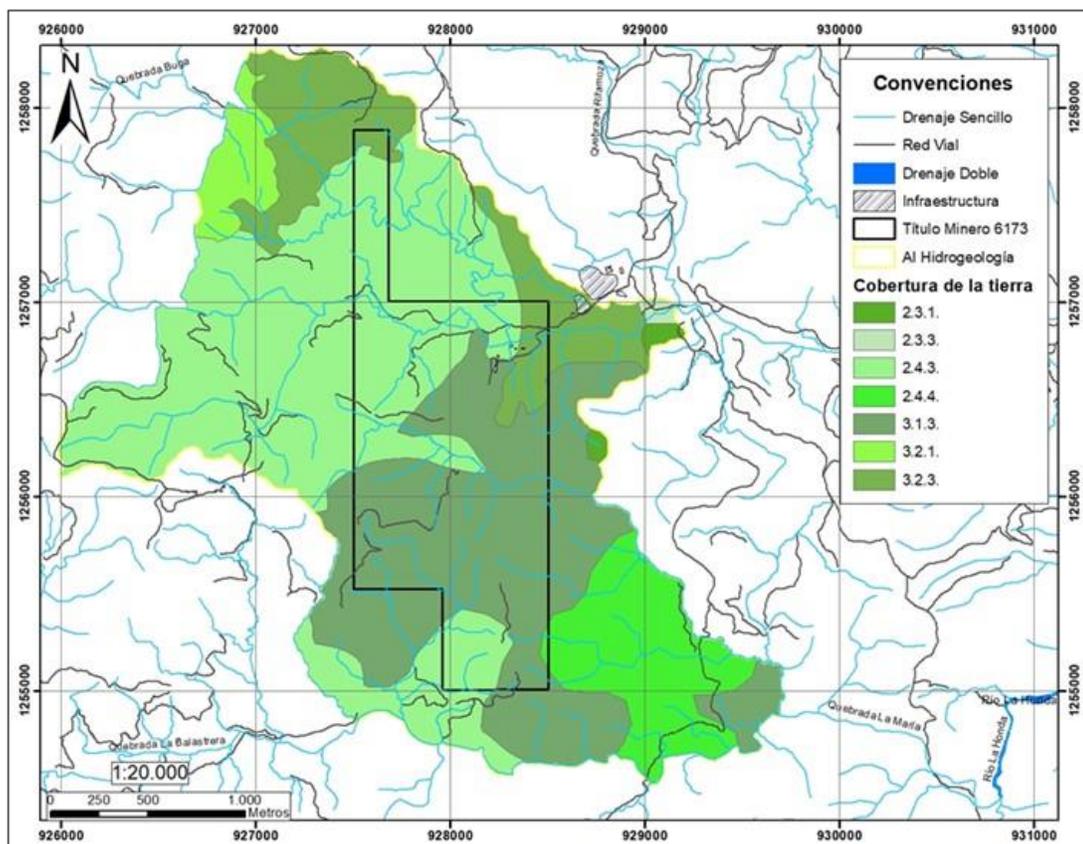
Entre los usos del suelo en el área de estudio, destaca la actividad ganadera (Alcaldía de Remedios, 2009), que ocupa una parte significativa del terreno. En esta zona, los terrenos dedicados a la ganadería se caracterizan por estar cubiertos principalmente por pastos naturales o pastos introducidos destinados al consumo animal. Se identifican suelos con pendientes que oscilan entre el 12% y el 25%, lo que influye en la estabilidad de la tierra y en su capacidad para soportar diferentes prácticas agrícolas y ganaderas.

#### 4.2.1.4. Selección de especies vegetales

La selección de especies vegetales se basa en el componente biótico de la zona de estudio, que se encuentra documentado en el EIA realizado por la empresa. Este estudio incluyó una caracterización de las especies vegetales presentes en el área y la identificación de las principales coberturas vegetales en el área del proyecto minero. En la Figura 10 y la Tabla 14 se pueden observar las coberturas presentes, donde cerca del proyecto (planta de beneficio, relaveras, campamentos), los tipos de coberturas predominantes son la de vegetación secundaria, bosque fragmentado, pastos limpios y enmalezados.

El conocimiento de la flora nativa y las especies vegetales existentes en la zona fue fundamental para elegir plantas adecuadas que contribuyan a la restauración efectiva de las áreas impactadas por los relaves mineros. Además, este enfoque garantiza que las especies seleccionadas sean compatibles con el ecosistema circundante y que puedan desempeñar un papel crucial en la recuperación del suelo y la mejora de la biodiversidad local.

**Figura 10.** Distribución espacial coberturas vegetales.



Nota: Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022.

**Tabla 14.** Coberturas vegetales presentes en la zona de estudio según metodología CCL

Código	Tipo de cobertura
3.2.1	Herbazal o Arbustal
2.3.1	Pastos limpios
2.4.3	Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales
2.3.3	Pastos enmalezados
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales
3.1.3	Bosque Fragmentado
3.2.3	Vegetación secundaria o transición

Nota: Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022

A continuación, se presenta el listado de familias y especies que se encuentran en el área de influencia biótica del proyecto, así como las respectivas coberturas vegetales en las que se ubican.

**Tabla 15. Especies presentes en los Pastos Limpios**

Familia	Nombre científico
Hypericaceae	<i>Vismia macrophylla</i>
Lamiaceae	<i>Vitex cf. capitata</i>
Melastomataceae	<i>Miconia minutiflora</i>
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>
Primulaceae	<i>Myrsine pellucidopunctata</i>
Salicaceae	<i>Casearia grandiflora</i>

Nota: Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022

**Tabla 16. Especies presentes en Pastos Enmalezados**

Familia	Especie
Annonaceae	<i>Xylopi sericea</i>
Asteraceae	<i>Piptocoma discolor</i>
Fabaceae	<i>Senna bacillaris</i>
Hypericaceae	<i>Vismia macrophylla</i>
Lamiaceae	<i>Vitex cf. capitata</i>
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>
Primulaceae	<i>Myrsine pellucidopunctata</i>
Salicaceae	<i>Casearia grandiflora</i>
Sapindaceae	<i>Cupania cinerea</i>

Nota: Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022

**Tabla 17. Especies presentes en el Bosque Fragmentado**

Familia	Especie
Anacardiaceae	<i>Tapirira guianensis</i>
Annonaceae	<i>Xylopi sericea</i>
	<i>Gutteria scytophylla</i>
	<i>Annona sp.</i>
Apocynaceae	<i>Himatanthus articulatus</i>
	<i>Rauvolfia leptophylla</i>
	<i>Couma macrocarpa</i>
Aptandraceae	<i>Aptandra tubicina</i>

<b>Familia</b>	<b>Especie</b>
Arecaceae	<i>Oenocarpus bataua</i>
	<i>Wettinia sp.</i>
	<i>Socratea exorrhiza</i>
Bignoniaceae	<i>Jacaranda copaia</i>
Burseraceae	<i>Crepidospermum rhoifolium</i>
	<i>Protium sagotianum</i>
	<i>Tetragastris panamensis</i>
Capparaceae	<i>Preslianthus pittieri</i>
Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i>
Clusiaceae	<i>Tovomita choisyana</i>
	<i>Tovomita weddelliana</i>
	<i>Chrysochlamys eclipses</i>
Cyatheaceae	<i>Alsophila cuspidata</i>
	<i>Cyathea lindigii</i>
Ebenaceae	<i>Diospyros matheriana</i>
Elaeocarpaceae	<i>Sloanea guianensis</i>
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum citrifolium</i>
Euphorbiaceae	<i>Mabea klugii</i>
	<i>Maprounea guianensis</i>
Fabaceae	<i>Macrolobium sp.</i>
	<i>Macrolobium cf. colombianum</i>
	<i>Inga samanensis</i>
	<i>Inga heterophylla</i>
	<i>Inga alba</i>
Humiriaceae	<i>Humiriastrum colombianum</i>
Hypericaceae	<i>Vismia macrophylla</i>
	<i>Vismia baccifera</i>
Lamiaceae	<i>Hyptidendron arboreum</i>
Lauraceae	<i>Ocotea oblonga</i>
	<i>Ocotea guianensis</i>
	<i>Rhodostemonodaphne kunthiana</i>
Lecythidaceae	<i>Eschweilera cf. coriacea</i>
Malpighiaceae	<i>Byrsonima spicata</i>
Malvaceae	<i>Apeiba glabra</i>
	<i>Theobroma glaucum</i>
Melastomataceae	<i>Miconia elata</i>
	<i>Miconia prasina</i>
	<i>Miconia minutiflora</i>
	<i>Miconia trinervia</i>

<b>Familia</b>	<b>Especie</b>
	<i>Miconia cf. gracilis</i>
Moraceae	<i>Pseudolmedia laevigata</i>
	<i>Perebea xanthochyma</i>
	<i>Helicostylis tomentosa</i>
Myristicaceae	<i>Virola sebifera</i>
	<i>Iryanthera ulei</i>
Myrtaceae	<i>Myrcia paivae</i>
Nyctaginaceae	<i>Neea divaricata</i>
Olacaceae	<i>Heisteria latifolia</i>
	<i>Heisteria nitida</i>
Phyllantaceae	<i>Hieronyma oblonga</i>
Primulaceae	<i>Myrsine pellucidopunctata</i>
Rubiaceae	<i>Psychotria elata</i>
	<i>Palicourea guianensis</i>
	<i>Hippotis mollis</i>
	<i>Psychotria monsalveae</i>
Salicaceae	<i>Casearia grandiflora</i>
	<i>Casearia arborea</i>
	<i>Casearia javitensis</i>
	<i>Casearia sp.</i>
	<i>Casearia javitensis</i>
Sapindaceae	<i>Cupania scrobiculata</i>
Simaroubaceae	<i>Picrolemma huberi</i>
Urticaceae	<i>Pourouma cecropiifolia</i>
	<i>Cecropia peltata</i>
Violaceae	<i>Leonia triandra</i>
Vochysiaceae	<i>Vochysia ferruginea</i>

Nota: Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022

Una vez se tiene la caracterización de las familias y especies vegetales presentes en la zona de estudio y después de considerar la bibliografía consultada, que incluye fuentes como la "Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros" (Wilson, Brussiere y Guerrero, 2007), el "Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto" del Ministerio de Ambiente, así como las "Guías técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia" (Vargas et al., 2012) y artículos científicos, se procede a recomendar una selección de familias y especies vegetales. Estas recomendaciones tienen como objetivo principal propiciar las condiciones adecuadas para el establecimiento de vegetación en suelos

desnudos, considerando principalmente especies nativas con la intención de favorecer procesos ecológicos fundamentales que permitan restaurar parcialmente las funciones originales de los ecosistemas afectados (ver Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17).

**Fotografía 2.** *Composición florística de la zona*



*Nota:* Fuente: EIA-Mona Minas S.A., 2022.

**Tabla 18.** Familias y especies vegetales recomendadas para la revegetación.

Familias/Especies recomendadas	Familias/Especies encontradas en la zona	Beneficios	Respaldo científico
<p><b>Ciperáceas, Leguminosas, Melastomatáceas, Rubiáceas, Bombacáceas, Euphorbiaceas, Clusiaceas y Ochnaceas</b></p>	<p><b>*Pastos Limpios y enmalezados:</b> Familia: <i>Hypericaceae</i>- (Especie: <i>Vismia macrophylla</i>, <i>Vismia baccifera</i>). Familia: <i>Melastomataceae</i>- (Especie: <i>Miconia minutiflora</i>).  <b>*Bosque fragmentado:</b> Familia: <i>Urticáceae</i>- (Especie: <i>Cecropia peltata</i>. Familia: <i>Euphorbiáceae</i>- (Especies: <i>Mabea klugii</i>, <i>Maprounea guianensis</i>). Familia: <i>Rubiáceae</i>- (Especies: <i>Psychotria elata</i>, <i>Palicourea guianensis</i>, <i>Hippotis mollis</i>, <i>Psychotria monsalveae</i>). Familia: <i>Melastomataceae</i>- (Especies: <i>Miconias: elata</i>, <i>Prasina</i>, <i>trinervia</i>, <i>cf. gracilis</i>. Familia: <i>Clusiaceae</i>- (Especies: <i>Tovomita choisyana</i> y <i>T. weddelliana</i>; <i>Chrysochlamys eclipses</i>)</p>	<p>Favorecerán la retención de humedad y aporte de materia orgánica mejorando las propiedades del suelo, disminuyendo procesos erosivos, dando paso a la sucesión natural del área disturbada, el inicio de procesos ecológicos asociados como la herbívora, polinización, dispersión y niveles tróficos básicos. Algunas especies del bosque fragmentado son generadoras de sombras, favorecen el establecimiento de otras especies y la rápida llegada de la fauna.</p>	<p>Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y patino en el Chocó biogeográfico (2012).</p>
<p><b>Moraceae</b></p>	<p><b>*Bosque fragmentado:</b> Especies: <i>Miconia cf. Gracilis</i>, <i>Pseudolmedia laevigata</i>, <i>Perebea xanthochyma</i>, <i>Helicostylis tomentosa</i>.</p>	<p>Favorecer la sucesión secundaria. mejorará las condiciones de luz y sombra, favoreciendo así el establecimiento de especies de niveles sucesionales intermedias como Melastomatáceas, Rubiáceas, Gesneriáceas, Moráceas, Piperáceas, Bombacáceas, Ochnáceas, Ciclantáceas, Bromeliáceas y Aráceas, que poseen la capacidad de ofrecer recursos constantes como flores, frutos, néctar, polen y refugio.</p>	<p>Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y patino en el Chocó biogeográfico (2012).</p>

<p><b>Clusiaceae y Urticaceae</b></p>	<p><b>*Bosque fragmentado:</b>          Familia: Clusiaceae-          (Especies: <i>Tovomita choisyana</i>, <i>Tovomita weddelliana</i>, <i>Chrysochlamys eclipses</i>, <i>Vismia macrophylla</i>, <i>Vismia baccifera</i>). Familia: Urticaceae-          (Especies: <i>Pourouma cecropiifolia</i>, <i>Cecropia peltata</i>).</p>	<p>Especies leñosas: poseen requerimientos ecológicos específicos. Permitirán la formación de un dosel continuo a través de las copas de los árboles que funcionarán como corredores biológicos. Además, la alta productividad de frutos de este tipo de especies permite mantener la oferta de recursos para grupos biológicos dependientes y su gran biomasa aérea se convierte en un potencial de aporte directo a la formación de hojarasca como recurso principal para el enriquecimiento del suelo y el hábitat de la edafofauna.</p>	<p>Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y patino en el Chocó biogeográfico (2012).</p>
<p><b>Asteraceae, Lamiaceae, Salicaceae, Fabaceae, Violaceae, Phyllantaceae, Anacardiaceae, Apocynaceae, Myrtaceae</b></p>	<p><b>Asteraceae:</b> <i>Piptocoma discolor</i>; <b>Lamiaceae:</b> <i>Hyptidendron arboreum</i>, <i>Vitex cf. capitata</i>; <b>Salicaceae:</b> <i>Casearia grandiflora</i>; <b>Fabaceae:</b> <i>Senna bacillaris</i>; <b>Violaceae:</b> <i>Leonia triandra</i>; <b>Phyllantaceae:</b> <i>Hieronyma oblonga</i>; <b>Anacardiaceae:</b> <i>Tapirira guianensis</i>; <b>Myrtaceae:</b> <i>Psidium guajava</i>.</p>	<p>Estas familias poseen especies de plantas hiperacumuladoras, si bien las que se han encontrado en la zona pertenecen a estas familias, se debe llevar una investigación más a fondo para determinar si dicha especie posee la capacidad de fitorremediación. Las familias recomendadas poseen las propiedades de hiperacumular: cadmio, cobre, manganeso, níquel, oro, plomo, talio y zinc.</p>	<p>*Bustos (2021) *Ekyastuti, Astiani, &amp; Roslinda (2016) proponen especies vegetales pertenecientes a las familias Lamiaceae, Anacardiaceae, Apocynaceae, Fabaceae, etc. *Ledesma (2018), muestra experiencias exitosas en remediación de relaveras, donde las especies nativas son las más aptas para dicha tarea.</p>

<b>Gramíneas</b> (Poaceas, Cyperaceae y Juncaceas)		La siembra de especies agronómicas que sean tolerantes a condiciones de compactación y baja aireación asociadas con los relaves mineros, permite una rápida cobertura de desechos mineros. Ayudan a mejorar el enraizamiento de otras especies de plantas.	*Larchevêque, Meddeb & Barrette (2016). *Se recomienda ver el trabajo de Giraldo (2013) donde se mencionan las especies de gramíneas en Colombia, así como su distribución. *Zanchi, Silva, Batista, Peixoto, Barbosa, dos Santos, & Carneiro (2022), proponen una especie de pasto Brachiaria y el Negrillo, especies que pueden conseguirse en Colombia.
<b>Kikuyo</b> ( <i>Cenchrus clandestinus</i> ) y el <b>Ray grass</b> ( <i>Lolium</i> ) en asociación con <b>Trébol</b> ( <i>Trifolium</i> )		Ambas son perennes y presentan un amplio rango de distribución térmica y altitudinal entre otras. Adecuadas para la fitoestabilización de la superficie de las relavera por sus diversas características.	*Camarena, Tumialan, & Tauquino (2010). *Romero (2015), presenta una tesis donde demuestra que el Kikuyo (especie Gramínea) es una gran fitoestabilizadora en las relaveras.

Nota: Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes consultadas.

#### 4.2.2. Técnicas de revegetación recomendadas

De acuerdo con lo mencionado en la sección de suelos y usos de la tierra, se ha identificado que la zona presenta suelos con pendientes que varían entre el 12% y el 25%. Siguiendo las recomendaciones de Wilson, Brussiere y Guerrero (2007), así como las lecciones aprendidas de experiencias exitosas de recuperación en áreas impactadas por relaves en otras empresas mineras (Ledesma, 2018), se ha considerado que la elección de la técnica de revegetación debe ser adecuada a estas condiciones.

Como técnica de revegetación, se recomienda la siembra en hileras, dado que se ajusta a la pendiente de la zona y ofrece un bajo costo. Además, es una técnica tradicionalmente efectiva. En este contexto, se recomienda priorizar especies herbáceas y arbustivas en lugar de aquellas con raíces profundas, ya que estas últimas podrían no adaptarse a la topografía y las características del suelo de la zona.

Para las áreas con taludes pronunciados, se sugiere la utilización de la técnica de hidrosiembra, que aprovecha las buenas condiciones de agua presentes en la zona y permite el alcance de largas distancias de manera eficiente con el uso de mangueras.

### **4.3. Propuesta de revegetación**

La propuesta elaborada se basa en la evaluación de los resultados obtenidos en las pruebas de peligrosidad, así como en la caracterización vegetal realizada en la zona del proyecto minero y la consulta de diversas fuentes bibliográficas. Esta propuesta toma en consideración la topografía, la disposición hídrica, el clima y las características del suelo mostradas anteriormente. Su objetivo principal es llevar a cabo una remediación ambiental de las áreas de relaveras en el momento en que la empresa decida realizar el cierre y abandono del proyecto. Este enfoque se centra en la preparación para la revegetación de la zona contaminada, siguiendo la experiencia documentada en el campo de la restauración ecológica.

#### **4.3.1. Uso potencial del suelo**

Inicialmente, es importante conocer el uso potencial del suelo que tendrá el área a revegetar. El uso potencial hace referencia a la capacidad de uso de éste y sus limitaciones, y se determinó de acuerdo con la identificación de las unidades cartográficas del suelo y la capa de uso potenciales del suelo para el departamento de Antioquia escala 1:100.000 del IGAC (IGAC, 2007). Así, se tiene que el suelo pertenece a la Clase IV y se tienen las siguientes categorías:

- **4hs-2:** estos suelos presentan relieve plano a ligeramente inclinado con inundaciones muy cortas, moderadamente bien drenados; son moderadamente profundos, texturas francas finas; reacción extremada a fuertemente ácida; fertilidad baja. Pertenece a clima templado húmedo, están limitados principalmente por la acidez y las inundaciones frecuentes. Las principales limitantes para el uso y manejo de los suelos de esta unidad son asociadas a la acidez de los suelos, erosión moderada, fertilidad baja y problemas de inundaciones cortas. Este subgrupo presenta aptitud para agricultura con cultivos transitorios semi-intensivos. Se debe manejar adecuadamente las inundaciones.
- **4ps-5:** Suelos con pendientes entre el 12-25%, con alta saturación de aluminio, presencia de fragmentos de roca en el suelo, baja retención de humedad y baja fertilidad. Estos suelos presentan aptitud para la agricultura con cultivos permanentes y cultivos permanentes semi-intensivos.

Dado que en la zona se practica la ganadería, se recomiendan la implementación de sistemas silvopastoriles ya que estos pueden ser altamente beneficiosos tanto desde una perspectiva

ambiental como económica. Estos sistemas combinan árboles, pasto y ganado en un solo sistema de producción y pueden contribuir a mejorar la calidad del suelo, incrementar la biodiversidad, ayudar a la captura de carbono, entre otros beneficios.

#### **4.3.2. Preparación del terreno a revegetar**

Para llevar a cabo un exitoso proceso de revegetación en las coberturas de relaves, es esencial abordar la mejora de las condiciones físicas del suelo. Con base en las recomendaciones dadas por William, Brussiere y Guerrero (2007), así como en las pautas establecidas en la Guía Ambiental para la Vegetación de Áreas Disturbadas por la Industria Minero-Metalúrgica (la cual se le recomienda a la empresa tenerla como paso a paso en el proceso de preparación). Se recalca la importancia considerar aspectos clave como la estabilidad del suelo, su capacidad de aireación, infiltración y retención de humedad.

##### **4.3.2.1. Mejora de las condiciones físicas del suelo**

Una práctica altamente beneficiosa recomendada para mejorar este aspecto es la incorporación de materiales orgánicos, como musgo (turba), estiércol o compost, en el suelo. Estos materiales orgánicos desempeñan un papel crucial al incrementar la capacidad de infiltración, mejorar el drenaje y facilitar una adecuada aireación del suelo. Además, contribuyen a reducir el efecto de encostramiento superficial, lo que es fundamental para promover un óptimo contacto entre las semillas y el suelo, permitiendo así una germinación adecuada de las plantas.

Se subraya la importancia de llevar a cabo un proceso de nivelación en las relaveras. Esto implica que, previo al desmonte necesario para adecuar el depósito, se conserve y reutilice la cobertura superficial del suelo. La nivelación del terreno tiene múltiples ventajas, incluida una eficiente evacuación del agua, lo que resulta especialmente relevante dado que la zona dispone de un recurso hídrico abundante, tanto a través de corrientes superficiales como de precipitaciones pluviales. Este proceso de nivelación contribuye al control efectivo de la erosión y la sedimentación, por eso se recomienda mantener un rango de pendiente del terreno entre el 10% y el 20%.

##### **4.3.2.2. Corrección del pH**

De acuerdo con los datos obtenidos sobre el suelo (ver tabla 13), se ha observado que el pH promedio del suelo se mantiene en 4.7. Asimismo, los análisis realizados en los lixiviados del relave y en el propio relave indican valores de pH de 5.6 y 7.7, respectivamente. En la perspectiva de que las propiedades de los relaves no varíen significativamente al entrar en contacto con el suelo

o el agua, se puede concluir que, en su mayoría, el suelo presenta una acidez significativa y, por lo tanto, requerirá una corrección del pH.

En casos en los que el suelo exhiba una acidez marcada, con un pH por debajo de 5.5, se recomienda encarecidamente la aplicación de enmiendas calcáreas, como cal, caliza o dolomita. Estas enmiendas desempeñan un papel esencial al elevar el pH del suelo, creando así un ambiente propicio para el crecimiento de plantas y microorganismos, que necesitan un nivel adecuado de calcio. Según las directrices proporcionadas por William, Brussiere y Guerrero (2007), se estima que, para el encalado de suelos fuertemente ácidos, se requerirían entre 1 y 3 toneladas de cal por hectárea. Este nivel de corrección elevaría el pH por encima de 5.5, estableciendo condiciones más favorables para la revegetación.

En busca de opciones que puedan minimizar costos, se recomienda considerar el uso de compost o tierra negra proveniente de áreas cercanas a las relaveras. Estos materiales orgánicos también pueden contribuir significativamente a la corrección del pH del suelo, al tiempo que ofrecen beneficios adicionales en términos de fertilidad y mejora de la estructura del suelo.

#### **4.3.2.3. Mejoramiento de las propiedades biológicas del suelo**

Para restablecer de manera efectiva la comunidad microbiana en el suelo, se sugiere aplicar una capa superficial de suelo extraída justo antes de la siembra en el área perturbada. Esta capa debe contener una población diversa de microorganismos beneficiosos. Además, se recomienda incorporar estiércol, como la gallinaza, a fin de enriquecer el suelo con nutrientes esenciales, incluyendo fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y varios micronutrientes. Esta adición de estiércol no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también aporta microorganismos beneficiosos que contribuyen a la recuperación de la microbiota del suelo.

Otra estrategia importante es aprovechar las especies forestales presentes en las cercanías del proyecto. Sus hojas y material vegetal descompuesto pueden utilizarse como una fuente de abono directo para enriquecer el suelo con materia orgánica y nutrientes esenciales.

#### **4.3.3. Siembra**

De acuerdo con William, Brussiere y Guerrero (2007), existen tres opciones para obtener semillas en proyectos de revegetación en áreas mineras. La primera opción es comprar semillas en el mercado. La segunda es recolectar semillas en zonas cercanas al proyecto minero y utilizarlas directamente. La tercera opción consiste en recolectar semillas de un área seleccionada y multiplicarlas para proyectos de revegetación futuros.

La recomendación de especies arbustivas y se fundamenta en su adaptación a las condiciones climáticas locales y su capacidad para resistir los metales pesados presentes en el suelo, tal como se ha mencionado previamente. Para obtener plántulas, se sugiere buscar plantas madre cercanas al sitio de revegetación que estén bien desarrolladas. De estas plantas, se pueden tomar esquejes con raíces establecidas.

Dado que la técnica principal recomendada es la siembra en hileras, se aconseja preparar los hoyos en el suelo en los meses previos a la plantación, preferiblemente cuando comiencen las primeras lluvias, evitando hacerlo durante periodos de lluvias intensas para no comprometer la calidad de los hoyos. La profundidad óptima para la colocación de la semilla varía según la especie, siendo más superficial para semillas pequeñas y más profunda para semillas grandes. En general, una profundidad de un centímetro es óptima para la mayoría de las especies nativas. Se recomienda una distancia de aproximadamente 50 cm entre plantas sembradas para un buen prendimiento de las raíces. La siembra debe llevarse a cabo justo antes del período de máxima precipitación, para lo cual ya se brindó previamente la información.

#### **4.3.2.5. Protección y monitoreo de plantas**

Para la protección de las plantas sembradas, se pueden considerar dos enfoques efectivos. Uno de ellos es utilizar especies arbustivas como un cerco vivo alrededor del área de siembra. Este cerco vivo actuará como una barrera natural para evitar que personas o la fauna circundante, como el ganado, ingresen y dañen las plántulas. Otra opción es cercar el perímetro sembrado con alambre de púas y postes de madera, lo que proporcionará una protección física adicional.

En cuanto al monitoreo de la zona revegetada, Peña (2021) menciona que este es esencial para garantizar su éxito a largo plazo. Se deben llevar a cabo observaciones regulares para detectar cualquier pérdida de suelo debida a la erosión, ya sea eólica o hídrica. Dado que la zona no presenta un historial de inundaciones, la erosión eólica es la principal preocupación. Para abordar este problema, se pueden implementar coberturas inertes para controlar la erosión y brindar protección adicional a las plántulas contra los factores climáticos adversos.

Según la “Guía ambiental para la vegetación de áreas disturbadas por la industria minero-metalúrgica” (MINAM, 2009), el monitoreo debe incluir la medición de parámetros como la altura, el diámetro, la densidad, la frecuencia y la cobertura de las plantas. Estos indicadores ayudarán a evaluar el desarrollo de las plantas y la recuperación de la zona. Un enfoque efectivo para el monitoreo podría ser la utilización de un modelo de muestreo por cuadrantes. Este método consiste en colocar un cuadro sobre la vegetación y medir los parámetros mencionados anteriormente en

cada cuadrante. Esto proporcionará datos cuantitativos sobre el progreso de la revegetación y permitirá tomar medidas correctivas si es necesario.

## 5. Análisis

Los resultados de las pruebas indicaron que los relaves generados en la planta de beneficio de Mona Minas S.A. no presentan características de peligrosidad según los parámetros evaluados. Esto significa que estos relaves no muestran características de corrosividad, reactividad, toxicidad, inflamabilidad y riesgo biológico en niveles que superen los límites establecidos por las normativas aplicables. Además, no se detectaron características de explosividad, aunque esta prueba específica no se pudo realizar. Estos resultados ayudaron a la toma de decisiones posteriores en cuanto a la gestión de los relaves y la restauración de las áreas afectadas. La falta de peligrosidad de los relaves es un aspecto positivo, ya que elimina la necesidad de implementar medidas de manejo y disposición especiales debido a su carácter no peligroso. La no peligrosidad de los relaves también refuerza el compromiso de Mona Minas S.A. con prácticas sostenibles y ambientalmente responsables, además que se está dando, en este sentido, cumplimiento con los requisitos legales y ambientales pertinentes.

Al tener que los relaves dispuestos no se consideren peligrosos, se cuenta con información importante para la selección de especies vegetales y técnicas de revegetación adecuadas. Inicialmente, se había planificado la selección de especies y técnicas considerando un residuo peligroso, pero dado que los relaves se consideran no peligrosos, fue necesario reconsiderar esta estrategia. El tipo de residuo generado, compuesto principalmente por bajas concentraciones de metales pesados, se encuentra dentro de límites aceptables. El pH del residuo y del lixiviado también se sitúa en valores adecuados, lo que sugiere que, con enmiendas apropiadas, es posible neutralizar el suelo en las áreas de relaves y proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento vegetal.

El análisis climático reveló que la ubicación de las relaveras presenta un clima cálido-húmedo con precipitaciones anuales significativas. Si bien existe una estacionalidad en las precipitaciones, con dos períodos húmedos y una transición suave entre ellos, la disponibilidad de agua a lo largo del año se mantiene relativamente constante. Esto crea un entorno propicio para el crecimiento de una variedad de especies vegetales, ya que la mayoría tendrá acceso suficiente a agua durante todo el año. La baja variabilidad en las temperaturas mensuales sugiere que las especies vegetales seleccionadas pueden adaptarse a condiciones relativamente constantes de temperatura. Esto es esencial para el éxito de la revegetación, ya que muchas especies requerirán un entorno estable para crecer de manera efectiva. En lugar de centrarse exclusivamente en especies resistentes a entornos altamente contaminados, ahora es posible considerar una gama más amplia de especies vegetales que puedan prosperar en estas condiciones, resaltando que el uso de especies nativas garantizaría que las selecciones sean compatibles con el ecosistema circundante.

La recomendación de técnicas de revegetación, como la siembra en hileras y la hidrosiembra, se adapta a la topografía local y aprovecha las condiciones climáticas y de suelo para promover una restauración efectiva.

Finalmente, preparar el suelo de relaveras es parte indispensable para una restauración ambiental efectiva. Se destaca la importancia de considerar la implementación de sistemas silvopastoriles de acuerdo con el uso actual y potencial del suelo, que pueden beneficiar tanto el medio ambiente como la economía local. Para preparar el terreno, se enfatiza la mejora de las condiciones físicas del suelo mediante la incorporación de materiales orgánicos y la nivelación del terreno. También se reitera de ser necesario realizar una corrección del pH del suelo, recomendando para esto el uso de enmiendas calcáreas o materiales orgánicos locales para minimizar costos. Realizar monitoreos constantes de la zona revegetada será esencial y se aconseja incluir la medición de parámetros como la altura, el diámetro y la densidad de las plantas para evaluar el progreso de la revegetación y tomar medidas correctivas si es necesario.

## 6. Conclusiones

La realización de las pruebas de peligrosidad desempeñó un papel fundamental en la planificación de la restauración de las áreas afectadas por los relaves generados en la planta de beneficio de Mona Minas S.A. Al determinar, gracias a estas pruebas, que los relaves no presentaban características peligrosas, se produjo un cambio significativo en la estrategia de selección de especies vegetales. Inicialmente, se enfocaría en buscar especies con propiedades de fitorremediación, destinadas a mitigar los efectos de un entorno altamente contaminado. Sin embargo, con la confirmación de que los relaves no eran peligrosos, se recondujo la estrategia hacia la restauración de la cobertura vegetal, la mejora del suelo en las áreas de las relaveras y la recuperación de los ecosistemas de la zona, buscando no solo la remediación de la contaminación, sino también la restauración de la biodiversidad y la funcionalidad del suelo.

La selección de especies vegetales adecuadas para el proceso de revegetación se llevó a cabo con base en estudios previos y recomendaciones derivadas de guías, protocolos y planes de restauración ecológica. Este proceso consideró con especial atención tres condiciones primordiales: el tipo de residuo presente, el clima de la zona circundante y el uso previsto del suelo. Estas variables fundamentales sirvieron para determinar cuáles especies serían las más idóneas en el proceso de revegetación. Se buscó asegurar su capacidad de adaptación y su eficacia en la restauración de las áreas de las relaveras. En este contexto, se estableció que las especies de plantas nativas son óptimas en el proceso de revegetación.

La selección de técnicas de revegetación, como la siembra en hileras y la hidrosiembra, se basó en la consideración de las condiciones específicas del sitio. La siembra en hileras se destaca como una opción idónea debido a su adaptabilidad a la pendiente del terreno, su eficiencia en costos y su histórica efectividad. La preferencia por especies herbáceas y arbustivas, en lugar de aquellas con raíces profundas, está respaldada por la necesidad de asegurar una adaptación óptima a la topografía y las características del suelo local. Para áreas con taludes pronunciados, la técnica de hidrosiembra es una solución eficaz, ya que aprovecha las condiciones hídricas favorables en la zona y permite una cobertura eficiente incluso en distancias largas.

El éxito de cualquier proceso de revegetación va más allá de la simple selección de especies y técnicas adecuadas. Se resalta la importancia de la preparación del terreno para garantizar la restauración efectiva de las áreas degradadas. Este proceso abarca la mejora de las condiciones físicas del suelo, la corrección del pH, la promoción de propiedades biológicas saludables mediante enmiendas como el estiércol, material vegetal descompuesto, entre otros, así como una siembra

cuidadosa y la implementación de medidas de protección y monitoreo para salvaguardar el desarrollo de las plantas después de la siembra.

---

## 7. Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo pruebas de peligrosidad de los relaves en diferentes momentos a lo largo de la vida operativa de la mina y más allá del cierre. Esto tiene como objetivo monitorear de manera continua las características fisicoquímicas de los relaves. La realización periódica de estas pruebas es esencial para identificar cualquier cambio en las propiedades de los relaves que pudiera convertirlos en residuos peligrosos. En caso de que se detecte que los relaves se vuelven peligrosos, se deben implementar medidas de gestión especiales de manera inmediata para prevenir impactos ambientales adversos.

Una vez se haya realizado la revegetación, se recomienda realizar un seguimiento a largo plazo de las áreas revegetadas para evaluar la efectividad de las técnicas empleadas y el desarrollo de las especies vegetales. Esto proporcionaría datos valiosos sobre la sostenibilidad a largo plazo de la restauración ecológica en el área y permitiría realizar ajustes según sea necesario.

Explorar y desarrollar técnicas de restauración innovadoras que puedan mejorar aún más la efectividad de la revegetación en áreas degradadas por la minería, ya que en Colombia se tiene poca experiencia en este campo,

Realizar un seguimiento continuo del impacto ambiental de la actividad minera, incluso después del cierre de la mina, para evaluar cualquier cambio en las condiciones del suelo, la calidad del agua y la biodiversidad. Esto ayudaría a garantizar un monitoreo constante de posibles problemas ambientales.

Realizar investigaciones para comprender mejor la resistencia de las especies vegetales nativas a condiciones adversas del suelo y la contaminación. Esto podría ayudar a identificar variedades más resistentes que puedan utilizarse en futuros proyectos de revegetación.

Implementar programas de educación ambiental y participación comunitaria para involucrar a las comunidades locales en la restauración ecológica y fomentar la conservación a largo plazo de las áreas restauradas.

---

## Referencias

- Alcaldía de Remedios. (2009). Esquema de ordenamiento Territorial Municipio de Remedios. Remedios - Antioquia: Alcaldía de Remedios.
- Bustos Contreras, Y. A. (2021). Uso de plantas hiperacumuladoras en minería conceptos y aplicaciones (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Camarena, P. H., Tumialan, P. E., & Tauquino, R. F. (2010). Ensayo de adaptación de especies vegetales para la cobertura vegetal de los relaves mineros de la planta concentradora Santa Rosa de Jangas. Aporte Santiaguino, ág-18.
- Decreto 1076 de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ekyastuti, W., Astiani, D., & Roslinda, E. (2016). Prospect of indigenous plant species for revegetation in the tailings area of ex community gold mine. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 17(2).
- Mona Minas S.A, (2022). Estudio de Impacto Ambiental proyecto minero Mona Minas.
- Galvis, J. A. (s.f.) Guía metodológica para el manejo de pasivos ambientales mineros.
- Geológicas, A. T. (2020). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería.
- Giraldo Cañas, D. A. (2013). Las gramíneas en Colombia: riqueza, distribución, endemismo, invasión, migración, usos y taxonomías populares. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales.
- Guittonny-Larchevêque, M., Meddeb, Y., & Barrette, D. (2016). Can graminoids used for mine tailings revegetation improve substrate structure? *Botany*, 94(11), 1053-1061.
- IDEAM. (2004). Guía técnico-científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia. Bogotá: IDEAM. Recuperado de: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe>
- IGAC. (2007). Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Antioquia. Bogotá, D.C.

- Jelea, o. C., & Baciú, c. (2023). Effects of heavy metals, contained in flotation tailings, on plants used in revegetation. *Carpathian journal of earth and environmental sciences*, 18(1), 89-103.
- Ledesma, W. (2018). Propuesta de tratamiento del depósito de relaves de Quiulacocha-Pasco para su remediación ambiental, basada en experiencias exitosas en empresas mineras (Doctoral dissertation, Tesis de maestría). Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Pasco).
- MINAM (2009). “Guía para la elaboración de planes de cierre de pasivos ambientales mineros” – Disponible en: [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/legislacion/guia\\_pasivos\\_Mineros\\_2010\\_ago\\_20.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/legislacion/guia_pasivos_Mineros_2010_ago_20.pdf) .
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas, 92 p. ISBN: 978-958-8901-02-2 Medio electrónico o digital.
- Peña Casanova, O. I. (2021). Propuesta de plan de revegetación para el pasivo ambiental minero N° 14582 en la provincia de Caylloma, Arequipa 2020.
- Pizarro, R., Flores, J. P., Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., ... & León, L. (2016). Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(1), 29-43.
- Proto, M., & Courtney, R. O. N. A. N. (2023). Application of organic wastes to subsoil materials can provide sustained soil quality in engineered soil covers for mine tailings rehabilitation: A 7 years study. *Ecological Engineering*, 192, 106971.
- Romero Rey, A. L. (2015). Tratamiento de relaves mineros contaminados con plantación de gramíneas (KIKUYO) para convertirlos en áreas verdes en las minas de la Región Central del Perú.
- Vargas, O., Díaz, J. E., Reyes, S., & Gómez, P. A. (2012). Guías técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia. Bogotá: Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Grupo de Restauración Ecológica-Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/260365693>.
- Wilson, W., Brussiere, B., & Guerrero, J. (2007). Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros.

---

Zanchi, C. S., Silva, A. O., Batista, É. R., Peixoto, D. S., Barbosa, M. V., dos Santos, J. V., ... & Carneiro, M. A. C. (2022). Pre-cultivation with Herbaceous Plants Assists in the Revegetation Process of Iron Mining Tailings with *Enterolobium contortisiliquum*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(7), 231.

Zhou, W. H., Wang, Y. T., Lian, Z. H., Yang, T. T., Zeng, Q. W., Feng, S. W., ... & Li, J. T. (2020). Revegetation approach and plant identity unequally affect structure, ecological network and function of soil microbial community in a highly acidified mine tailings pond. *Science of the Total Environment*, 744, 140793.

## **Anexos**

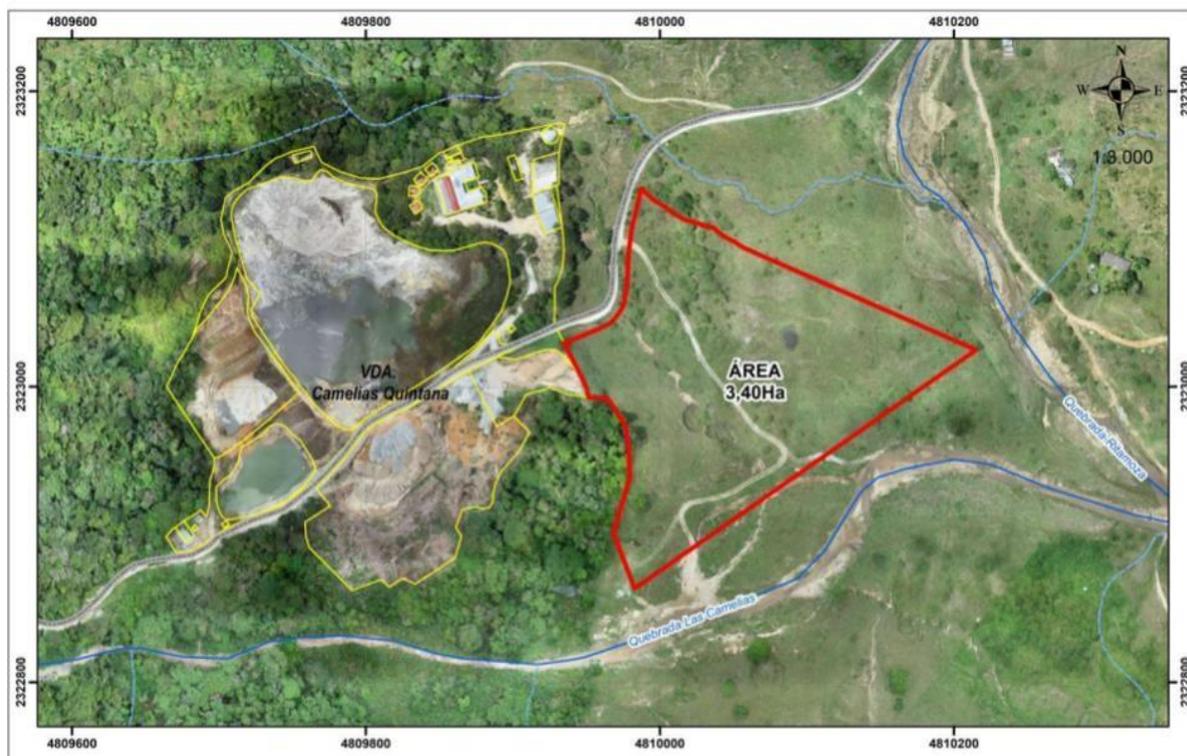
### ***Anexo 1. Registro fotográfico***

## Anexo N°1. Registro fotográfico

### 1 Relavera







## 2 Especies de plantas











3 Toma de muestra relaves

