

FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA RECUPERACIÓN Y  
REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN ÁREAS DEGRADADAS POR MINERÍA A  
CIELO ABIERTO EN LA CANTERA EL PEDREGAL, MUNICIPIO DE UNE,  
CUNDINAMARCA

JEFFER JESUS VEGA LOZANO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL  
ESPECIALIZACIÓN EN PRESERVACION Y CONSERVACION DE LOS  
RECURSOS NATURALES  
BUCARAMANGA  
2020

FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA RECUPERACIÓN Y  
REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN ÁREAS DEGRADADAS POR MINERÍA A  
CIELO ABIERTO EN LA CANTERA EL PEDREGAL, MUNICIPIO DE UNE,  
CUNDINAMARCA

JEFFER JESUS VEGA LOZANO

Trabajo de grado para optar al título de  
Especialista en preservación y conservación  
de recursos naturales

Asesor

FAUSTO ALEXIS SÁENZ JIMÉNEZ

Biólogo

PhD. en Ciencias Biológicas

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESPECIALIZACIÓN EN PRESERVACION Y CONSERVACION DE LOS  
RECURSOS NATURALES  
BUCARAMANGA  
2020

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Bucaramanga, diciembre de 2020

14 de diciembre de 2020

Jeffer Jesús Vega Lozano

Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad". Art. 92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma del autor

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Vega Lozano', written on a light-colored background.

## DEDICATORIA

*A Dios en primer lugar por ser mi guía  
A mi madre, por estar a mi lado en todo momento,  
A Luisa Chavarro por acompañarme y apoyarme siempre,  
A mis hermanos por su apoyo incondicional.*

## ***AGRADECIMIENTOS***

El autor agradece a la empresa Gravillera Albania S.A. por la confianza para permitir adelantar mi trabajo y facilitarme la información para ello. Al profesor Fausto Sáenz por su dedicación y asesoramiento. Y finalmente a todas las personas que estuvieron presentes en el desarrollo de este trabajo.

## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.	OBJETIVOS.....	5
2.1	Objetivo general .....	5
2.2	Objetivos específicos .....	5
3.	DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA .....	6
4.	ANTECEDENTES, ALCANCES Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	8
4.1	Antecedentes .....	8
4.2	Alcance .....	10
4.3	Justificación.....	11
5.	MARCO REFERENCIAL .....	12
5.1	Marco teórico .....	12
5.1.1	Minería .....	12
5.1.2	Minería a cielo abierto .....	13
5.1.3	Impactos negativos de la minería a cielo abierto .....	15
5.1.4	Plan de cierre y abandono .....	16
5.1.5	Restauración ecológica.....	19
5.2	Marco normativo .....	21
5.2.1	Marco legal minería.....	21
5.2.2	Marco legal ambiental .....	23
6.	METODOLOGÍA.....	26
6.1	Revisión de bibliografía .....	26
6.2	Caracterización del área de estudio.....	26
6.2.1	Trabajo de campo .....	27

6.3	Zonificación .....	27
6.3.1	Zonificación del área minera .....	27
6.3.2	Zonificación del plan de recuperación y rehabilitación .....	28
7.	PROPUESTA DE GUIA METODOLOGICA.....	29
7.1	Definición y delimitación del área.....	30
7.1.1	Área de estudio .....	31
7.2	Caracterización y diagnóstico del área .....	32
7.2.1	Situación actual (línea base).....	32
7.2.2	Ecosistema de referencia.....	36
7.3	Disturbios, limitantes y factores de tensión en las áreas a recuperar y/o rehabilitar.	39
7.4	Zonificación. Estado actual y selección de los sitios potenciales a ser rehabilitados y/o recuperados. ....	39
7.4.1	Zonificación del proyecto minero.....	40
7.4.2	Zonificación del plan de recuperación y rehabilitación ecológica	48
7.5	Identificación de especies vegetales para la recuperación y rehabilitación	50
7.6	Diseño de programas o tratamientos para la recuperación y/o rehabilitación ecológica. ....	56
7.6.1	Programa 1: Conformación y estabilización de terrazas (ZODME y retrolenado de áreas de explotación).....	57
7.6.2	Programa 2: Revegetalización de ZODME y áreas de explotación reconformadas con retrolenado .....	64
7.6.3	Programa 3: Rehabilitación ecológica de áreas intervenidas.....	72
7.7	Monitoreo, seguimiento y evaluación. ....	79

7.7.1	Monitoreo del suelo.....	79
7.7.2	Monitoreos de los programas.....	80
8.	CONCLUSIONES.....	86
9.	RECOMENDACIONES.....	87
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	88

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 5-1.</b> Compilado de normativa concerniente a la actividad minera en el país. ....	21
<b>Tabla 5-2.</b> Compilado de normativa ambiental donde se involucra la actividad minera en el país. ....	23
<b>Tabla 7-1.</b> Identificación de factores limitantes y tensionantes del área .....	39
<b>Tabla 7-2.</b> Especies recomendadas.....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 5-1.</b> Etapas del contrato de concesión del título minero .....	13
<b>Figura 5-2.</b> Operaciones de explotación minera a cielo abierto.....	15
<b>Figura 5-3.</b> Diferencias entre la rehabilitación y la restauración .....	20
<b>Figura 6-1.</b> Diagrama de la zonificación minera .....	28
<b>Figura 6-2.</b> Diagrama de la zonificación del plan de recuperación y rehabilitación .....	29
<b>Figura 7-1.</b> Fases planteadas para la guía metodológica.....	30
<b>Figura 7-1.</b> Ubicación del área de estudio – Cantera El Pedregal.....	31
<b>Figura 7-2.</b> Zonificación del área de intervención actual .....	41
<b>Figura 7-3.</b> Área de intervención proyectada en la modificación de licencia .....	45
<b>Figura 7-4.</b> Optimización de la planta de beneficio.....	46
<b>Figura 7-5.</b> Construcción de terrazas .....	59
<b>Figura 7-6.</b> Régimen de filtración de agua a lo largo de un talud .....	60
<b>Figura 7-7.</b> Control del nivel freático en taludes .....	60
<b>Figura 7-8.</b> Ubicación de zanjas de escorrentía en el talud.....	61
<b>Figura 7-9.</b> Impermeabilización de acequias con polietileno negro de alta densidad .....	61
<b>Figura 7-10.</b> Terrazas en área de explotación y ZODME y revegetalización.....	64

<b>Figura 7-11.</b> Semillas regadas al voleo .....	67
<b>Figura 7-12.</b> Implementación de la técnica de hidrosiembra .....	69
<b>Figura 7-13.</b> Elaboración de biomantos para la protección de taludes .....	70
<b>Figura 7-14.</b> Instalación de mantas orgánicas sobre taludes .....	71
<b>Figura 7-15.</b> Esquema de revegetalización en áreas reconvertidas con retrollado .....	72
<b>Figura 7-16.</b> Módulo de nucleación circular .....	76
<b>Figura 7-17.</b> Módulo de nucleación rectangular.....	77
<b>Figura 7-18.</b> Instalación de perchas artificiales para el desplazamiento de aves .	78
<b>Figura 7-19.</b> Monitoreo de la vegetación en procesos de restauración ecológica basados en un enfoque adaptativo .....	81
<b>Figura 7-20.</b> Formato para el registro de los aspectos de la vegetación herbácea .....	82
<b>Figura 7-21.</b> Formato para el registro de los aspectos de la vegetación arbórea y arbustiva.....	84

## **LISTA DE FOTOGRAFIAS**

<b>Fotografía 7-1.</b> Bosque de galería en el río Une .....	38
<b>Fotografía 7-2.</b> Relicto de bosque natural en área cercana a la explotación minera .....	38
<b>Fotografía 7-3.</b> Planta de beneficio .....	42
<b>Fotografía 7-4.</b> Área de explotación del material.....	43
<b>Fotografía 7-5.</b> Zona de disposición de materiales estériles .....	44
<b>Fotografía 7-6.</b> Área proyectada para la explotación minera en la etapa 3 .....	47
<b>Fotografía 7-7.</b> Área proyectada para la ampliación del ZODME.....	48
<b>Fotografía 7-8.</b> Producción de material vegetal.....	55

## GLOSARIO

Para la contextualización del presente trabajo se tendrá en cuenta el siguiente glosario que toma algunas de las definiciones del glosario técnico minero del Ministerio de Minas y Energía, (2003):

**Abandono (industria minera):** Fase del Ciclo Minero durante la cual tiene lugar la disminución gradual de la producción, la elaboración del plan de cierre de la mina, el retiro de los equipos mineros, la disposición de activos y excedentes, el cierre y la restauración de las excavaciones mineras, y las actividades para la prevención y la mitigación de los impactos ambientales por el cierre de la operación.

**Agregados pétreos:** Materiales de roca que debidamente fragmentados y clasificados, se emplean en la industria de la construcción para la parte estructural.

**Arena (industria minera):** Agregado fino natural, que incluyen tamaños de grano de 1/16 a 64 mm (arenas y guijos, según la clasificación geológica de sedimentos por tamaño de grano).

**Arenisca:** Roca sedimentaria detrítica terrígena compuesta de mínimo un 85% de materiales tamaño arena, generalmente granos de cuarzo más o menos redondeados, con tamaños entre 0,0625 y 2 mm.

**Autoridad minera:** Es el Ministerio de Minas y Energía o, en su defecto, la autoridad nacional, que de conformidad con la organización de la administración pública y la distribución de funciones entre los entes que la integran tienen a su cargo la administración de los recursos mineros.

**Cantera:** Se entiende por cantera el sistema de explotación a cielo abierto para extraer de él rocas o minerales no disgregados, utilizados como material de construcción.

**Cierre:** Terminación de actividades mineras o dismantelamiento del proyecto originado en renuncia total, caducidad o extinción de los derechos del titular minero.

**Contrato de concesión:** Son contratos administrativos celebrados entre el Estado (Ministerio de Minas y Energía, como representante de la Nación) y un particular (persona natural o jurídica) para efectuar, por cuenta y riesgo de éste, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse dentro de una zona determinada y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en la legislación vigente al momento de su celebración.

**Descapote:** Etapa en la cual se remueve la capa vegetal, el suelo o el "estéril" (mineral o roca que no representa beneficio económico para la empresa minera) que cubre un yacimiento, para dejar descubierto el mineral de interés económico.

**Desmonte:** Consiste en la remoción de vegetación en un área previa delimitada. Durante el desarrollo de esta actividad se debe dar un manejo adecuado a la vegetación removida.

**Escombrera:** Depósito donde se disponen de manera ordenada los materiales o residuos no aprovechables (estériles) procedentes de las labores de extracción minera.

**Estabilización de taludes:** Medidas de precaución y obras correctoras que se le hacen a los taludes que están o fueron explotados en operaciones mineras a cielo abierto, para evitar deslizamientos o caídas de piedras, o que los taludes se

derrumben, y al mismo tiempo dejar estructuras que permitan la siembra y la plantación.

**Estéril:** Roca que prácticamente no contiene minerales de valor recuperables, que acompañan a los minerales de valor y que es necesario remover durante la operación minera para extraer el mineral útil.

**Explotación (industria minera):** Proceso de extracción y procesamiento de los minerales, así como la actividad orientada a la preparación y el desarrollo de las áreas que abarca el depósito mineral.

**Grava (rocas sedimentarias):** Material redondeado producto de la desintegración, natural o artificial, de cualquier tipo de roca, especialmente de aquellas ricas en cuarzo, cuyo tamaño es superior a dos (2) milímetros de diámetro.

**Gravilla:** Productos de explotación de una cantera. Agregados de granulometría menor que los triturados. Se utiliza para conformación de base y mezcla asfáltica en vías y concretos.

**Materiales de construcción:** Son los productos pétreos explotados en minas y canteras usados, generalmente, en la industria de la construcción como agregados en la fabricación de piezas de concreto, morteros, pavimentos, obras de tierra y otros productos similares.

**Microclima:** Condiciones climáticas de un área generalmente pequeña.

**Mina:** Excavación que tiene como propósito la explotación económica de un yacimiento mineral, la cual puede ser a cielo abierto, en superficie o subterránea.

**Minería:** Ciencia, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales.

**Minería a cielo abierto:** Actividades y operaciones mineras desarrolladas en superficie.

**Mulch:** Cubierta superficial del suelo de naturaleza orgánica o inorgánica que tiene un efecto protector y, además, ayuda al establecimiento de la vegetación.

**Plan de desmantelamiento y clausura de la mina:** Plan que se pone en marcha tras finalizar la vida productiva de las explotaciones mineras, el cual incluye el desmantelamiento y la demolición de las instalaciones que no cumplen ninguna función y la restauración de los depósitos de estériles, con miras a eliminar posibles fuentes de contaminación de las aguas, riesgos de accidentes, erosión de los terrenos, entre otros.

**Plan de rehabilitación ambiental:** Conjunto de acciones y técnicas con el objetivo de restaurar condiciones ambientales originales o mejoradas sustancialmente en sitios contaminados o degradados como consecuencia de actividades humanas.

**Recuperación (gestión ambiental):** Acciones destinadas a devolver a los terrenos degradados la posibilidad de soportar uno o más usos del suelo, sin perjuicio del medio ambiente.

**Revegetación (revegetalización):** Plantación o siembra de especies vegetales en terrenos alterados.

**Título minero:** Es el acto administrativo escrito (documento) mediante el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y el subsuelo minero de propiedad de la Nación.

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA RECUPERACIÓN Y REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN ÁREAS DEGRADADAS POR MINERÍA A CIELO ABIERTO EN LA CANTERA EL PEDREGAL, MUNICIPIO DE UNE, CUNDINAMARCA

**AUTOR(ES):** JEFFER JESUS VEGA LOZANO

**PROGRAMA:** Esp. en Preservación y Conservación de los Recursos Naturales

**DIRECTOR(A):** MSc. FAUSTO ALEXIS SÁENZ JIMÉNEZ

### **RESUMEN**

El presente trabajo propone una guía metodológica para la recuperación y rehabilitación de las áreas intervenidas por la actividad de explotación minera a cielo abierto por la empresa Gravillera Albania S.A. en la cantera "El Pedregal" enmarcado en el título minero con Contrato de Concesión 15590 localizado en el municipio de Une, en el departamento de Cundinamarca. Se diseñaron los programas de recuperación y rehabilitación teniendo en cuenta los objetivos del plan de cierre y desmantelamiento minero donde se plantea la utilización de estos terrenos para otros usos una vez finalice la actividad minera. Los programas propuestos para restablecer el área corresponden a la conformación y estabilización de terrazas, revegetalización de ZODME y áreas de explotación reconformadas con retrolenado y rehabilitación ecológica de áreas intervenidas. Con esto se busca que las áreas intervenidas por la empresa tengan un mejoramiento en la calidad del paisaje y además se logre la reutilización del terreno para otros usos como el agropecuario y de conservación.

### **PALABRAS CLAVE:**

Rehabilitación, Recuperación, Canteras, Minería, Guía

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR AN ECOLOGICAL RECLAMATION AND REHABILITATION FOR DISTURBED LANDS BY OPEN-PIT MINING IN "EL PEDREGAL" QUARRY, LOCATED IN UNE, CUNDINAMARCA

**AUTHOR(S):** JEFFER JESUS VEGA LOZANO

**FACULTY:** Esp. en Preservación y Conservación de los Recursos Naturales

**DIRECTOR:** MSc. FAUSTO ALEXIS SÁENZ JIMÉNEZ

### **ABSTRACT**

This paper proposes a methodological guide about reclamation and rehabilitation disturbed lands by open-pit mining activity by Gravillera Albania S.A. company in El Pedregal quarry, framed in the mining title with concession contract 15590 located at Une, Cundinamarca. The reclamation and rehabilitation programs were designed considering the objectives of mining closure and dismantling plan where is proposed use these lands for other uses once the mining activity ends. The programs present the idea to restore the corresponding area including stabilization of terraces, ZODME revegetalization and reconformed exploitation lands with re-filling and ecological rehabilitation of intervened areas. As regards of the intervened areas by the company, this guide seeks improved the quality of the landscape and achieve the reuse of the land for other uses such as agriculture and conservation.

### **KEYWORDS:**

Rehabilitation, Recovery, Quarries, Mining, Guide

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería constituye una de las actividades extractivas que funcionan de manera transitoria sobre un territorio, donde las rocas o minerales que se encuentran en el subsuelo representan un interés comercial para la sociedad. Comprende una fuente de empleos directos e indirectos en las regiones donde se desarrolla esta actividad, además de generar regalías e impuestos para el país. No obstante, así como representa aspectos positivos también se considera un factor tensionante en el tema ambiental, debido a que afecta las condiciones naturales del ecosistema como la vegetación, la fauna, el relieve y el suelo (Barrera-Cataño, 2009). En la minería a cielo abierto, constituye un disturbio que a pesar de ser transitorio, deteriora por completo la estructura y función de los ecosistemas, dado que se altera la vegetación, la fauna, el suelo, el clima, e igualmente la interacción entre estos componentes (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

Específicamente, para el componente biótico (flora y fauna), los principales impactos lo constituyen la eliminación o alteración de los hábitats, los movimientos o concentración de especies o individuos a una determinada área cuando se inicia el proceso extractivo y la pérdida de conectividad ecológica. Todos estos impactos se encuentran relacionados con la eliminación de la cobertura vegetal, siendo uno de los impactos más relevantes en la minería a cielo abierto realizada en las canteras (Vadillo *et. al*, 1994).

Teniendo en cuenta lo anterior, para recuperar el área impactada por la actividad minera es necesario realizar acciones de restauración que permitan devolver el terreno a un estado similar al pre-disturbio. Para esto, es posible diseñar estrategias que propicien la recuperación del área disturbada, una de ellas es la recuperación ecológica, que se refiere a la utilización del área impactada en otro uso diferente al

inicial. Además de la estrategia mencionada, también se encuentra la rehabilitación ecológica que consiste en retornar a un estado autosostenible que puede ser similar o no al ecosistema disturbado (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). Además, tanto la recuperación como rehabilitación permiten el restablecimiento de funciones ecosistémicas para la provisión de servicios ambientales, tales como la formación de suelo y cobertura vegetal en las áreas que fueron intervenidas por la actividad minera. Esto se refleja en la conformación del terreno y aplicación de técnicas de revegetalización y la plantación de especies nativas para aumentar la vegetación arbórea y arbustiva.

Por otro lado, es importante mencionar que otro concepto asociado a la restauración, rehabilitación y recuperación de los ecosistemas que han sido destruidos o degradados corresponde a la restauración productiva cuyo objetivo es recuperar la productividad del suelo con el fin de establecer sistemas agrícolas diversificados (Borda-Niño *et al.*, 2016). En este caso no se plantea de esta manera dado que el suelo principalmente corresponderá a pastizales como uso final del suelo y en las áreas cercanas a cuerpos hídricos se plantea la rehabilitación.

Para el alcance de este trabajo se formuló un plan que contiene acciones de recuperación y rehabilitación ecológica para las áreas afectadas por la explotación minera en la cantera “El Pedregal”, mediante tratamientos orientados al restablecimiento de la flora, la fauna y las geoformas del terreno, teniendo en cuenta los lineamientos generales enunciados en el plan de cierre y desmantelamiento del concesionario minero. Es importante aclarar que no se estableció una metodología para la restauración ecológica (propriadamente dicha) del área minera, ya que al estar el ecosistema tan degradado y con muchos factores limitantes difícilmente puede llegar al ecosistema de referencia o deseado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

- Formular una guía metodológica para la recuperación y rehabilitación ecológica de las áreas destinadas a la explotación de materiales en la cantera El Pedregal.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Describir las características biofísicas del área de estudio.
- Realizar una zonificación del área minera para definir los tratamientos a realizar en cada una de las áreas afectadas.
- Diseñar diferentes tratamientos para la recuperación y rehabilitación de los terrenos alterados por la actividad minera.

### 3. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Las consecuencias más graves que ocurren en los proyectos mineros se ocasionan una vez se da el periodo de cierre de la mina. Los depósitos de material estéril, tajos abiertos, embalses y piscinas de sedimentación abandonadas pueden generar y liberar aguas altamente tóxicas que pueden causar daños importantes en las fuentes de agua (Alianza Mundial de Derecho Ambiental, 2010).

Específicamente, la actividad minera a cielo abierto puede ocasionar diversas alteraciones al ambiente tales como cambios drásticos en el relieve, modificación de la estructura geológica, degradación del suelo, alteración en el flujo de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, cambios en la interacción biótica, modificación del paisaje, destrucción de tierras destinadas a la agricultura, ruido, polvo, tráfico de camiones y maquinaria pesada, sedimentación y erosión (Arraz-González & Alberruche, 2008; Vargas, 2011). Estos efectos ocasionados por la minería repercuten directamente en las condiciones naturales del paisaje y los ecosistemas; sin embargo, más allá del impacto paisajístico que genera la remoción de la cobertura vegetal para el desarrollo de la actividad minera, se encuentra la fragmentación y pérdida de la conectividad ecológica que se ve disminuida por la antropización de las áreas naturales.

Para el desarrollo de explotación minera en el país se cuenta con el Código de Minas expedido por la Ley 685 de 2001, el cual regula todas las actividades del proceso minero en las fases de exploración, explotación y el cierre o abandono de la mina. Para dar cumplimiento a esto, en las actividades mineras se debe realizar el programa de trabajos y obras (PTO), el cual describe todos los aspectos de planeación para la explotación minera, incluyendo uno de los aspectos más importantes para retornar el sitio de explotación a su estado inicial o similar.

Específicamente, se trata de los lineamientos generales y mínimos para el desmonte y cierre de la mina. Sin embargo, en muchos casos, los operadores mineros proponen un plan de cierre y abandono de la mina muy general, sin establecer un protocolo o guía metodológica que incluya de manera detallada las acciones de recuperación y rehabilitación ecológica de las áreas que fueron intervenidas por la actividad minera a cielo abierto, como es el caso de las canteras.

Teniendo en cuenta lo anterior, la empresa Gravillera Albania S.A. suministró a este estudio con fines académicos la información contenida en el estudio de impacto ambiental (EIA) presentado a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (en adelante ANLA) y el programa de trabajos y obras (PTO) aprobado por la Agencia Nacional de Minería (ANM) de la cantera “El Pedregal” ubicada en el municipio de Une, Cundinamarca. Al revisar esta información se identificó que a pesar de tener de manera general un plan de cierre minero donde se plantea reconformar el terreno y realizar una revegetalización, no se cuenta con un protocolo que involucre una serie de etapas y tratamientos para la recuperación y rehabilitación ecológica del área una vez se realice el cierre y abandono de la mina para la futura utilización de los terrenos afectados.

En este sentido, la finalidad del presente trabajo consistió en formular una propuesta metodológica que contemple las actividades para la recuperación y rehabilitación de las áreas disturbadas por la explotación de la cantera, teniendo en cuenta los lineamientos generales enunciados en el plan de cierre y desmantelamiento de la mina establecido en el programa de trabajos y obras.

## **4. ANTECEDENTES, ALCANCES Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

### **4.1 Antecedentes**

En el departamento de Cundinamarca se encuentran vigentes 964 títulos mineros en 110 municipios y cuentan con una superficie de 170.364 ha. Las principales explotaciones corresponden a materiales de arrastre y construcción, carbón, arcilla, esmeraldas, arena, minerales de cobre, hierro, bario, zinc, hierro, calcita, mármol, sal, yeso, cuarzo, plomo y recebo, donde se destaca la extracción de materiales de arrastre y construcción con 356 títulos mineros en un área de 40.292,88 ha (Contraloría de Cundinamarca, 2018).

El proyecto “Cantera El Pedregal”, de propiedad de la empresa Gravillera Albania S.A. enmarcado en el título minero con Contrato de Concesión N.º 15590 se encuentra en operación desde el año 1996 para la explotación de 35 ha. Sin embargo, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la Agencia Nacional de Minería (ANM) requirió al operador minero la modificación del Programa de Trabajos y Obras – PTO, con lo cual, es necesario realizar la modificación de la licencia ambiental que fue otorgada mediante la Resolución 997 de septiembre 16 de 1996 (Gravillera Albania, 2018).

Dentro de la modificación de licencia ambiental se encuentra formulado el plan de cierre y abandono de la mina, este contempla de manera general las actividades de recuperación del área utilizada por la explotación minera a través de la reconformación geomorfológica del terreno con el retrolenado de material estéril, la conformación de terrazas y la revegetalización de las áreas afectadas por la actividad del complejo minero. Los objetivos que tiene la empresa en el plan de cierre minero en la cantera son: (a) Reconformar morfológicamente el área para desarrollar actividades económicas compatibles con la vocación original del terreno, (b) Estabilizar geotécnicamente las áreas que han sido utilizadas para la explotación

minera incluyendo el acopio de materiales estériles y (c) Generar áreas de protección de cuerpos de agua naturales como la quebrada Guativas y el río Une (Gravillera Albania, 2018).

El Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, (2002) a través de la “Guía minero ambiental de explotación” establece y orienta brevemente los criterios fundamentales para el cierre y abandono de la mina, los cuales deben ser considerados en todas las etapas del proyecto minero y además debe contemplar el uso posterior del suelo al terminar la actividad extractiva. Los aspectos definidos para el cierre de minas a cielo abierto involucran la estabilidad fisicoquímica del terreno y el uso del territorio, para esto es necesario estabilizar pendientes, revegetalizar, adecuar los drenajes, mantener la calidad del agua y recuperar el terreno para un uso sostenible.

Para la rehabilitación de áreas degradadas por minería es necesaria una adecuada planificación que permita resarcir el impacto ambiental y restablecer la diversidad biológica. Es importante aplicar técnicas adecuadas y la selección de especies idóneas para los sitios definidos en el área minera (Bruzón *et al.*, 2003). Para cumplir lo anterior, es necesario desarrollar una metodología que proponga actividades de forma planificada y específica para la recuperación y rehabilitación ecológica del área una vez sea finalizada la actividad minera.

Brown & Lugo (1994), mencionan que ante una intervención severa o excesiva, en especial la explotación minera, el proceso de sucesión natural es insuficiente o demasiado lenta para la conversión de tierras degradadas a un ecosistema funcional y productivo, en este caso es necesaria la intervención humana para su rehabilitación.

En este contexto, en áreas degradadas drásticamente por la minería a cielo abierto, la activación de procesos de sucesión ecológica puede superar fácilmente la escala

de vida humana para llegar a retornar a su estado original o similar debido a que la vegetación y las comunidades de fauna han sido prácticamente eliminadas (Arranz-González, 2015).

## **4.2 Alcance**

El alcance del presente trabajo es diseñar una propuesta o guía metodológica que pueda ser implementada en el proceso de cierre y abandono de la mina, acorde y complementaria con el plan de cierre y abandono del operador minero. Esto con el propósito de establecer un plan para restablecer en un menor tiempo los procesos ecológicos del área minera a través de la recuperación a zonas agropecuarias y rehabilitación de los terrenos afectados.

Con la recuperación ecológica se plantea la adecuación de estas áreas para actividades como la ganadería y cultivos compatibles lo que permitirá que la tierra siga teniendo un uso productivo una vez finalice la actividad minera. En algunos sectores es necesario considerar estrategias de rehabilitación ecológica para las áreas naturales que fueron muy degradadas y que al implementar estas acciones podrían acelerar sus procesos ecológicos y lograr unas características ecosistémicas similares a las pre-disturbio encontradas en la caracterización ambiental del área de estudio, y puedan llegar a conectarse ecológicamente con las rondas de protección de los cuerpos de agua.

Para ello, deben ser manejadas las condiciones topográficas, hidrográficas y edáficas del sitio a rehabilitar y además incorporar material vegetal que permita mantener las condiciones deseadas. Sin embargo, el primer paso debe ser remover el factor tensionante (explotación minera) y luego incorporar materia orgánica al suelo e incluir especies vegetales (Brown & Lugo, 1994).

La rehabilitación ecológica en áreas mineras debe ser basada en principios ecológicos y orientados hacia un territorio autosostenible e integrado con el entorno, con terrenos estables y suelos que puedan albergar la vegetación que permita propiciar procesos regenerativos (Arranz-González, 2015). Actualmente, la rehabilitación de tierras mineras se contempla desde de un enfoque de minería sostenible por lo que parten desde la revegetalización de las áreas degradadas una vez terminen las actividades de explotación con el fin de evitar pasivos ambientales como sucedía anteriormente.

### **4.3 Justificación**

La recuperación y rehabilitación ecológica después de las actividades mineras no son tareas sencillas, en la mayoría de los casos se desconocen las actividades técnicas y las especies a emplear, el control de especies invasoras y el monitoreo para garantizar el éxito del proceso de rehabilitación en las áreas degradadas (Gastauer *et. al*, 2018). De tal manera, se propuso una metodología para la recuperación y rehabilitación de estos terrenos lo que permitirá devolver un mejoramiento de la calidad del paisaje al tratar de mitigar los efectos adversos en la etapa de explotación minera, como la pérdida de vegetación, el suelo y la modificación de las geoformas, logrando la reutilización del terreno para otros usos como el agropecuario o de conservación.

Es importante mencionar que la utilidad de la tierra es uno de los objetivos fundamentales que se plantean para la rehabilitación de las minas a cielo abierto dado que en un escenario futuro lo que se busca es que no se obstaculice el desarrollo económico de la región y que las comunidades aledañas puedan sostener actividades agropecuarias al interactuar con estos sitios para conseguir leña, establecer cultivos o para el pastoreo de ganado cuando ya se encuentren las áreas recuperadas o rehabilitadas (Cornelissen, 2017).

## **5. MARCO REFERENCIAL**

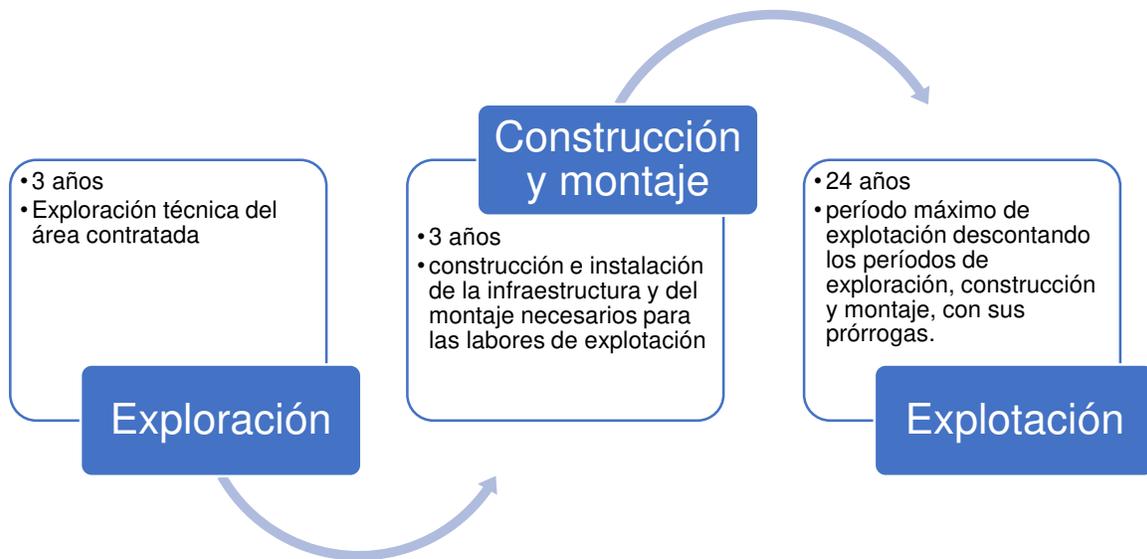
El marco de referencia permitirá dar un contexto sobre la temática abordada en el documento, el cual está enfocado a la recuperación y rehabilitación ecológica de áreas degradadas por disturbios antrópicos. Por otro lado, se encuentra la normativa y políticas nacionales concernientes en el ámbito minero ambiental en el país.

### **5.1 Marco teórico**

#### **5.1.1 Minería**

La minería como actividad económica consiste en la obtención de recursos del suelo o subsuelo para el abastecimiento de materias primas necesarias para el proceso productivo de otras actividades (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1989). En Colombia, el sector minero se caracteriza por la producción de diferentes minerales como carbón, níquel, hierro, cobre, oro, plata, platino, esmeraldas y materiales para la construcción (Ministerio de Minas y Energía, 2016). Para el desarrollo de la actividad minera se celebra un contrato de concesión entre el Estado y un particular con duración de 30 años, el cual considera la fase de exploración, construcción y montaje, explotación y cierre, el instrumento normativo que rige la ejecución de toda explotación minera es el código de minas (Ley 685 de 2001).

**Figura 5-1.** Etapas del contrato de concesión del título minero



**Fuente:** Código de Minas, 2001.

### 5.1.2 Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto corresponde a una excavación abierta al aire libre para extraer recursos minerales del subsuelo, consiste en la extracción por separado de la totalidad del material de interés y estéril que se encuentra en el macizo rocoso. (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Se caracteriza por los grandes volúmenes de material que deben ser removidos donde la disposición del yacimiento se encuentra intercalado entre material estéril y mineral a extraer (Herrera & Ortiz, 2006).

### **5.1.2.1 Métodos de explotación**

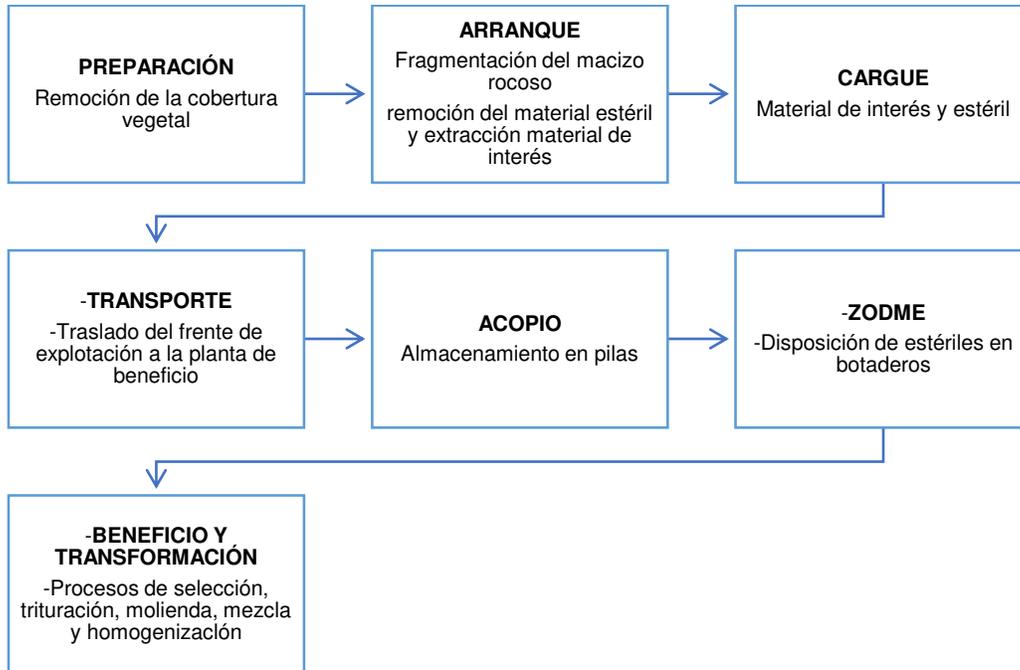
Existen diferentes métodos de explotación para la minería a cielo abierto tales como: Tajo Abierto, Minería de Cajón o Descubiertas, Minería de Contorno y Métodos Mixtos o Especiales (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2002). En este caso, el método de explotación en la cantera “El Pedregal” corresponde a un sistema de explotación mediante terrazas descendentes, se definieron los bancos de trabajo de 20 m de altura, comunicados a la vía principal de la mina.

El arranque del material útil a partir de los estratos de cuarzo-arenita y los niveles de estéril presentes como intercalaciones de lutitas carbonosas se debe hacer mediante perforación y voladura, cuyo diseño se ajusta al espesor de los estratos con el objeto de seleccionar los materiales (Gravillera Albania, 2018). Este método consiste en llevar el avance de explotación en una sola dirección y se aplica en yacimientos relativamente horizontales. Una ventaja de este método es que permite depositar los materiales estériles en el tajo excavado mediante el retrolleado (Herrera & Ortiz, 2006).

### **5.1.2.2 Actividades y operaciones**

En el siguiente gráfico se observa la secuencia de actividades y operaciones realizadas en un proyecto de minería a cielo abierto:

**Figura 5-2.** Operaciones de explotación minera a cielo abierto



**Fuente:** Adaptado de Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2002.

### 5.1.3 Impactos negativos de la minería a cielo abierto

La explotación minera trae consigo diferentes impactos ambientales, entre los cuales, se destaca la alteración del paisaje, la desaparición del uso productivo del suelo, pérdida de comunidades vegetales y alteración de las poblaciones de animales. En cuanto a la fauna, los principales impactos consisten en la eliminación de los hábitats para la fauna, fomentando los desplazamientos o concentración de especies o individuos. Por su parte, la eliminación de la cobertura vegetal ocasiona dificultades para la sucesión natural en los sitios que fueron intervenidos (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1989).

Asimismo, Fuentes (2015) reseña los principales problemas generados por las canteras abandonadas, los cuales corresponden a: contaminación de aguas subterráneas, deterioro paisajístico, desprendimiento de bloques y partes de las paredes de las canteras, aumento de la erosión del suelo y cambios en el comportamiento de la fauna.

#### **5.1.4 Plan de cierre y abandono**

A pesar de que en Colombia no existe una Ley específica que reglamente el cierre y abandono de minas, se indica de manera somera bajo los artículos 84 y 95 en el Código de Minas (Ley 685 de 2001) que como parte de las actividades de explotación se debe realizar la recuperación morfológica y paisajística del área alterada, y el plan de cierre y abandono de la infraestructura minera, respectivamente.

En complemento, las guías minero-ambientales como documentos técnicos y legales permiten orientar los proyectos mineros de forma sostenible al brindar las herramientas necesarias para la planeación y ejecución de las actividades de exploración, explotación, beneficio y transformación de minerales, incluyendo el plan de cierre minero (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Sin embargo, tal como lo menciona Noriega (2016), los planes de cierre y abandono que se proponen en los proyectos mineros son una respuesta mínima para la recuperación o rehabilitación final de las áreas degradadas, cumpliendo con apenas lo necesario que establecen los lineamientos generales de las autoridades minera y ambiental.

Ramírez (2015) resume las obligaciones del concesionario en cuanto al cierre minero: 1) plan de obras de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal, 2)

plan de cierre de la explotación y abandono de infraestructura montajes; 3) plan de desmantelamiento y 4) pago de la garantía ambiental. Se menciona que estas obligaciones son ambiguas por parte de la regulación minera y ambiental, una vez se realiza la terminación del contrato de concesión y el cierre de la mina, muchas veces los planes de cierre y abandono no son muy efectivos para resarcir los daños ambientales o sociales producidos después del cierre de la mina y que se han ido acumulando a lo largo del desarrollo del proyecto minero.

La finalidad de los planes de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal, plan de cierre y plan de desmantelamiento es lograr que el área intervenida por minería sea reaprovechada para un uso posterior. Además, es necesario tener en cuenta las características bióticas, abióticas y sociales del sitio, por lo cual, debe contarse con esta información desde el inicio de las actividades mineras y actualizando según los cambios a que haya lugar (Ramírez, 2015).

En la práctica es necesario desarrollar planes metodológicos que complementen lo descrito en el plan de cierre y abandono propuestos en el PTO y el EIA como requisitos para la obtención del contrato de concesión minera y la licencia ambiental, respectivamente. La inclusión de las actividades de recuperación y rehabilitación en el proyecto de explotación desde la fase de prospección de las áreas que serán intervenidas permitirá establecer en un menor tiempo y optimizar recursos cuando se esté ejecutando el cierre minero (Chaviano *et al.*, 2011).

La rehabilitación y recuperación de las áreas mineras surgen como una obligación que debe ser realizada por el operador minero como lo establece la normativa minera y ambiental en el país. La rehabilitación entendida como el proceso de restablecimiento de un ecosistema que ha sido alterado de forma extrema por la actividad minera busca desarrollar a través de una serie de etapas o procedimientos la recuperación de procesos ecológicos en las áreas que han concluido la extracción y zonas de disposición de residuos o estériles (Torres *et al.*, 2019). En definitiva, los

procesos de rehabilitación ecológica permiten restituir a través de la sucesión vegetal las áreas degradadas por minería desde el punto de vista estructural y funcional al restablecer las condiciones propicias del ecosistema en cuanto a los recursos bióticos y abióticos (Gualdrón, 2011).

Por ejemplo, Carbones del Cerrejón en el departamento de La Guajira se posiciona como una de las empresas pioneras en temas de rehabilitación de minas a cielo abierto con una experiencia de más de 20 años donde han alcanzado más de 2.800 hectáreas de tierras rehabilitadas en donde antiguamente se situaban tajos y botaderos de estériles y que ahora forman coberturas de bosque en sucesión (Gualdrón, 2011).

En cuanto a la recuperación del área explotada por minería a cielo abierto, los usos potenciales más comunes son: recreación pasiva, agrícola o forestal, conservación, embalses y rellenos sanitarios. Sin embargo, el más recomendado para tierras intervenidas por actividades mineras es el uso agropecuario (Ramírez, 2015). La recuperación para dichas áreas debe priorizar el restablecimiento de las propiedades del suelo para satisfacer los requerimientos de los pastizales y cultivos. Por lo cual, es necesario que cuando se establezcan las acciones de recuperación sean seleccionadas las especies vegetales que propicien el desarrollo del ecosistema (Gastauer *et. al*, 2018).

Para la recuperación de los sitios intervenidos por canteras se requiere en primera instancia el restablecimiento de la capa vegetal a través de procesos de revegetalización con especies gramíneas, arbustivas y arbóreas que en un momento dado bajo las condiciones necesarias permitirá el regreso de la fauna (CAR, 2009). Es importante tener en cuenta el manejo y destino de los materiales edáficos cuando se realiza la remoción y descapote de las áreas de intervención, esto con el fin de utilizar este suelo orgánico o vegetal en los sitios donde

posteriormente se desarrollará la adecuación morfológica, estabilización de suelos y la rehabilitación (Gualdrón, 2011).

### 5.1.5 Restauración ecológica

La Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica - SER (2004) define la **restauración ecológica** como “el proceso de ayudar el restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido”. Con la restauración ecológica se busca llevar el ecosistema degradado a un estado muy similar al de predisturbio en cuanto a la composición de especies, estructura y función. El ecosistema restaurado debe ser autosostenible y proporcionar los servicios ambientales que poseía históricamente (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

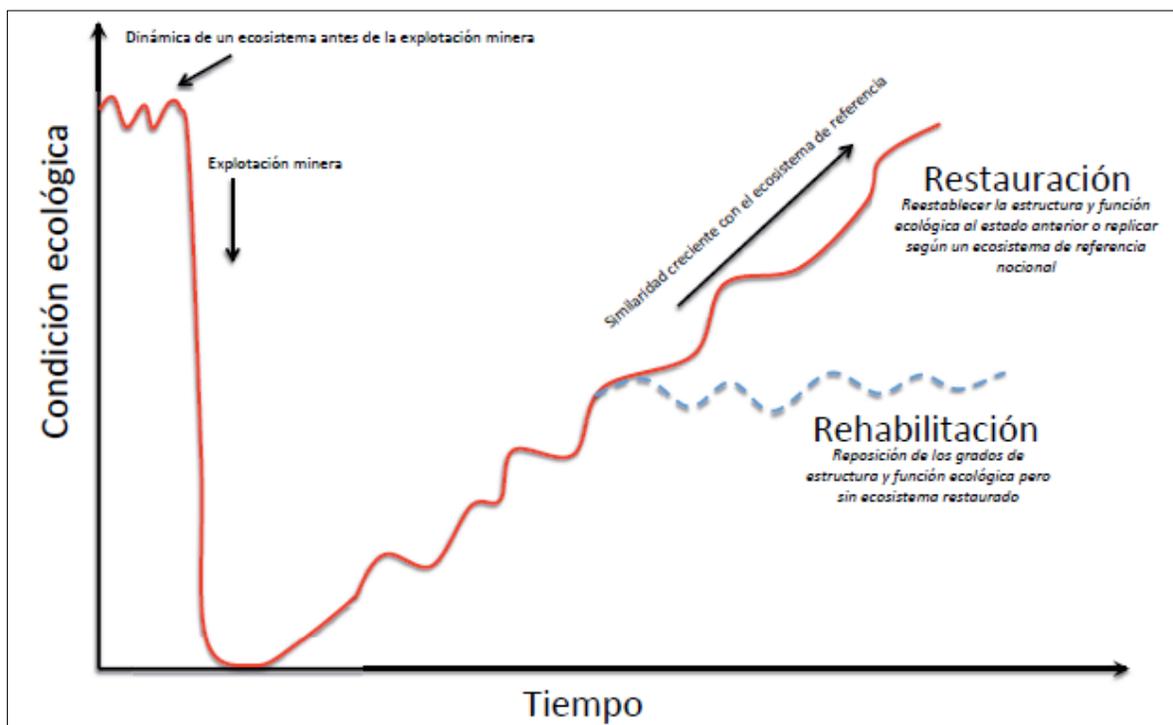
Cabe resaltar que la restauración no solo enmarca una perspectiva ambiental, el cual reinicia procesos ecológicos que fueron interrumpidos cuando un ecosistema se vio afectado, sino que además incide en diferentes aspectos como los son la conservación, ya que esta recupera la biodiversidad ante una pérdida por los disturbios antrópicos. Además, en el ámbito socioeconómico influye en los beneficios ecológicos y productivos, ya que durante este proceso se recupera el ecosistema y los servicios que benefician las comunidades locales. Finalmente, tiene un componente cultural, en la forma que se relacionan todos los procesos de la restauración ecológica, mediante el cual se fortalecen las interacciones entre comunidades, instituciones privadas y organizaciones estatales que pueden ser locales, municipales, departamentales y nacionales (Yule & Fournier, 2013).

En áreas muy degradadas como la minería, es muy difícil alcanzar una restauración ecológica propiamente dicha, en estos casos generalmente se realizan acciones como rehabilitación, recuperación o reclamación y la revegetalización. No obstante, la restauración incluye o lleva implícita las actividades como rehabilitación o

recuperación dado que son las primeras fases del proceso de restauración ecológica (Vargas, 2007).

La **rehabilitación ecológica** comparte con la restauración el enfoque de recomponer un ecosistema histórico. Sin embargo, no implica llegar al ecosistema original en cuanto a composición y estructura sino a un estado de mejoramiento del ecosistema que fue degradado en donde se restablezcan algunas funciones ecosistémicas y de productividad (SER, 2004; Vargas, 2007).

**Figura 5-3.** Diferencias entre la rehabilitación y la restauración



**Fuente:** Programa de Prácticas Líderes para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera, 2016.

Por su parte, la **recuperación ecológica** consiste en restablecer las áreas que fueron afectadas por actividades humanas para que presten un servicio de interés social como recreación, uso agropecuario y silvopastoril, por lo cual, el ecosistema final es diferente al predisturbio y no es autosostenible (Barrera-Cataño *et al.*, 2010;

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Generalmente, en la recuperación o reclamación se incluye como una de las fases la estabilización del terreno, mejoramiento estético y reconversión de las tierras en un entorno productivo regional (SER, 2004).

La **revegetalización** o revegetación comprende el establecimiento de una o varias especies de plantas (hierbas, arbustos y árboles) sobre un sitio donde fue removida su cobertura vegetal, sin que necesariamente sea la vegetación original (SER, 2004; Vargas, 2007).

## 5.2 Marco normativo

### 5.2.1 Marco legal minería

La actividad minera en el país está regulada por el Ley 685 de 2001 (Código de Minas), el cual establece las fases de exploración, explotación y cierre de las minas. A continuación, se describen las leyes o decretos complementarios que regulan la actividad minera en el país:

**Tabla 5-1.** Compilado de normativa concerniente a la actividad minera en el país.

Norma	Descripción
Ley 685 de 2001	Por el cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.
Ley 1382 de 2010	Por el cual se modifica la ley 685 de 2001 código de minas. con relación a zonas excluibles de la minería; prórroga y renovación de contratos; integración de áreas; autorización temporal e intransferible, para tomar de los predios rurales, vecinos o aledaños a la obra, los materiales de construcción que necesiten exclusivamente para dicha obra, con base en la constancia que expida la entidad para la cual se realice la obra y que especifique el

Norma	Descripción
	trayecto de la vía o característica de la obra, la duración de los trabajos y la cantidad máxima que deberá utilizarse.
Ley 14 de 2011	Plan Nacional de Desarrollo, introduce algunas modificaciones sobre multas, reservas mineras estratégicas, prohibiciones a la minería por razones ambientales, plan nacional de ordenamiento minero, adiciona causales de caducidad y suspensión por razones de seguridad minera, control a la explotación ilícita.
Ley 1753 de 2015	Plan Nacional de Desarrollo (2014-2018): Art. 20: Se da continuidad a las áreas estratégicas mineras creadas en el artículo 108 de la Ley 1450 de 2011, como mecanismo alternativo al régimen ordinario, para la asignación al derecho de explorar y explotar minerales, por medio de un proceso de selección objetiva. Denomina estas áreas como "áreas de reserva estratégica mineras".
Ley 1753 de 2015	Áreas de reserva para el desarrollo minero. Las áreas de reserva para el desarrollo minero serán las siguientes: Art. 20 Áreas de Reserva Estratégica Mineras: La Autoridad Minera Nacional determinará los minerales de interés estratégico para el país, respecto de los cuales, con base en la información geocientífica disponible, podrá delimitar indefinidamente áreas especiales que se encuentren libres.
Decreto 1666 de 2016	Decreto único reglamentario del sector administrativo de minas y energía. Se clasificaron las actividades mineras. En minería de subsistencia, pequeña, mediana y grande; facultando al gobierno para definirla y establecer sus requisitos
Decreto 1160 de 2006	Por el cual se adoptan medidas para garantizar el derecho de prelación en caso de empate en la presentación de propuestas de contratos de concesión minera.
Decreto 4134 de 2011.	Se crea la Agencia Nacional de Minería (ANM); se determina su objetivo y estructura orgánica.
Decreto 1073 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía
Decreto 2222 de 1993	Reglamento de higiene y seguridad en labores mineras en cielo abierto. Art. 11, vigilancia y control. Este decreto fue actualizado por

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
	la ley 1562 de 2012, por la cual se modificó el sistema de riesgos laborales.
Resolución 422 de 2016	Por medio de la cual se establece el procedimiento para la terminación de la aprobación del subcontrato de formalización minera.
Resolución 908 de 29 de agosto de 2016	Por el cual se establecen los criterios para la elaboración, evaluación y ejecución de los planes de gestión social, de conformidad con lo establecido por el artículo 22 de la ley 1753 de 2015
Resolución 41107 de 2016	Por la cual se incluyen y modifican algunos términos del glosario técnico minero
Resolución 205 de 2013	Se establece el procedimiento para la declaración y delimitación de Áreas de Reserva Especial de qué trata el artículo 31 de la Ley 685 de 2001
Resolución 40391 de 20 de abril de 2016	Marco de operación y la línea estratégica para el desarrollo del sector en el país. Análisis contextual con los principales retos del sector, así como el marco estratégico y los pilares que se deben tener en cuenta para que la actividad genere valor agregado al desarrollo de las regiones.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 5.2.2 Marco legal ambiental

En cuanto al aspecto ambiental se encuentra regulado dentro de la Ley 99 de 1993 donde como requisito para adelantar el proyecto minero es necesaria la obtención de licencia ambiental. Se describen a continuación la normativa complementaria en el ámbito ambiental implícito en la actividad minera:

**Tabla 5-2.** Compilado de normativa ambiental donde se involucra la actividad minera en el país.

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
Ley 99 de 1993	Ley General Ambiental de Colombia

Norma	Descripción
	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones
Resolución 0627 de 2006	Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.
Ley 1333 de 2009	Por el cual se establece el proceso sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Establece el procedimiento sancionatorio ambiental y la Titularidad de la potestad sancionatoria en materia Ambiental para imponer y ejecutar las medidas preventivas y sancionatorias que necesita el país.
Decreto 3573 de 2011	Por el cual se crea la Autoridad Nacional de licencias ambientales – ANLA-y se dictan otras disposiciones.
Decreto 2041 de 2014	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
Decreto 2767 de 2012	Por el cual se reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras disposiciones.
Decreto 1374 de 2013	Por medio del cual se establecen parámetros para el señalamiento de unas reservas de recursos naturales de manera temporal y se dictan otras disposiciones.
Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y lo valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1076 de 2015	Decreto único reglamentario del sector de ambiente y desarrollo sostenible
Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 2ª de 1959	Para el desarrollo de la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre”, establecer con carácter de “Zonas Forestales Protectoras”, y “Bosques de Interés General” según la

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
	clasificación establecida en el Decreto legislativo número 2278 de 1953

**Fuente:** Elaboración propia.

## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1 Revisión de bibliografía**

Se llevó a cabo la revisión de información secundaria consultando publicaciones en revistas científicas, tesis de investigación, libros y guías técnicas relacionadas con restauración, rehabilitación y recuperación de áreas mineras. Esto con el objetivo de revisar teorías y metodologías aplicables a la presente propuesta de recuperación y rehabilitación de áreas degradadas por explotación de canteras. Se tuvo en cuenta la Guía minero-ambiental de explotación (2002) de MinMinas y Minambiente, la Guía para la Explotación, Mitigación y Recuperación de Canteras de la CAR Cundinamarca y trabajos realizados en la rehabilitación de áreas afectadas por minería a cielo abierto.

En cuanto a la restauración y rehabilitación ecológica como bases técnicas de la propuesta, se revisaron diferentes documentos técnicos acerca de restauración ecológica como las Guías Técnicas para la Restauración Ecológica de los Ecosistemas de Colombia del Ministerio de Ambiente y el grupo de Restauración ecológica de la Universidad Nacional, el Protocolo Distrital de Restauración Ecológica, Manual de restauración ecológica de los ecosistemas disturbados del Distrito Capital, entre otros.

### **6.2 Caracterización del área de estudio**

Las características biofísicas comprenden un papel muy importante en la recuperación de las zonas afectadas por la operación minera ya que proporciona información sobre la condición actual del ambiente para la zonificación del área de estudio y selección de los tratamientos de recuperación y rehabilitación. Para ello, se llevó a cabo la revisión del Estudio de Impacto Ambiental presentado por Gravillera Albania a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, el

Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Une, Cundinamarca para considerar los aspectos ambientales (abióticos, bióticos y socioeconómicos) de la zona de estudio.

### **6.2.1 Trabajo de campo**

Se realizó una visita de campo en el mes de noviembre de 2019 en el área minera con el fin de realizar un reconocimiento de la zona en las áreas de explotación actual, zona de depósito de material estéril, área de beneficio y transformación, oficinas y reservorios. Se hizo un recorrido en sectores aledaños al área de explotación y proyectada para identificar los relictos de vegetación natural existente dentro del área, esto con el objetivo de reconocer el ecosistema de referencia (bosque nativo) y establecer que especies pueden ser las más recomendables para ser seleccionadas en la rehabilitación ecológica.

## **6.3 Zonificación**

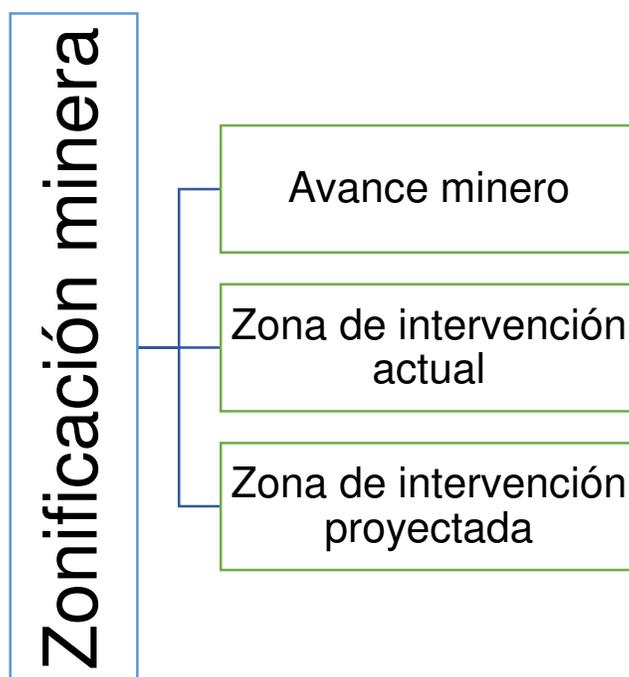
### **6.3.1 Zonificación del área minera**

La zonificación minera establece las condiciones actuales del entorno sobre el cual se desarrolla el proyecto. Para la zonificación de la cantera “El Pedregal” se tomó la información del Programa de trabajos y Obras, el cual define el avance minero que se llevará a cabo hasta la finalización de actividades.

En la actualidad se tiene la zona de explotación, área de beneficio y zona de disposición de materiales estériles (ZODME). Sin embargo, dentro de la solicitud de modificación de licencia ambiental que se encuentra adelantando el operador minero, se pretende la ampliación de las áreas de explotación, la ampliación del ZODME actual y la construcción de otro adicional, donde se proyecta el depósito de suelo vegetal y estériles. En este sentido, se utilizó la información cartográfica del

área de estudio mediante el cruce o superposición de mapas de las diferentes zonificaciones del estudio ambiental y el avance minero utilizando el programa ArcGIS 10.2.

**Figura 6-1.** Diagrama de la zonificación minera

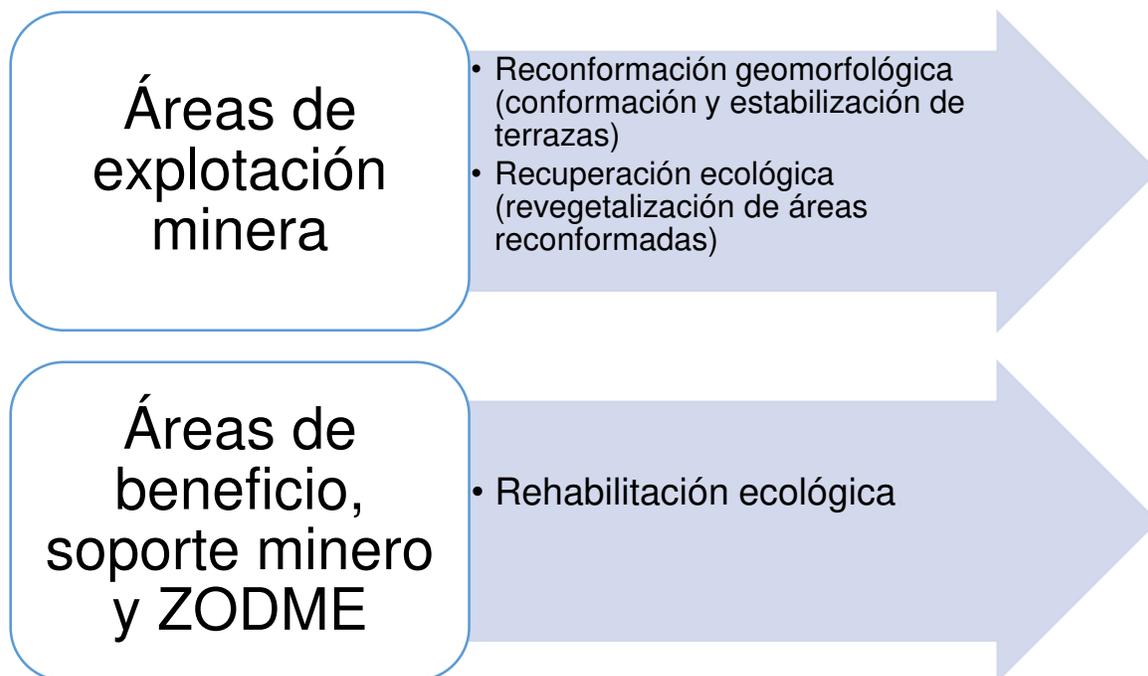


**Fuente:** Elaboración propia

### **6.3.2 Zonificación del plan de recuperación y rehabilitación**

Una vez realizada la zonificación minera del área de estudio, se procedió a establecer la zonificación del plan de recuperación y rehabilitación con el fin de identificar zonas con características homogéneas. Esta zonificación contiene los programas o tratamientos con las acciones de recuperación y rehabilitación ecológica propuestas para el cierre de la cantera, teniendo en cuenta las diferentes actividades realizadas en el proyecto minero.

**Figura 6-2.** Diagrama de la zonificación del plan de recuperación y rehabilitación

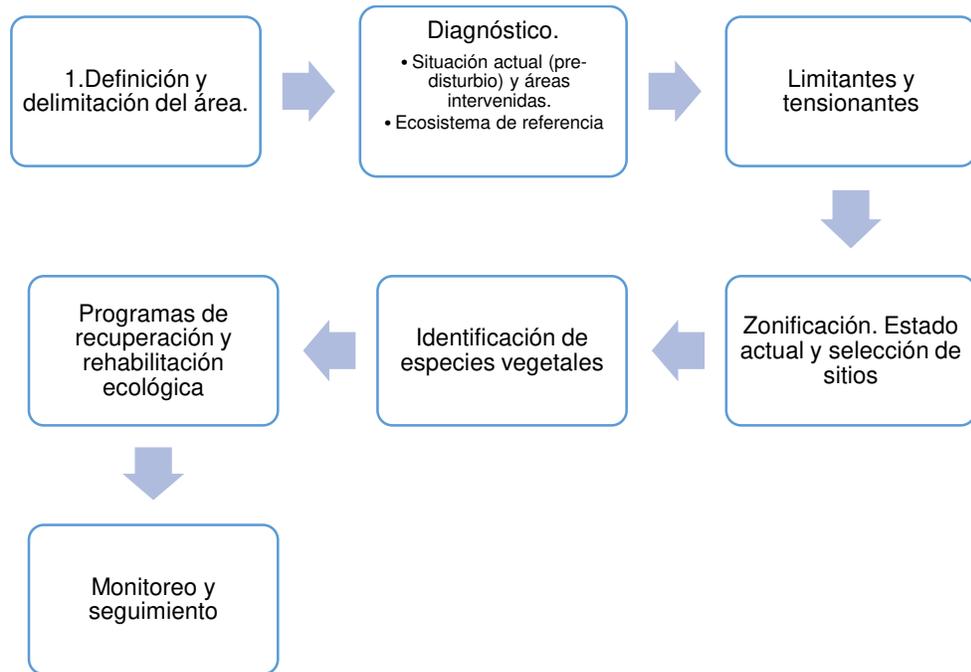


Fuente: Elaboración propia

## 7. PROPUESTA DE GUIA METODOLOGICA

Para la recuperación y rehabilitación ecológica de las áreas intervenidas por la explotación de materiales en la cantera El Pedregal, se presenta a continuación un esquema que puede ser utilizado en la implementación del plan de cierre y abandono de la mina y con ello se garantice el éxito del proceso de reconversión del área afectada (Vargas, 2007; Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, 2012; Aguirre *et al.*, 2013). A continuación se presentan las fases planteadas para el desarrollo de la propuesta de recuperación y rehabilitación en la cantera.

**Figura 7-1.** Fases planteadas para la guía metodológica



**Fuente:** Elaboración propia

## 7.1 Definición y delimitación del área

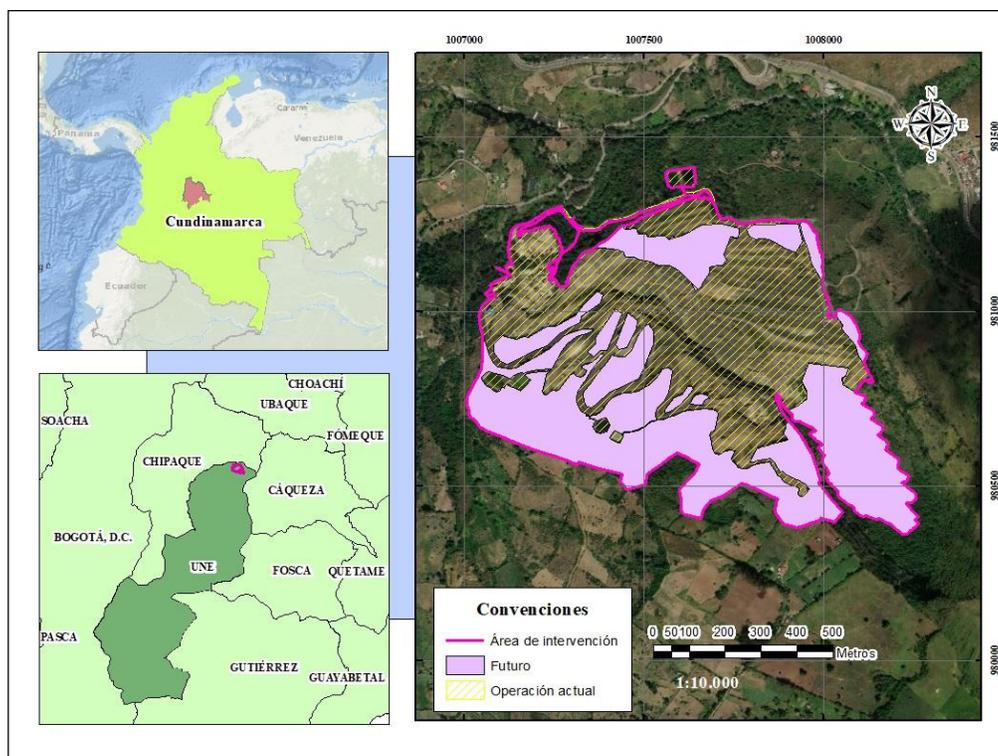
El primer paso para realizar un proceso de rehabilitación o recuperación ecológica en zonas que fueron afectadas por minería consiste en definir y delimitar el área donde se plantean encaminar las actividades deseadas. El reconocimiento del sitio permite identificar algunas características para darnos una idea rápida de las condiciones ambientales y de su estado en el área (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). Dependiendo de las características y su ubicación se pueden identificar los factores que facilitarían el éxito del proceso de rehabilitación y/o recuperación.

Esto puede definirse con base en las áreas de intervención del operador minero utilizando la cartografía base y temática del estudio de impacto ambiental. La delimitación debe tener en cuenta las áreas actualmente intervenidas y las proyectadas según el avance minero.

### 7.1.1 Área de estudio

El proyecto “Cantera El Pedregal” enmarcado en el título minero con Contrato de Concesión 15590 se localiza en las estribaciones Surorientales de la cordillera Oriental en la cuenca media-alta del río Une a una elevación aproximada de 2100 msnm., en jurisdicción de las veredas Timasita, Hoya de Carrillos, San Luis, Mategá y Puente Tierra en el municipio de Une departamento de Cundinamarca. El proyecto minero se encuentra a una distancia de 35 km la capital del país por la vía Bogotá-Villavicencio (Gravillera Albania, 2018). En la Figura 1 se ubica el proyecto minero “Cantera El Pedregal” de propiedad de la empresa Gravillera Albania donde se observan la explotación actual y la proyectada dado que su operación está contemplada hasta el año 2050.

**Figura 7-2.** Ubicación del área de estudio – Cantera El Pedregal en el municipio de Une, Cundinamarca.



Fuente: Adaptado de Gravillera Albania, 2018.

## **7.2 Caracterización y diagnóstico del área**

Cuando se plantea un proceso de recuperación y/o rehabilitación se debe realizar un diagnóstico para conocer el estado del área degradada y el ecosistema de referencia (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). Para la caracterización del área de interés se deben considerar los aspectos abióticos, bióticos y sociales para tener una referencia del estado actual de las áreas que se pretenden intervenir (pre-disturbio) y de las que ya se encuentran intervenidas donde se proponen realizar las actividades de recuperación y rehabilitación ecológica.

Para ello se pueden tomar elementos del estudio de impacto ambiental presentado por Gravillera Albania S.A. con el fin de proporcionar una breve descripción del área de estudio, esto permite tener información clave para determinar la manera en que se deben abordar los procesos de recuperación del área intervenida.

### **7.2.1 Situación actual (línea base)**

#### **7.2.1.1 Geología**

El área de estudio se encuentra conformada por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior pertenecientes al Grupo Villeta, representado por las formaciones, de más antigua a más joven, Une (K1K2u) y Chipaque (K2cp) cubiertas por sedimentos Cuaternarios que corresponden a Depósitos coluviales y aluviales (Gravillera Albania, 2018).

### **7.2.1.2 Geomorfología**

Según Gravillera Albania (2018), el relieve y las geoformas que componen el área de estudio se encuentra caracterizado por las siguientes unidades y subunidades geomorfológicas:

- Unidades y subunidades de origen denudacional: Glacis de ladera denudada (Dgld) y Cerros residuales de ladera denudada (Dcrlld).
- Unidades y subunidades de origen estructural: Ladera estructural de homoclinal (Slehl), Ladera contrapendiente de homoclinal (Slhlcp) y Ladera contrapendiente de homoclinal denudada (SlhLcpd).
- Unidades y subunidades de origen fluvial: Planicie o llanuras de inundación de río (Fpi) y Cauce de río (Fpic).
- Unidades y subunidades de origen antrópico: Ladera contrapendiente de homoclinal denudada antrópicamente (Alhlcpd) y Planos de explanación.

### **7.2.1.3 Clima**

Los valores medios anuales de los registros de temperatura oscilan entre 8,4 °C y 17,3 °C dado por la presencia de gradientes topográficos y altitudinales (EOT Une, 2000), con registros mínimos entre los meses de junio y septiembre (Gravillera Albania, 2018). El régimen de precipitación tiene un patrón monomodal, con precipitación promedio anual de 1.019,68 mm (EOT Une, 2000). La época húmeda corresponde al periodo comprendido entre abril y noviembre, con registros que van desde 55,5 mm a 216,4 mm, siendo los meses de mayo, junio y julio los meses de mayor precipitación, y la época seca se presenta entre diciembre y marzo con registros entre 12,9 mm y 103,8 mm (Gravillera Albania, 2018).

#### 7.2.1.4 Suelos

El suelo en el área de estudio corresponde a suelos del paisaje de montaña con relieves de crestas, crestones, cuevas, glaciares y vallecitos. El uso del suelo en términos generales se encuentra conformado por unidades antrópicas como son cultivos y sistemas pecuarios extensivos a semi-intensivos con algunos relictos de vegetación natural (Gravillera Albania, 2018).

En el área de estudio tenemos varios tipos de suelo, los cuales han sido clasificados por consociaciones que se ubican en alturas entre 2.000 y 3.000 m s.n.m., el clima ambiental es frío cuyas temperaturas que varían entre 12 y 18°C. En primer lugar, tenemos la consociación Typic Ustorthents (MLT) el cual es originado por rocas clásticas limoarcillosas y arenosas; este tipo de suelo cuenta con un buen drenaje, y su textura es moderadamente fina y su profundidad efectiva varía de profundas a superficiales. En su composición química su pH es de 6,61 y cuenta con altos contenidos de calcio, sodio, potasio, magnesio y carbón (Gravillera Albania, 2018).

La consociación Typic Haplusteps (MLM) tiene suelos originados a partir de depósitos clásticos hidrogravigénicos. Se encuentran limitados por la carencia de humedad y la superficialidad de la profundidad efectiva. Son suelos ligeramente ácidos con pH 6,5 con altos contenidos de calcio, magnesio, potasio y fósforo (Gravillera Albania, 2018).

Por su parte, en la consociación Thaptic Haplidands (MMJ) los suelos se originaron a partir de rocas clásticas arenosas, limoarcillosas y mantos de ceniza volcánica; además cuentan con un buen drenaje y las texturas son moderadamente finas a moderadamente gruesas. En cuanto a las características químicas son suelos ácidos con pH entre 4,4 y 5,5; las cantidades de calcio, magnesio y fósforo son bajas y los contenidos de potasio son medios a altos en los primeros horizontes y

disminuyen con la profundidad. La fertilidad natural es moderada (Gravillera Albania, 2018).

#### **7.2.1.5 Zonas de vida**

El área de estudio se encuentra en las zonas de vida de bosque seco montano bajo (bs-MB) y bosque húmedo montano bajo (bh-MB), según Holdridge. El bosque seco montano bajo (bs-MB) tiene como características una temperatura media entre 12 y 18 °C aproximadamente, una precipitación anual promedio de 500 a 1000 mm y una altura sobre el nivel del mar entre 2000 a 3000 m. La vegetación que predomina en esta formación es: *Baccharis* sp., *Duranta mutisii*, *Cordia* sp. *Oreopanax* sp., *Clusia* sp., *Dodonaea viscosa*, entre otras especies (Guzmán, 1996).

El bosque húmedo montano bajo (bh-MB) se caracteriza por presentar una temperatura de 12 a 18 °C, un promedio de precipitación entre 1000 a 2000 mm y una altitud entre 2000 y 3000 m s.n.m., al encontrarse sobre el piedemonte tiene mayor influencia de lluvias. Las especies de flora propias de esta formación son: *Abatia parviflora*, *Alnus acuminata*, *Baccharis latifolia*, *Cavendishia cordifolia*, *Cedrela montana*, *Myrcianthes leucoxylla*, *Morella pubescens*, *Piper bogotensis*, entre otras (Guzmán, 1996).

#### **7.2.1.6 Flora**

Los remanentes boscosos del municipio de Une se encuentran principalmente en las franjas paralelas a los cursos de agua y las áreas con fuertes pendientes. Los bosques naturales se encuentran dominados por las siguientes especies: *Weinmannia* sp., *Clusia* sp., *Tibouchina lepidota*, *Myrsine guianensis*, *Morella parvifolia*, *Morella pubescens*, *Oreopanax floribondum*, *Miconia squamulosa*, *Phyllanthus salveifolius*, *Croton funkianus*, *Myrcianthes leucoxylla*, *Alnus acuminata*, *Bejaria resinosa*, entre otros (EOT Une, 2000).

### 7.2.1.7 Fauna

La fauna silvestre como elemento fundamental de la biodiversidad y los ecosistemas se encuentra representada por cinco (5) especies de anfibios, 14 especies de reptiles, 88 especies de aves y 15 especies mamíferos en el área de influencia del proyecto minero. Entre los anfibios, la especie más predominante fue *Pristimantis bogotensis* con 63 individuos. En cuanto a reptiles se observaron las especies de *Mastigodryas boddaerti*, *Stenocercus trachycephalus* y *Ptychoglossus* aff. *bicolor* (Gravillera Albania, 2018).

Las aves como uno de los grupos de fauna con mayor número de especies que se registraron en el área de estudio con un total de 68, de las que se destaca la presencia de las especies migratorias: *Empidonax virescens*, *Vireo olivaceus* y *Pygochelidon cyanoleuca*. En mamíferos se registraron 13 especies donde los órdenes más ricos en especies fueron Rodentia con siete (7) especies y Chiroptera con tres (3) especies de murciélagos. Se destaca la presencia de especies como: *Didelphis marsupialis*, *Sciurus granatensis*, *Oligoryzomys delicatus*, *Sylvilagus brasiliensis*, *Carollia perspicillata*, *Dermanura bogotensis* y *Uroderma bilobatum* (Gravillera Albania, 2018).

### 7.2.2 Ecosistema de referencia

Como referencia para el medio biótico se tiene la información de los ecosistemas y coberturas vegetales de las áreas pre-disturbio que será intervenida por la actividad minera de la empresa, como también de las áreas circundantes identificadas en el Estudio de Impacto Ambiental como área de influencia del proyecto minero.

De acuerdo con el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (2012), la vegetación es un elemento muy importante que debe caracterizarse antes de proponer planes de restauración en zonas mineras donde es necesario tener en

cuenta la composición y estructura de las principales especies vegetales que dominan el área, las cuales, posteriormente podrán servir como especies potenciales para la revegetalización del área una vez haya sido degradada por la actividad minera.

Para ello se realizaron visitas de campo al proyecto minero y además se utilizó como base el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) realizado por INERCO Consultoría Colombia para Gravillera Albania S.A. y con el cual se solicita a la Autoridad Ambiental la modificación de la licencia ambiental del proyecto “Cantera El Pedregal” contrato de concesión 15590, este documento fue suministrado por el operador minero al presente estudio con fines académicos.

La vegetación de las áreas naturales circundantes al proyecto minero es propia de las zonas de vida de bosque seco montano bajo (bs-MB) y bosque húmedo montano bajo (bh-MB). Se destaca la presencia de *Fraxinus chinensis* sobre la ronda de protección de la quebrada Guativas y las especies *Myrcia popayanensis*, *Euphorbia cotinifolia*, *Clusia multiflora*, *Vismia baccifera*, *Dahlia imperialis*, *Delostoma integrifolium*, *Inga acuminata*, *Miconia theaezans*, *Frangula* cf. *goudotiana*, como las más predominantes en las coberturas naturales presentes en la zona. Otras especies registradas en los bosques nativos del área de estudio fueron *Baccharis latifolia*, *Cavendishia bracteata*, *Cordia cylindrostachya*, *Dodonaea viscosa*, *Duranta mutisii*, *Escallonia paniculata*, *Macleania* sp., *Miconia squamulosa*, *Myrsine coriacea*, *Morella pubescens*, *Piper bogotense* y *Xylosma spiculifera* (Gravillera Albania, 2018).

**Fotografía 7-1.** Bosque de galería en el río Une



**Fuente:** El autor.

**Fotografía 7-2.** Relicto de bosque natural en área cercana a la explotación minera



**Fuente:** El autor.

### 7.3 Disturbios, limitantes y factores de tensión en las áreas a recuperar y/o rehabilitar.

En esta etapa se deben identificar los factores limitantes y tensionantes del área degradada. Con esto se busca identificar las características internas y externas que faciliten el restablecimiento del área a recuperar o rehabilitar (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

Para el caso del área de explotación minera se pueden establecer los siguientes factores limitantes y tensionantes:

**Tabla 7-1.** Identificación de factores limitantes y tensionantes del área

<b>Factores limitantes</b>	<b>Factores tensionantes</b>
Suelo infértil (pocos nutrientes)	Ampliación de la actividad minera
Baja disponibilidad de semillas	Ganadería
Áreas con geomorfología inadecuada	Cultivos agrícolas
Erosión del suelo	Ausencia de vegetación natural
Alta pendiente en taludes	Fragmentación y pérdida de hábitats
Baja presencia de dispersores naturales	

Fuente: Elaboración propia

### 7.4 Zonificación. Estado actual y selección de los sitios potenciales a ser rehabilitados y/o recuperados.

La zonificación es el proceso de subdivisión de un territorio en unidades relativamente homogéneas, a partir de los aspectos abióticos y bióticos. Para realizar la zonificación se debe considerar la información existente del área a recuperar o rehabilitar, junto con la información primaria que pueda ser levantada en el sitio (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

De acuerdo con Barrera-Cataño *et al.*, (2010) los pasos para seguir en la zonificación son:

- Definir el tamaño del área degradada. Esta información debe ser corroborada con cartografía y visitas a campo.
- Compilar, revisar y analizar la información secundaria que se presente para el área a nivel de imágenes y trabajos realizados.

Para la zonificación se debe tener en cuenta la cartografía presentada en el Estudio de Impacto Ambiental y la utilización del software Google Earth para definir las áreas que se encuentran en operación del área minera con su infraestructura asociada. Adicionalmente, se es necesario identificar las áreas donde el concesionario minero tiene proyectado ampliar la zona de explotación con el fin de obtener información del área antes de su intervención. Basados en la zonificación definida anteriormente, se pueden definir las estrategias de restauración (recuperación y rehabilitación) para acelerar el restablecimiento del área (Barrera-Cataño *et al.*, (2010)

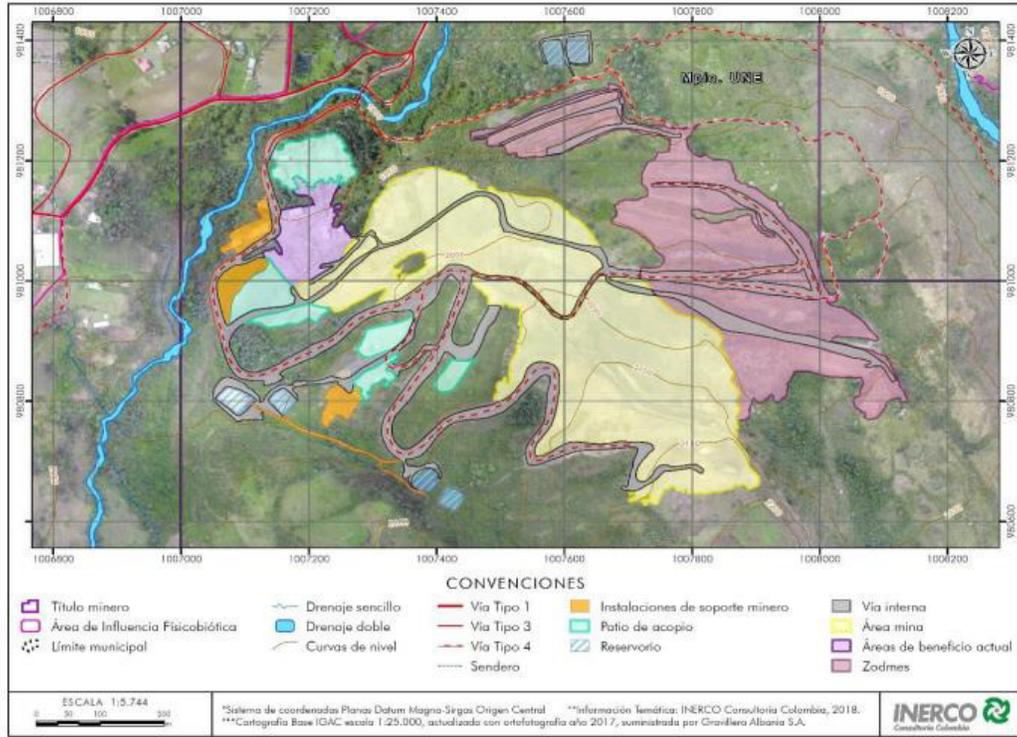
#### **7.4.1 Zonificación del proyecto minero**

Comprende los espacios geográficos definidos para el proyecto minero de acuerdo con las actividades y etapas. A continuación, se establece la zonificación actual y la proyectada del proyecto en el marco de la modificación de licencia ambiental.

##### **7.4.1.1 Zona de intervención actual**

El proyecto de explotación de material de construcción en la cantera El Pedregal en el marco del Contrato de Concesión 15590 y aprobado mediante la Resolución 997 de 1996 para la explotación de 35 ha.

**Figura 7-3. Zonificación del área de intervención actual**



**Fuente:** Gravillera Albania, 2018. Adaptado por INERCO Consultoría Colombia, 2018.

#### 7.4.1.1.1 Área de beneficio e instalaciones de soporte

Se encuentran conformadas por las áreas de beneficio y soporte de la actividad minera tales como: patios de acopio, vías de acceso internas, planta de beneficio y transformación, reservorios de sedimentación existentes, áreas de mantenimiento, estación de servicio interna, almacén, laboratorio para control de calidad, báscula para despacho, instalaciones administrativas y oficinas, áreas comunes, las cuales son consideradas como infraestructura de soporte del proceso de minero.

**Fotografía 7-3.** Planta de beneficio



**Fuente:** El autor.

#### **7.4.1.1.2 Área de explotación minera**

Comprende las áreas donde se desarrolla la actividad extractiva, es decir, los frentes de explotación de la materia prima. En esta categoría se incluyen el tajo a cielo abierto comprendido por una serie de bancos de extracción del macizo rocoso, el cual, contiene las reservas de materiales de explotación.

**Fotografía 7-4.** Área de explotación del material



**Fuente:** El autor.

#### **7.4.1.1.3 ZODME**

Corresponde a las áreas del proyecto minero destinadas al depósito de material estéril (Zona de Disposición de Materiales Estériles - ZODME), el cual no representa ningún valor económico y que posteriormente será utilizado para labores de estabilidad del terreno o retrolleado.

**Fotografía 7-5.** Zona de disposición de materiales estériles

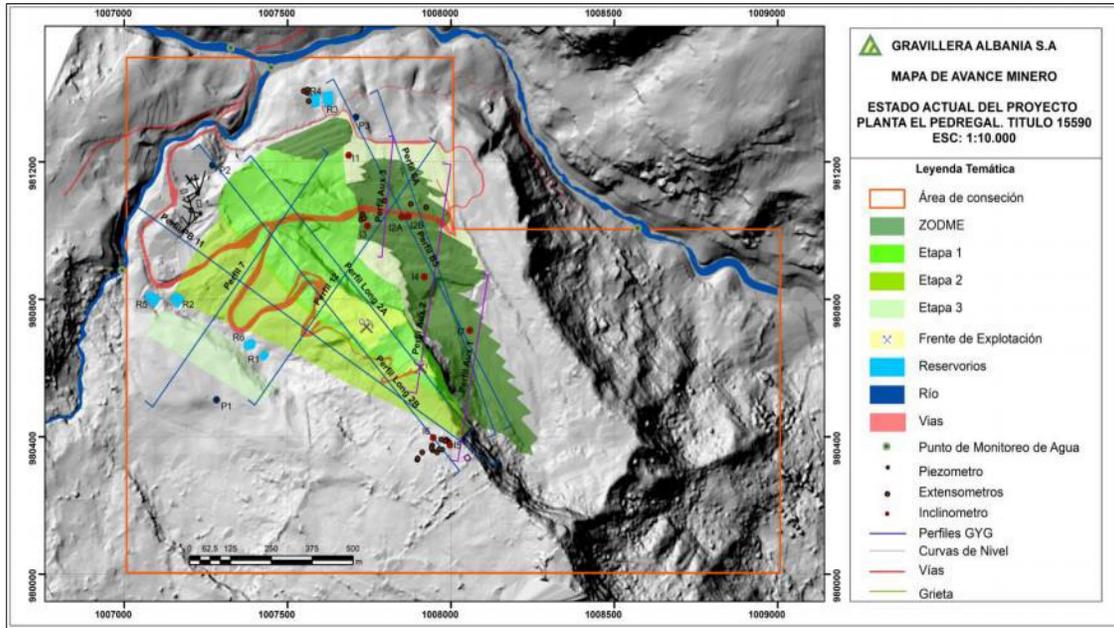


**Fuente:** El autor.

#### **7.4.1.2 Zona de intervención proyectada**

Teniendo en cuenta la proyección de la cantera para los próximos años de acuerdo con la solicitud de modificación de licencia ambiental, se ha tenido en cuenta la ampliación del área de explotación y ZODME dado que la optimización de la planta de beneficio como actividad contemplada en la modificación de licencia se encuentra sobre la misma área en el escenario actual. El área final de intervención del proyecto tiene una extensión de 76,94 hectáreas.

**Figura 7-4.** Área de intervención proyectada en la modificación de licencia

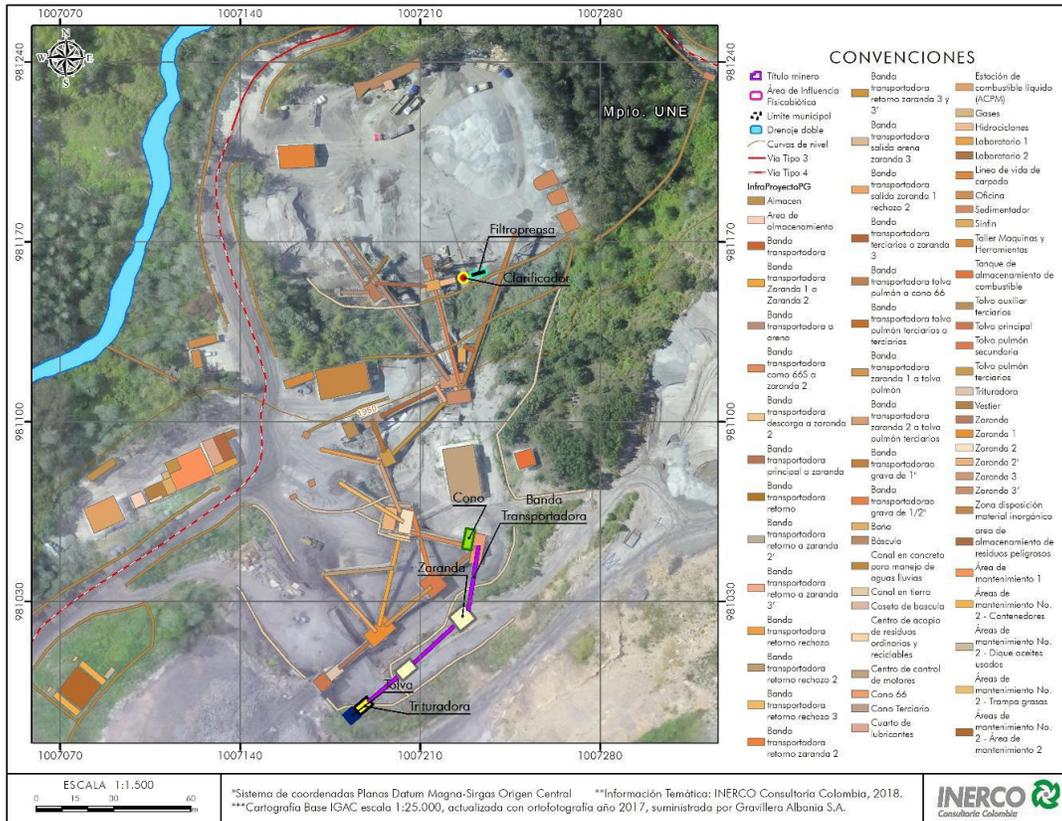


Fuente: Gravillera Albania, 2018.

#### 7.4.1.2.1 Área de beneficio e instalaciones de soporte

Las áreas de beneficio y transformación para el escenario proyectado (modificación de la licencia ambiental) no contemplan la ampliación de estas áreas. Sin embargo, si se plantea la adecuación y optimización de la planta, que consiste en la reubicación y distribución de los equipos de tal forma que se produzcan materiales que cumplan con las especificaciones técnicas. En cuanto a la infraestructura de soporte si se contempla la ampliación de las vías internas, la conformación de los dos nuevos reservorios y el mejoramiento de la infraestructura existente (Gravillera Albania, 2018).

**Figura 7-5. Optimización de la planta de beneficio**



Fuente: Gravillera Albania, 2017. Adaptado por INERCO Consultoría Colombia, 2018

### 7.4.1.2.2 Área de explotación minera

Considerando que la modificación de licencia ambiental propone una ampliación de las áreas de explotación minera teniendo en cuenta la secuencia de explotación que culminan en el año 2050. En este sentido, las áreas que aún no se han intervenido serán incluidas para un escenario futuro de explotación con base en las reservas estimadas por el concesionario minero como se menciona en el Programa de Trabajos y Obras PTO. Es importante mencionar que dentro de estas áreas se contempla la construcción de vías internas para la mina. A continuación, se observa una de las áreas que hacen parte de la ampliación de la explotación minera denominado el escarpe Mategá.

**Fotografía 7-6.** Área proyectada para la explotación minera en la etapa 3



**Fuente:** El autor.

#### **7.4.1.2.3 ZODME**

Dado que los volúmenes a remover por la extracción de la cantera, se proyecta la ampliación del ZODME y la adecuación de un nuevo sitio para el manejo de los estériles sobrantes del proceso minero. De acuerdo con Gravillera Albania (2018) las obras a realizar corresponden a la ampliación de la geometría del ZODME actual que incluye la adecuación del sistema de drenaje que permita que el agua fluya evitando encharcamientos e inestabilidad de los taludes.

**Fotografía 7-7.** Área proyectada para la ampliación del ZODME



Fuente: El autor.

#### **7.4.2 Zonificación del plan de recuperación y rehabilitación ecológica**

La zonificación para la restauración apunta a definir el estado de degradación de las diferentes unidades y en cuáles de ellas amerita que se realice la restauración para finalmente establecer los objetivos y las estrategias de manejo que se deben implementar en cada una.

La zonificación es un insumo importante para el desarrollo de los diferentes programas de recuperación y rehabilitación del proyecto minero. Teniendo en cuenta la zonificación del área minera (actual y proyectada), se establecieron las zonas apropiadas para los tratamientos o programas dependiendo del uso final que se dará posterior al proyecto minero.

El uso final que se estableció fue el agropecuario y de conservación, esto con el fin de desarrollar actividades económicas compatibles con la vocación original y

mantener las áreas naturales. En este sentido, se realizará la reconfiguración morfológica del terreno previa a las acciones de revegetalización (recuperación ecológica) donde se destinarán las áreas para uso agropecuario enfocado a prácticas productivas sostenibles.

Para los sectores circundantes del área intervenida se propone en cercanías de los cuerpos de agua naturales (quebrada Guativas y río Une) y la zona de disposición de materiales estériles (ZODME) el establecimiento de los tratamientos de rehabilitación ecológica con el objetivo de aumentar la cobertura vegetal arbórea y arbustiva nativa.

#### **7.4.2.1 Zona de conformación y estabilización de terrazas**

En esta zona se propone la reconfiguración del terreno en forma de terrazas para las áreas donde se realizó la extracción minera. Inicialmente, se debe realizar el retrolleado de los bancos de explotación con el material estéril depositado en los zodmes.

#### **7.4.2.2 Zona de revegetalización de áreas reconfiguradas con retrolleado**

Comprende las áreas donde se realizó la explotación minera, donde fue sustraído el subsuelo como material de interés económico para la producción de la cantera. Se caracteriza por su topografía donde se encuentran los pits de explotación. En esta zona se propone la recuperación ecológica como tratamiento para el restablecimiento de las funciones del área impactada. La revegetalización también será realizada en el área de ZODME con el fin de estabilizar los taludes y las terrazas.

### **7.4.2.3 Zona de rehabilitación ecológica**

Se localizará en los sitios de depósito de material (ZODME) y las áreas aledañas a la quebrada Guativas y el río Une. Es un área propicia para reactivar la conectividad ecológica y mejorar la oferta hídrica, la flora y la fauna. La vegetación que se propone en esta zona corresponde es propia de los ecosistemas ubicados en la zona de vida de bosque húmedo montano bajo (bh-MB) y bosque seco montano bajo (bs-MB) ubicados entre los 2.000 a 3.000 msnm y un rango de temperatura entre 12 y 18 °C.

## **7.5 Identificación de especies vegetales para la recuperación y rehabilitación**

La selección de especies se considera un factor clave para implementar cualquier proceso de restauración o rehabilitación en áreas intervenidas por minería. De acuerdo con Vargas (2007), uno de los pasos fundamentales para el éxito de un proyecto de restauración corresponde a la selección de las especies, las cuales, deben ser escogidas teniendo en cuenta el potencial de regeneración y que puedan adaptarse al sitio a restaurar.

Un criterio importante para la selección de las especies es utilizar especies nativas que puedan aportar mayor diversidad al ecosistema que se desea recuperar o rehabilitar y además permita el establecimiento de nuevos individuos para alcanzar etapas sucesionales más avanzadas (Cogollo *et al.*, 2020). Para ello, se debe partir de la identificación de las principales especies que caracterizan ecológicamente las coberturas vegetales presentes en la zona, esto permite que se desarrolle de forma satisfactoria la recuperación, rehabilitación o restauración en el área degradada (Díaz & Torres, 2001).

Teniendo en cuenta las especies registradas para la zona de vida y coberturas naturales en la caracterización del área de estudio, pueden realizarse los diseños florísticos con especies de hábito herbáceo, arbustivo y arbóreo dependiendo de las características del sitio y el tratamiento a realizar. Para llevar a cabo procesos de restauración, rehabilitación y recuperación ecológica en áreas degradadas, las especies deben ser pioneras, de rápido crecimiento, tener buena adaptación, alta reproducción y aptas para colonizar espacios abiertos (García, 2016).

Es importante mencionar que se debe evitar el uso de especies exóticas y/o invasoras porque pueden desequilibrar los ecosistemas y pueden llevar una trayectoria de rehabilitación diferente a la deseada, por tal motivo, se recomiendan las siguientes especies nativas que por sus características ecológicas son facilitadoras para la reactivación de procesos de regeneración natural y pueden ser utilizadas en el proceso de recuperación y rehabilitación de la cantera El Pedregal, es posible realizar diferentes combinaciones dependiendo del tipo de especie y la disponibilidad de las mismas (ver tabla 7-2).

**Tabla 7-2.** Especies recomendadas

<b>Nombre científico</b>	<b>Posición sucesional</b>	<b>Posición ambiental</b>	<b>Función</b>
<i>Abatia parviflora</i>	Inductor preclimácico priseral	2400-3200 msnm. Hace parte de los rastrojos bajos y altos. Heliófito.	Restauración de bosques, nacederos y cañadas.
<i>Baccharis latifolia</i>	Precursor leñoso priseral	2500-2950 msnm. Suelos pesados y deteriorados, pendientes suaves a moderadas. Heliófito.	Excelente para recuperación de suelos desnudos, control de taludes y surcos.
<i>Cavendishia cordifolia</i>	Inductor preclimácico priseral	2050-3200 msnm. Suelos pesados pero bien drenados. Laderas, escarpes y cañadas. Heliófito.	Recuperación y estabilización de taludes y focos de erosión o deslizamientos.

<b>Nombre científico</b>	<b>Posición sucesional</b>	<b>Posición ambiental</b>	<b>Función</b>
<i>Chusquea scandens</i>	Inductor preclimácico diaseral	2500-3300 msnm. Abundante en cañadas y en laderas. Heliófito.	Protección de márgenes hídricos. Estabilización de taludes y escarpes. Conexión de relictos fragmentados.
<i>Clusia multiflora</i>	Inductor preclimácico tardiseral	1800-3300 msnm. Suelos muy bien drenados, humedad alta y permanente. Frecuente en rastrojos húmedos en pendientes de moderadas a fuertes. Esciófito parcial.	Estabilización de taludes y escarpes. Protección de nacedores en laderas.
<i>Cordia cylindrostachya</i>	Inductor preclimácico tardiseral	2500-2900 msnm. Suelos con mal drenaje. Hace parte de rastrojos y bosques riparios. Heliófito.	Restauración de bosques. Inducción de pastizales y matorrales abiertos.
<i>Cortaderia nitida</i>	Pionera herbácea	2800-3400 msnm. Suelos pesados, con mal drenaje. Se encuentra en suelos degradados con abundante roca expuesta. Heliófito.	Restauración de suelos erosionados en zonas paramizadas.
<i>Dahlia imperialis</i>	Herbácea	Crece en cerros y lomeríos. Habita entre los 2000 a 3300 msnm en el bosque húmedo montano bajo y bosque seco montano bajo.	Control de erosión y restauración ecológica
<i>Dodonaea viscosa</i>	Precursor leñoso	2200-2900 msnm. Suelos bien drenados, en ladera, zonas secas y matorrales. Heliófito.	Restauración de focos de erosión severa y afloramientos rocosos.

<b>Nombre científico</b>	<b>Posición sucesional</b>	<b>Posición ambiental</b>	<b>Función</b>
<i>Duranta mutisii</i>	Precursor leñoso	2500-2900 msnm. Suelos pesados de pie de ladera, coluvios y colinas. Heliófitas.	Restauración de potreros compactados y franjas húmedas en focos de erosión.
<i>Escallonia paniculata</i>	Inductor preclimácico mesoserá	2500-2900 msnm. Suelos pesados de pie de laderas y laderas sobre materiales geológicos arcillosos. Heliófitas durables.	Restauración de nacederos, rondas y cañadas. Rehabilitación del bosque.
<i>Eragrostis tenuifolia</i>	Herbácea	Arbustal subxerofítico, abundante suelo desnudo y árido.	Control de erosión
<i>Lupinus bogotensis</i>	Inductor preclimácico priserá	Crece entre los 2300 – 3200 msnm. Claros de regeneración natural	Restauración ecológica, fijación de nitrógeno
<i>Solanum lycioides</i>	Precursor leñoso	2500-2900 msnm. Suelos muy erosionados en zonas secas. Forma matorrales abiertos. Heliófitas.	Restauración de focos de erosión severa. Protección de taludes de vías.
<i>Macleania</i> sp.	Inductor preclimácico priserá	2700 - 3200 msnm. Suelos bien drenados. Frecuentemente en rocas y suelos superficiales. Abundante en escarpes y focos de erosión severa. Heliófitas.	Estabilización de taludes y focos de erosión severa. Recuperación de canteras.
<i>Miconia squamulosa</i>	Precursor leñoso	2500-3000 msnm. Suelos francos a ligeramente pesados, húmedos y con alto contenido de materia orgánica. Forma matorrales y rastrojos bajos.	Control de focos de erosión superficial. Inducción de bosques sobre potreros.

Nombre científico	Posición sucesional	Posición ambiental	Función
<i>Myrcianthes leucoxylla</i>	Precursor leñoso	2400-2900 msnm. Suelos pesados de pie de ladera, colinas y cañadas. Heliófito.	Restauración de focos de erosión severa. Restauración de nacimientos, rondas y cañadas
<i>Morella sp.</i>	Precursor leñoso	2400-3100 msnm. Suelos pesados en laderas. Frecuente en suelos erosionados, desplomes y canteras.	Restauración de focos de erosión severa en sustratos pesados y puntos húmedos.
<i>Myrsine coriácea</i>	Inductor preclimácico	Desde 1000 hasta 3100 msnm. Suelos de ligeros a francos en laderas y colinas. Tolera suelos erosionados. Heliófito.	Eficaz en la inducción de matorrales y bosques bajos.
<i>Piper bogotense</i>	Inductor preclimácico priseral	2300-2900 msnm. Suelos pesados, orgánicos y profundos, con drenaje lento. Heliófito.	Restauración de márgenes hídricos y nacedores de agua
<i>Phytolacca bogotensis</i>	Herbácea	Habita sobre vegetación en transición y bosques intervenidos	Restauración de áreas abiertas
<i>Xylosma spiculifera</i>	Inductor preclimácico	2300-2900 msnm. Dominante en los rastrojos de las cañadas. Heliófito.	Recuperación de focos de erosión en suelos pesados, en puntos y franjas húmedos. Restauración de nacedores y rondas.

**Fuente:**DAMA, 2000; Acosta & Vargas, 2008; Cogollo *et al.*, 2020; Díaz & Torres, 2001.

Cabe mencionar que la mayoría de las especies presentadas en la tabla anterior fueron registradas en la caracterización florística del área de influencia del Estudio de Impacto Ambiental adelantado por el concesionario minero. Dichas especies fueron *Cordia cylindrostachya*, *Baccharis latifolia*, *Dahlia imperialis*, *Clusia*

*multiflora*, *Cavendishia bracteata*, *Macleania sp.*, *Escallonia paniculata*, *Xylosma spiculifera*, *Miconia squamulosa*, *Morella pubescens*, *Piper bogotense*, *Myrsine coriacea*, *Dodonaea viscosa* y *Duranta mutisii* (Gravillera Albania, 2018).

#### 7.5.1.1 Material vegetal

Es importante que el sitio donde se obtiene y produce el material vegetal se encuentre junto la zona de implementación del proceso de recuperación y rehabilitación, esto con el fin de garantizar las mismas condiciones climáticas y así asegurar la adaptabilidad de las plántulas cuando sean plantadas en el sitio definitivo (Díaz & Torres, 2001).

Para la producción del material vegetal, la empresa Gravillera Albania cuenta con un vivero forestal, allí se realizan los procesos germinativos para la obtención de las plántulas que son utilizadas para la reforestación de las áreas destinadas para la compensación del proyecto minero y la revegetalización del ZODME que ya fue culminado. La propagación del material vegetal de las especies seleccionadas podrá ser realizada en este vivero, donde se garantizará la cantidad de plántulas necesarias para la rehabilitación.

**Fotografía 7-8.** Producción de material vegetal



**Fuente:** Gravillera Albania, 2018.

Para la producción de las especies recomendadas, se pueden realizar recorridos sobre los bosques aledaños para realizar la recolección de semillas de las especies deseadas y que estas sean germinadas en el vivero. Asimismo, se podrían trasladar plántulas (brinzales) que crecen debajo del dosel de los bosques cercanos y llevarlas al vivero donde posteriormente serán ubicadas en el sitio definitivo para ser trasplantadas.

#### **7.6 Diseño de programas o tratamientos para la recuperación y/o rehabilitación ecológica.**

Una vez realizada la caracterización biofísica del área de estudio y la identificación del ecosistema de referencia, se desarrolló la propuesta de las áreas donde serán realizados los programas de recuperación y rehabilitación ecológica. En este sentido, para cumplir con los objetivos mencionados con la elaboración de una guía metodológica que permita la recuperación y rehabilitación ecológica de la cantera “El Pedregal”, se propone plantear distintos tratamientos o programas basados en los siguientes autores: Barrera-Cataño *et al.* (2010), Gualdrón (2011), Martínez (2020), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015), Noriega (2016), Sarmiento (2008), Torres *et al.* (2019) y Vargas *et al.* (2012), los cuales corresponden a estudios de caso de proyectos de rehabilitación en áreas intervenidas por minería y documentos técnicos acerca de restauración ecológica.

Teniendo en cuenta las áreas de intervención del proyecto minero, a continuación se proponen diferentes programas o tratamientos que favorezcan la recuperación y rehabilitación de los sitios afectados. Las actividades propuestas para la recuperación y rehabilitación ecológica en el área de intervención minera son:

1. Conformación y estabilización de terrazas.
2. Revegetalización de áreas reconformadas con retrolenado.
3. Rehabilitación ecológica de áreas intervenidas.

A continuación, se describe cada uno de los programas a realizar:

#### **7.6.1 Programa 1: Conformación y estabilización de terrazas (ZODME y retrolenado de áreas de explotación)**

Dentro de las actividades que se realizan en las canteras se generan depósitos de estériles del material que no tiene interés económico, este es ubicado en áreas denominadas ZODME. Dicho material se dispone posteriormente para el retrolenado de las áreas de explotación con el fin de reconformar y estabilizar geomorfológicamente el terreno mediante terrazas.

Inicialmente, se debe solucionar el inconveniente de la inestabilidad de los taludes y el manejo de las aguas superficiales para controlar procesos de erosión, una vez se haya realizado esto se puede empezar a trabajar en el recubrimiento vegetal de las áreas desprovistas de vegetación (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

De acuerdo con la Guía Ambiental Para el Cierre y Abandono de Minas en Perú y Martínez (2020), para mejorar la estabilidad de los taludes y tajos abiertos se recomiendan las siguientes etapas:

1. Perfilado (aplanamiento de taludes y suavizado de pendientes)
2. Escalonamiento de taludes (terrazas intermedias)
3. Construcción de zanjas (drenaje de taludes)
4. Recubrimiento con suelo vegetal
5. Empradizado (revegetalización)

A continuación, se describen cada una de las actividades mencionadas anteriormente para lograr la conformación y estabilización de las terrazas donde se realizará el retrolleado de las áreas afectadas por la explotación minera y los sitios de disposición de esteriles (ZODME).

#### **7.6.1.1 Perfilado de taludes (suavizado de taludes y pendientes)**

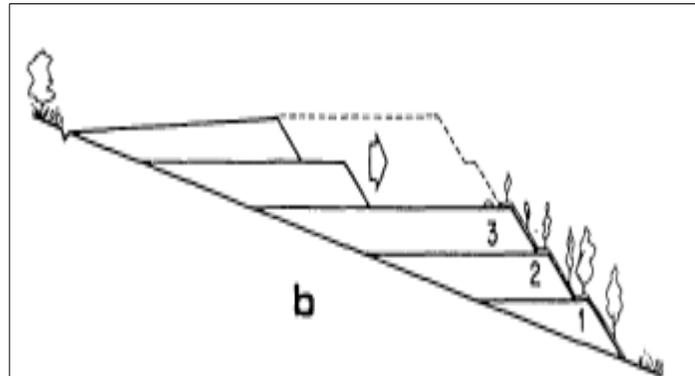
En este sentido, la reconfiguración del terreno consiste básicamente en el perfilado de los taludes que se establecen con las terrazas, esto permite mejorar la estabilidad del suelo (CAR, 2009). El suavizado puede ser realizado con bulldozer a través del perfilado de taludes permitiendo instalar suelos sobre las terrazas y dar una adecuación paisajística (Martínez,2020).

El perfilado del talud permite disminuir el grado de la pendiente, mejora considerablemente su estabilidad y ofrece un espacio adecuado para el establecimiento de plantas. Además, es recomendable para realizar el ordenamiento de los taludes y adaptarlos al paisaje como uso final una vez finalice las actividades del proyecto (Escobar & Duque, 2017).

#### **7.6.1.2 Escalonamiento de taludes - construcción de terrazas intermedias**

Para reconfigurar y estabilizar geomorfológicamente el terreno serán utilizados los residuos o material estéril y mediante maquinaria pesada se establecerán las terrazas, con esto se busca un aplanamiento del talud y el terreno tendrá una configuración más estable. Dado que estas terrazas corresponden a un escalonamiento de taludes, se necesitará realizar un manejo de las aguas de escorrentía a través de la construcción de las estructuras hidráulicas como canales o zanjas que eviten la saturación de agua, y por ende, impidiendo que se puedan generar procesos de remoción en masa.

**Figura 7-6.** Construcción de terrazas



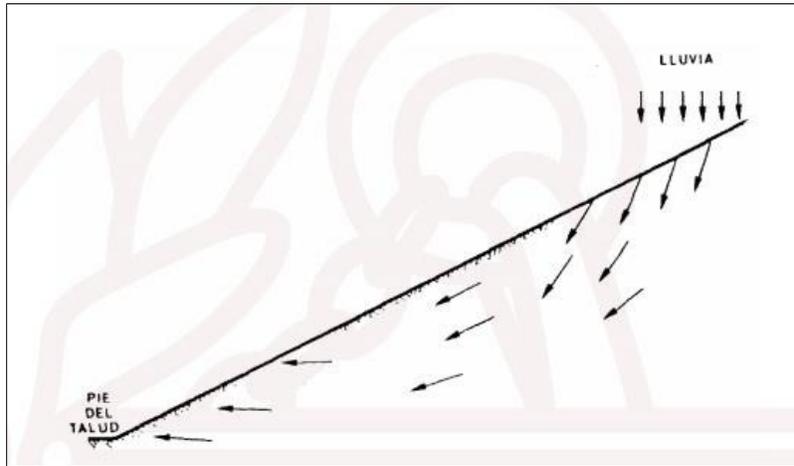
**Fuente:** Aramburu *et al.*, 1990.

Estas terrazas serán establecidas inicialmente en las áreas de botaderos, las cuales podrán ser rehabilitadas una vez hayan alcanzado su capacidad máxima de depósito.

### **7.6.1.3 Construcción de zanjas o drenajes superficiales**

Los taludes formados por los depósitos de sobrantes de suelo corresponden a taludes con pendientes cercanas al ángulo de reposo y una baja estabilidad, por lo cual, son muy susceptibles a la erosión. Para mejorar la estabilidad de los taludes lo mejor es controlar los niveles freáticos a través de la instalación de drenajes subterráneos y la construcción de zanjas impermeables. Esto evita que las aguas de escorrentía puedan infiltrar directamente el talud a través de los poros o fisuras del terreno (Escobar & Duque, 2017).

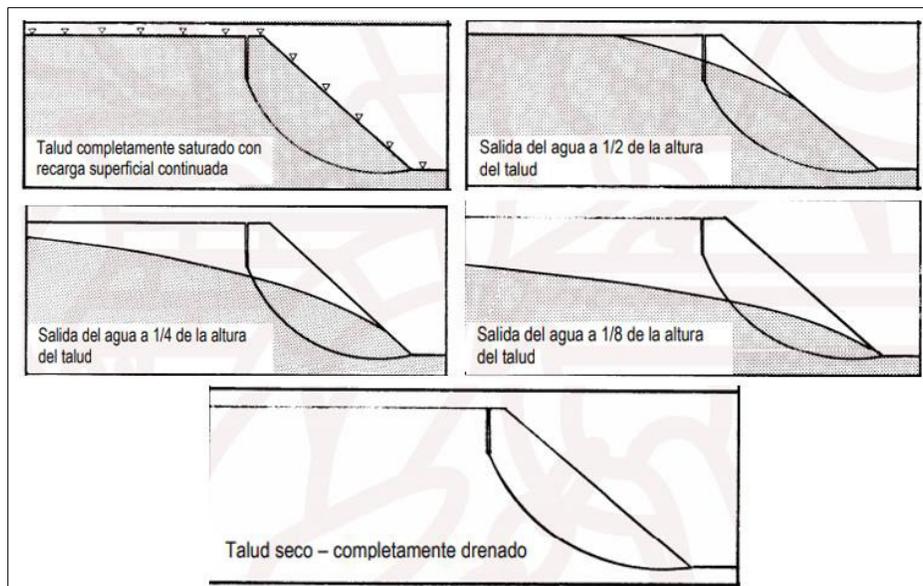
**Figura 7-7.** Régimen de filtración de agua a lo largo de un talud



**Fuente:** Alonso, 2005.

Generalmente, en los taludes se pueden generar problemas de inestabilidad que pueden ocasionar deslizamientos en forma de rotura circular, por lo cual, cuando es evacuada el agua (drenado) que se infiltra, son menores las fuerzas que actúan sobre el deslizamiento en el talud (Alonso, 2005).

**Figura 7-8.** Control del nivel freático en taludes



**Fuente:** Alonso, 2005.

**Figura 7-9.** Ubicación de zanjas de escorrentía en el talud



**Fuente:** Escobar & Duque, 2017.

En caso de que no sea posible utilizar concreto para realizar la impermeabilización de las acequias o zanjas de escorrentía, es posible utilizar polietileno negro de alta densidad como una alternativa fácil de instalar y más económica.

**Figura 7-10.** Impermeabilización de acequias con polietileno negro de alta densidad



**Fuente:** Grupo AgroRedes - POLCOM

Es importante mencionar que cuando se logra el disminuir la humedad del suelo puede ocurrir la desaparición de las coberturas vegetales protectoras del talud. Para ello, debe programarse actividades de mantenimiento de las obras realizadas, que incluya la rocería de los taludes, limpieza de las bermas o zanjas de escorrentía y mantenimiento de la vegetación herbácea que haya sido establecida (Escobar & Duque, 2017).

#### **7.6.1.4 Cubrimiento con materia orgánica (suelo vegetal)**

La instalación de suelo vegetal con gran contenido de materia orgánica es una etapa importante para la rehabilitación ya que de esta depende el éxito de la revegetalización. En áreas tan degradadas o destruidas por minería es importante recuperar el suelo con enmiendas orgánicas (Martínez, 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, es importante realizar un análisis de suelo para determinar el pH del suelo, sales solubles y la deficiencia de nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo como limitantes en suelos disturbados, esto con el fin de establecer la enmienda adecuada en cuanto a nutrientes y materia orgánica como las cantidades de utilizar.

En taludes generados por materiales estériles es evidente que las propiedades físicas y químicas de estos sustratos no son adecuadas para el establecimiento de la vegetación, ya que presentan suelos con baja fertilidad por la escasez de nutrientes y ausencia de materia orgánica. La utilización de suelo vegetal o la aplicación de *mulches* pueden atenuar las condiciones limitantes y aceleran la colonización vegetal (Tormo *et al.*, 2009).

Es importante mencionar que para facilitar la recuperación de las áreas reconformadas con retrolenado puede utilizarse la capa de suelo orgánico removida y almacenada durante la etapa de descapote. Por lo cual, se recomienda aplicar una capa de 50 cm de suelo vegetal sobre el botadero perfilado (ZODME) y las

áreas reconformadas con material estéril para la siembra de especies vegetales y facilitar su establecimiento. Sin embargo, cuando los suelos almacenados sean insuficientes al momento de la revegetalización, es posible que sea necesario utilizar suelos de otra zona cuando se requieran en el cubrimiento de dichas áreas (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, 2012) o mediante la compra de suelo orgánico o abonado en sitios autorizados.

Otra alternativa que puede emplearse para realizar el cubrimiento del suelo desnudo corresponde a la utilización de lodos producto del tratamiento de las aguas residuales, estos fortalecen las comunidades de microorganismos del suelo que participan en los procesos de formación de nutrientes (Syschykova, 2014 citado por Gil, 2017).

#### **7.6.1.5 Empradizado**

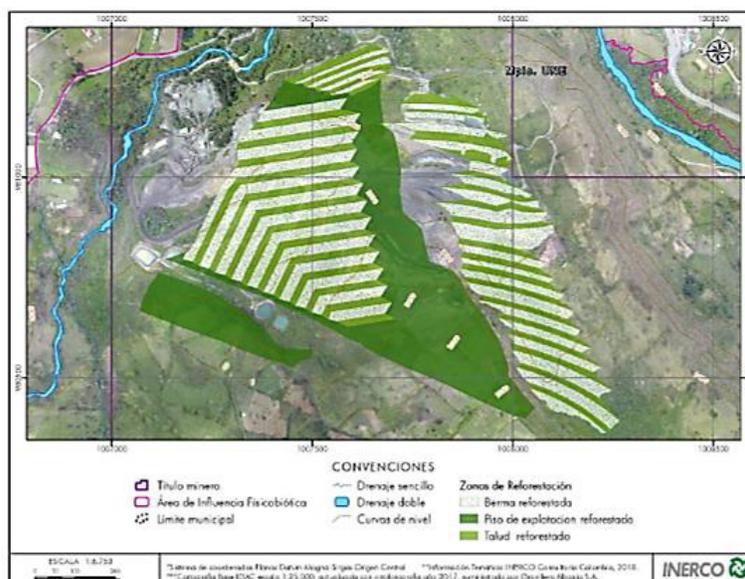
Una vez realizado el recubrimiento del suelo con una capa materia orgánica este debe ser revegetalizado bien sea con cespedones o siembra de semillas. La siembra de especies fijadoras de nitrógeno permite recuperar las funciones y estructura del suelo (Martínez, 2020). La cobertura vegetal rastrera se encarga de proteger el suelo del déficit de humedad y del impacto de las gotas de lluvia que pueden generar procesos erosivos (Escobar & Duque, 2017). En el programa 2: revegetalización de áreas reconformadas con retrolenado se describirá el proceso detalladamente para realizar tanto el empradizado de los taludes como también la revegetalización con especies arbustivas y arbóreas en las terrazas o base de los taludes.

## 7.6.2 Programa 2: Revegetalización de ZODME y áreas de explotación reconformadas con retrolleado

De acuerdo con Gravillera Albania (2018), el retrolleado de las áreas afectadas por la explotación minera en la cantera consiste en disponer de manera definitiva los estériles a través del descargue de las dumper, conformación con buldócer y compactación con vibro-compactador de acuerdo con los criterios de geotecnia y seguridad establecidos en el diseño. Finalmente, el material restante que no es utilizado para retrolleado permanece en la zona de depósitos de material (ZODME) y es utilizado para conformar las terrazas que componen los mismos.

En la figura 7-10 se observa el diseño de geométrico de la reconformación del terreno mediante terrazas en las áreas de explotación minera como los sitios de disposición de estériles (ZODME), posterior a esto (estabilización de taludes y manejo de aguas), se debe realizar la revegetalización tanto con especies gramíneas como arbóreas y arbustivas dependiendo de las necesidades del área.

**Figura 7-11.** Terrazas en área de explotación y ZODME y revegetalización



**Fuente:** Gravillera Albania, 2017. Adaptado por INERCO Consultoría Colombia, 2018.

Una vez reconformado el terreno y estabilizados los taludes con el retrolleado, se propone en el área de explotación y acopio de materiales estériles, el establecimiento de cobertura vegetal principalmente gramínea y herbácea con el fin que estos terrenos sean utilizados para la actividad agrícola y pecuaria (vocación original del suelo). Se propone en este sentido una recuperación ecológica en esta zona que busca restablecer algunos atributos y funciones del ecosistema.

#### **7.6.2.1 Limitaciones para la revegetalización**

Los taludes con pendientes elevadas y escasa cobertura vegetal tienen limitaciones en primer lugar por la ausencia de propiedades edáficas relevantes para la germinación de las plantas como también la erosión del suelo que impide la colonización y establecimiento de la vegetación al arrastrar las semillas que llegan a estos sitios por dispersión (Tormo *et al.*, 2009).

Es por esto, que debe tenerse en cuenta esta limitación de colonización vegetal cuando se esté realizando la revegetalización de las áreas reconformadas con el retrolleado mediante las terrazas como también en las áreas que fueron destinadas como depósito de material estéril, esto con el fin de optimizar los recursos según las necesidades en cada zona que se vaya a recuperar mediante la revegetalización.

#### **7.6.2.2 Revegetalización**

La revegetalización natural en las áreas mineras es un proceso muy lento y debe ser asistida mediante diferentes métodos para permitir la colonización de la vegetación (Martínez & Fernández, 2001). Para ello puede ser realizada mediante técnicas como siembra al voleo, siembra individual, hidrosiembra o la plantación de arbustos o árboles. Sin embargo, inicialmente se debe preparar el suelo a través de una escarificación manual que evite desestabilizar los taludes y terrazas.

Una vez se haya realizado esta actividad, para la revegetalización de estas áreas es recomendable separarse para las siguientes secciones en función del tipo de zona a recuperar:

- Revegetalización de taludes
- Revegetalización de terrazas (Corona o base del talud)

#### **7.6.2.2.1 Revegetalización de taludes**

En la zona de taludes lo primero que se busca es generar una cobertura de herbáceas a través de la siembra de especies gramíneas y herbáceas de bajo porte que le permitan proteger el suelo de la erosión.

##### **7.6.2.2.1.1 Siembra al voleo**

Este método consiste en distribuir uniformemente sobre el terreno las semillas de forma al azar; sin embargo, requiere de un mayor número de semillas, este tipo de siembra puede ser utilizada para revegetalizar los taludes. Es importante mencionar que para utilizar esta técnica las semillas deben ser mezcladas con otros materiales más pesados como arena para que caigan sobre el lugar deseado. Es muy útil para la siembra de especies herbáceas de rápido crecimiento, tamaño pequeño y fácil obtención como los pastos (Bautista & Páez, 2012).

**Figura 7-12.** Semillas regadas al voleo



**Fuente:** Hernández & Sierra, 2008

Una recomendación para la ejecución de esta técnica es que sea removida o suelta la capa superficial del suelo con el fin de descompactarlo y generar espacios porosos en el sustrato para garantizar el éxito de la germinación de las semillas. Para la revegetalización con este método es necesario aplicar como mínimo 4 kg de semillas por hectárea (Bautista & Páez, 2012).

#### **7.6.2.2.1.2 Siembra individual**

La siembra directa de semillas consiste en introducir las especies de interés sobre las áreas a recuperar (Ceccon, 2013), en este caso se utilizarán de gramíneas que pueden ser aplicadas en taludes con pendiente media a fuerte. Pueden utilizarse semillas comerciales de pastos o de especies herbáceas nativas recolectadas de las áreas aledañas. Se recomienda la utilización de 3 a 4 kg de semillas por hectárea (Bautista & Páez, 2012).

Al igual que el método de siembra al voleo, se requiere que la capa superficial del suelo no se encuentre compactada para facilitar el proceso germinativo de las semillas. Si van a utilizarse semillas de pasto, lo mejor es mezclarlas con un sustrato seco y orgánico por su pequeño tamaño. Es importante mencionar que las áreas revegetalizadas con esta técnica deben tener riego constante para facilitar la propagación una vez germinen las semillas (Grupo de Energía de Bogotá, 2010) Posterior a la siembra se puede utilizar un biomanto para proteger el suelo de la erosión mientras aumenta la cobertura vegetal en el talud.

#### **7.6.2.2.1.3 Hidrosiembra**

La hidrosiembra consiste en aplicar a presión un chorro con semillas, materia orgánica, abono y estabilizadores, generalmente es aplicada en sitios o taludes con pendientes fuertes (Arranz-González, 2015). De hecho, esta estrategia es muy conveniente en sitios donde es necesario recuperar algunas características ambientales básicas del terreno como lo es la cobertura vegetal, estabilidad de suelos o retención de agua en un corto tiempo del ecosistema (Ríos *et al.*, 2012).

**Figura 7-13.** Implementación de la técnica de hidrosiembra



**Fuente:** Bautista & Páez, 2012.

Con la aplicación de este método sobre los taludes se controla la erosión desde el inicio de la sucesión natural, facilitando la colonización de especies nativas a través del aporte de materia orgánica y el enriquecimiento del suelo con nitrógeno (Martínez & Fernández, 2001).

Para este tratamiento podrán ser consideradas especies gramíneas y herbáceas como *Hypericum* sp., *Salvia* sp., *Chusquea* sp., registradas en el municipio de Une por Rodríguez & Guerrero (2015) y *Anthoxanthum odoratum*, *Paspalum* sp., *Trinichloa* sp., *Sporobolus* sp. *Dahlia imperialis*, *Senna pendula*, *Sida acuta* y *Phytolacca bogotensis* registradas por Gravillera Albania (2018). Dichas especies brindan en corto tiempo una cobertura vegetal, la cual con el paso del tiempo genera dinámicas de sucesión natural temprana evitando procesos de erosión por la escorrentía en taludes y en las áreas que se encuentran muy degradadas donde no sea posible el establecimiento de especies arbóreas o arbustivas.

La selección de estas especies nativas permite que se desarrolle rápidamente una cobertura vegetal suficiente para controlar la erosión, como también prolongar la longevidad de la vegetación sobre los taludes, dado que estas especies por su adaptación al medio son capaces de colonizar y acelerar los procesos de sucesión natural al mejorar las condiciones del sustrato para la llegada de otras especies (Martínez & Fernández, 2001).

#### 7.6.2.2 Biomantas

Una vez se realiza la siembra de semillas (manual) o hidrosiembra de los taludes estabilizados, es recomendable utilizar mantas orgánicas conocidas como biomantos con el fin de proteger la superficie del talud de la erosión, aportar materia orgánica y favorecer los procesos de enraizamiento de la vegetación. Generalmente se utilizan mallas fabricadas en fique, yute o fibra de coco, las cuales suelen descomponerse en uno o dos años (Caminos naturales, s.f.).

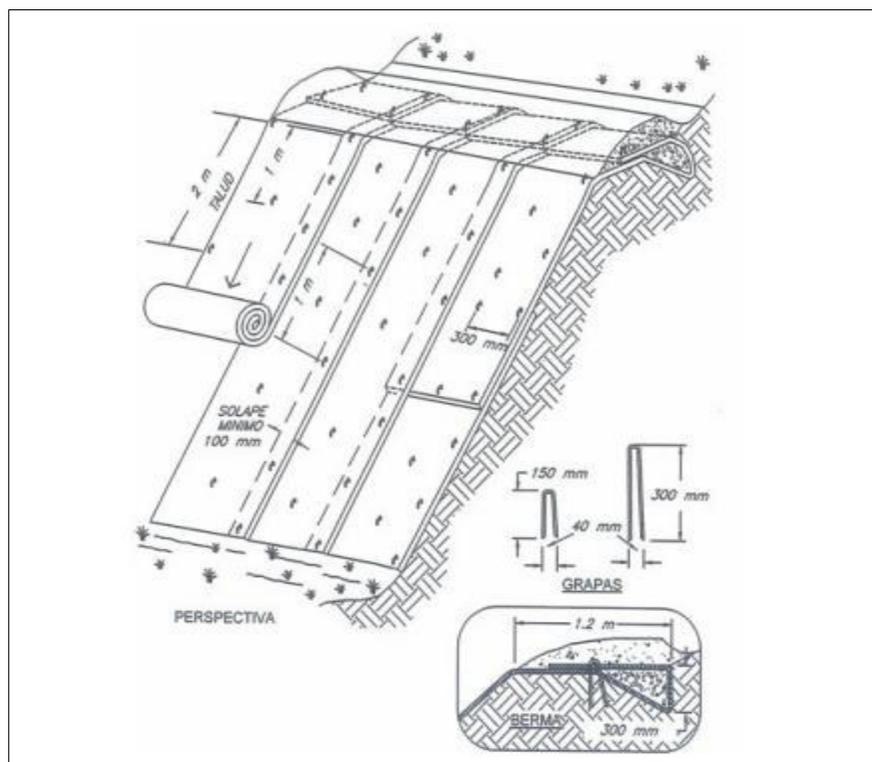
Las biomantas que se ubican sobre los taludes ofrecen un manejo preventivo de los procesos de erosión y la inducción de coberturas vegetales. La construcción de las biomantas de fique rellenas con una mezcla almidón de yuca, cascarilla de arroz y micorrizas ofrecen una alternativa rápida y de bajo costo que se puede implementar para la protección de la erosión de los taludes y facilitar la colonización de la vegetación sobre el suelo de estos (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

**Figura 7-14.** Elaboración de biomantos para la protección de taludes



**Fuente:** Barrera-Cataño *et al.*, 2010.

**Figura 7-15.** Instalación de mantas orgánicas sobre taludes



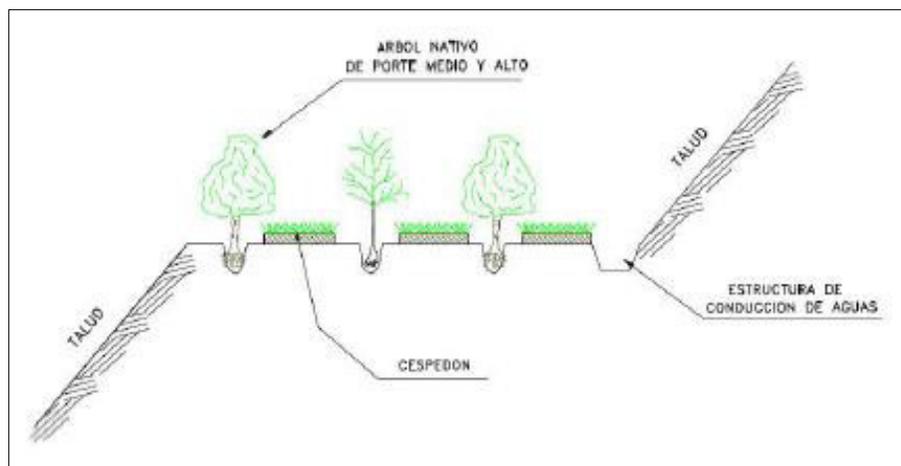
Fuente: Caminos naturales.

### 7.6.2.2.3 Revegetalización de terrazas con especies de habito arbustivo y arbóreo

Sarmiento (2008) recomienda las siguientes especies: *Baccharis latifolia*, *Cortaderia nítida*, *Chusquea scandens*, *Dodonaea viscosa*, *Solanum lycioides* y *Piper bogotensis*, útiles para el control de erosión en taludes, la recuperación de suelos desnudos y generación de microclimas. Estas especies pueden ser dispuestas en hileras en cada una de las terrazas conformadas por la base de los taludes como se puede apreciar en la

figura 7-16.

**Figura 7-16.** Esquema de revegetalización en áreas reconvertidas con retolledo



Fuente: Noriega, 2016.

### 7.6.3 Programa 3: Rehabilitación ecológica de áreas intervenidas

La rehabilitación ecológica consiste en “llevar al sistema degradado a un sistema similar o no al sistema pre-disturbio, éste debe ser autosostenible, preservar algunas especies y prestar algunos servicios ecosistémicos” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Considerando lo anterior, se plantea recuperar los servicios ecosistémicos y la productividad de algunos sectores del área minera con relación a la diversidad y estructura del ecosistema pre-disturbio (ecosistema de referencia) a partir de la línea base levantada en el estudio de impacto ambiental presentado por Gravillera Albania a la ANLA. Para esto se realizarán unos diseños florísticos con especies arbóreas que permitan retornar a un estado similar al pre-disturbio en las áreas afectadas por la operación minera en el sentido de garantizar el restablecimiento de

los procesos ecológicos en términos de composición, estructura y función del ecosistema.

### **7.6.3.1 Selección de las zonas de implementación**

#### **7.6.3.1.1 Sitios de depósito de material (ZODME)**

Para las áreas de depósito de estéril se establecerán en el sector norte donde se ubica el Zodme actual dado que corresponde una de las áreas con mayor cercanía a los bosques de galería del río Une, los cuales no serán intervenidos. Esto indica que probablemente se dará un proceso de conectividad entre esta cobertura natural con las áreas que fueron intervenidas propiamente por la actividad de explotación minera.

#### **7.6.3.1.2 Áreas aledañas a la quebrada Guativas y el río Une**

Este tratamiento será propuesto en las áreas circundantes de la explotación minera, principalmente en los sitios donde actualmente se encuentra la infraestructura existente de la mina y que posteriormente será desmantelada, tales como oficinas, talleres, tolvas, zona de acopio y clasificación de material. Estos sitios corresponden a las áreas más cercanas a la quebrada Guativas y el río Une donde a mediano plazo se genere una masa boscosa que se podría establecer corredores de conectividad.

La ubicación de los bosques y relictos de vegetación natural cercanos a las zonas de rehabilitación permitirá contar con la disponibilidad de banco de semillas y polinizadores naturales, además de permitir la conexión con corredores biológicos (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, 2012).

### **7.6.3.2 Estrategias de rehabilitación**

De acuerdo con Barrera-Cataño *et al.*, (2010) las estrategias de rehabilitación ecológica que pueden ser empleadas en un área que ha sido afectada por minería (canteras) son las siguientes:

- Plantaciones de especies nativas (aumentar la cobertura vegetal arbórea y arbustiva nativa)
- Enriquecimiento del hábitat para fauna silvestre utilizando perchas artificiales.

#### **7.6.3.2.1 Plantaciones de especies nativas**

Para la plantación de especies nativas como estrategia de rehabilitación ecológica puede utilizarse la técnica de nucleación o núcleos de facilitación, que consiste en formar grupos de especies que crean condiciones especiales para la facilitar el establecimiento o crecimiento de otras. Se recomienda utilizar una combinación de especies pioneras o sucesionales tempranas que permitan colonizar el área y propiciar un ambiente adecuado para las otras especies (Vargas & Díaz, 2007).

A través de la nucleación se forman microhábitats que propician la llegada de especies animales y vegetales, que en un proceso sucesional aceleran la ocurrencia de relaciones interespecificas, de modo que aumenta la probabilidad de formar diversas rutas alternativas a la sucesión y con el paso del tiempo, los núcleos de especies se expanden y aumentan una conectividad ecologica entre el área degradada y los fragmentos de bosques naturales adyacentes (Ceccon, 2013).

##### **7.6.3.2.1.1 Diseños florísticos**

Los diseños florísticos tendrán en cuenta las especies registradas en la caracterización florística del EIA presentado por la empresa minera a la ANLA. Las especies propuestas son características de la zona de vida como *Abatia parviflora*, *Baccharis latifolia*, *Cordia cylindrostachya*, *Dahlia imperialis*, *Clusia multiflora*, *Cavendishia cordifolia*, *Macleania sp.*, *Escallonia paniculata*, *Xylosma spiculifera*, *Morella pubescens*, *Piper bogotense*, *Myrsine coriácea*, *Dodonaea viscosa* y *Duranta mutisii*.

#### **A. Módulos de rehabilitación ecológica**

Dado que en el área de intervención se ha modificado significativamente por la extracción minera, una estrategia útil puede ser buscar en el áreas naturales del paisaje con condiciones similares a las pre-disturbio y áreas de intervención que se han regenerado de forma natural posteriores a las actividades mineras y utilizarlos como modelos para el ecosistema posterior a la actividad minera propuesto (Programa de Prácticas Líderes para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera (LPSPD), 2016).

Teniendo en cuenta que en la caracterización del área de estudio se encontraron especies representativas de la zona de vida y el ecosistema original, estas serán utilizadas para la conformación de los módulos de rehabilitación. Las especies sugeridas para los diseños florísticos son:

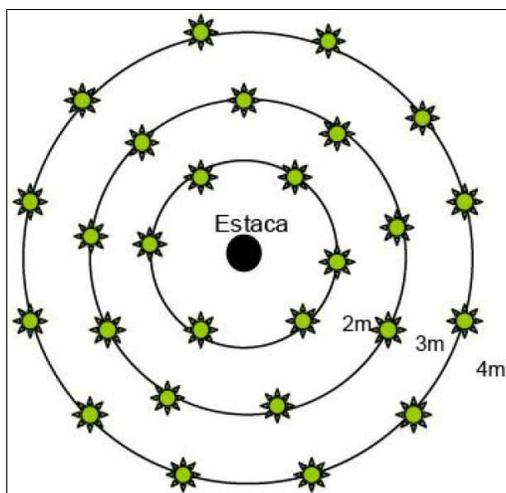
Del numeral 7.5 se pueden seleccionar las especies que serán utilizadas en los módulos de rehabilitación, las cuales corresponden a las encontradas en la caracterización del área de estudio como ecosistema de referencia. Además, dichas especies son tolerantes a las condiciones dentro del medio de crecimiento, puesto que se han encontrado en zonas donde se han iniciado procesos de sucesión natural pasiva. Para el programa de rehabilitación ecológica en la estrategia de

plantaciones de especies nativas con la técnica de nucleación, se proponen establecer dos tipos de módulos, los cuales se describen a continuación:

### I. Módulo de nucleación circular

Los módulos circulares con un arreglo mixto de especies nativas son muy eficaces para desarrollar el potencial de regeneración del sitio, dado que favorecen la diversidad de especies. De acuerdo con Ramírez (2015), especies como *Abatia parviflora*, *Duranta mutisii*, *Escallonia paniculata* y *Myrcianthes leucoxylla* pueden adaptarse fácilmente en los módulos de restauración en ecosistemas de montaña, por lo cual, pueden servir de soporte para generar el proceso de sucesión natural.

**Figura 7-17.** Módulo de nucleación circular



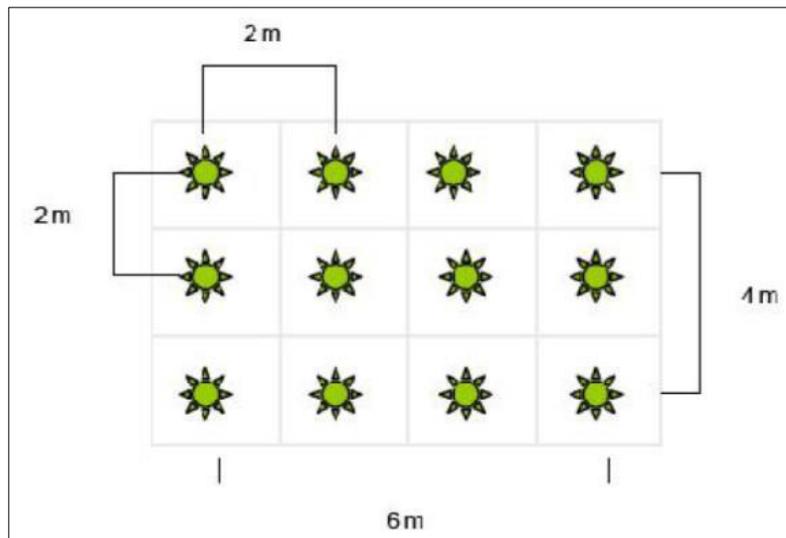
**Fuente:** Ramírez, 2015

Dentro de las áreas planteadas para la utilización de este módulo se recomienda en zonas donde

## II. Módulo de nucleación rectangular

Los módulos rectangulares monoespecíficos se enfocan en una sola especie, donde lo que se busca para el proceso de rehabilitación es generar una mayor cobertura con especies de rápido crecimiento. Para la presente propuesta se recomienda implementar dentro de este diseño florístico a la especie *Baccharis latifolia* o *Dodonaea viscosa*, dispuesta en un diseño rectangular monoespecífico presenta las mejores condiciones de cobertura de copa (Ramírez, 2015), favoreciendo la acumulación de materia orgánica en el suelo, lo que permite proporcionar una protección frente a la erosión. Este módulo puede ser empleado en la zona de disposición de estériles con el fin de acelerar los procesos de formación de suelo y cobertura vegetal en las terrazas del mismo.

**Figura 7-18.** Módulo de nucleación rectangular



Fuente: Ramírez, 2015

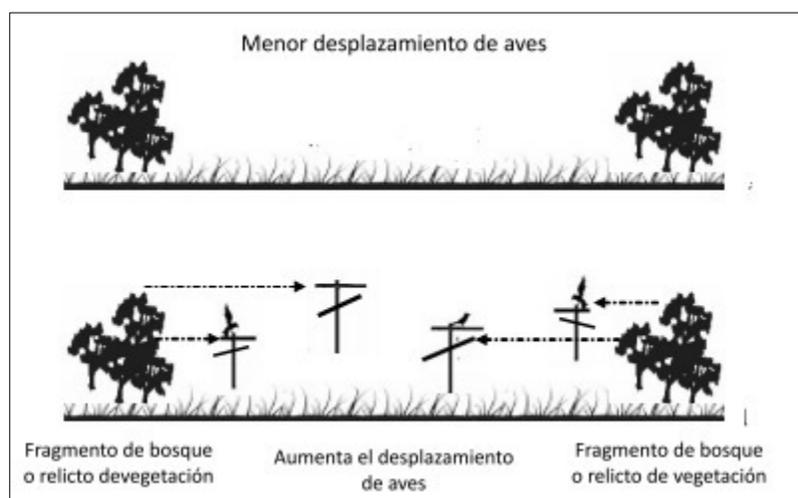
### 7.6.3.3 Perchas artificiales

La dispersión de semillas del bosque sobre áreas abiertas y degradadas es muy baja, y más aún, en zonas donde hay grandes extensiones de ecosistemas muy

alterados que no poseen árboles. En estos sitios la dispersión que se produce es principalmente anemócora, dado que los animales dispersores no se desplazan a grandes distancias. En las grandes áreas intervenidas, la tasa de regeneración natural es nula por la ausencia de árboles y/o arbustos, de modo que el proceso de dispersión de semillas ornitócoras al suelo puede ser compensado mediante la utilización de perchas artificiales para aves, con ello se puede agilizar la sucesión (Velasco, 2007).

Es importante mencionar que previo a la instalación de las perchas es necesario primero recuperar el suelo para que las semillas que empiecen a dispersar las aves puedan germinar y desarrollarse Barrera-Cataño *et al.*, (2010). Para ello, es necesario utilizar el suelo vegetal almacenado en la etapa de descapote de las áreas intervenidas. Por el contrario, si estas áreas ya se encuentran cubiertas por pastizales es necesario realizar una escarificación que consiste en retirar la capa de pastizal dejando el suelo expuesto y descompactado hasta una profundidad alrededor de 30 cm, con el fin que las semillas germinen y se establezcan debajo de las perchas (Villate & Cortés, 2018).

**Figura 7-19.** Instalación de perchas artificiales para el desplazamiento de aves



**Fuente:** Velasco, 2007.

Algo importante que debe tenerse en cuenta para la construcción de las perchas es que estas tengan la altura adecuada de acuerdo con la distancia del vuelo de las especies de aves registradas en la línea base del EIA adelantado por el concesionario minero.

## **7.7 Monitoreo, seguimiento y evaluación.**

Cuando se llevan a cabo procesos de restablecimiento en áreas degradadas dentro del marco de recuperación y rehabilitación ecológica, el monitoreo y seguimiento es considerado como uno de los elementos que deben tenerse en cuenta para evaluar los cambios del ecosistema una vez se implementen los programas propuestos. El monitoreo constante permite asegurar el éxito de las actividades planteadas brindando la información suficiente para evaluar y ajustar la metodología aplicada, las cuales, pueden ser modificadas en cualquier momento si los resultados obtenidos son negativos o indeseables, o si por el contrario se obtienen resultados positivos, las técnicas se mantienen o se mejoran (Díaz, 2007).

Dado que uno de los principales logros en la recuperación y rehabilitación ecológica sobre áreas disturbadas por minería a cielo abierto lo constituye la recuperación del suelo. Por lo cual, una vez aplicados los tratamientos planteados anteriormente es necesario incluir de forma transversal en cada uno de los programas de recuperación y rehabilitación el monitoreo de las características del suelo.

### **7.7.1 Monitoreo del suelo**

Para el monitoreo del suelo es posible utilizar la edafofauna como indicadora del éxito del proceso de recuperación y rehabilitación de las zonas a un bajo costo. Generalmente, en estudios de recuperación de áreas disturbadas por minería se utilizan lombrices dado que su presencia y actividad indican el mejoramiento del suelo en cuanto a fertilidad y productividad. Además, las lombrices que se

encuentran en las áreas donde se ha incorporado la materia orgánica en el suelo de forma efectiva, permite realizar el monitoreo a través de la sobrevivencia y reproducción de las lombrices como un bioindicador sobre el efecto de los tratamientos en el suelo y la comunidad biológica que son muy importantes para el establecimiento de la vegetación (Montes-Giraldo, 2009).

La presencia y abundancia de diferentes especies de lombrices puede ser representado en porcentaje a través de la siguiente ecuación:

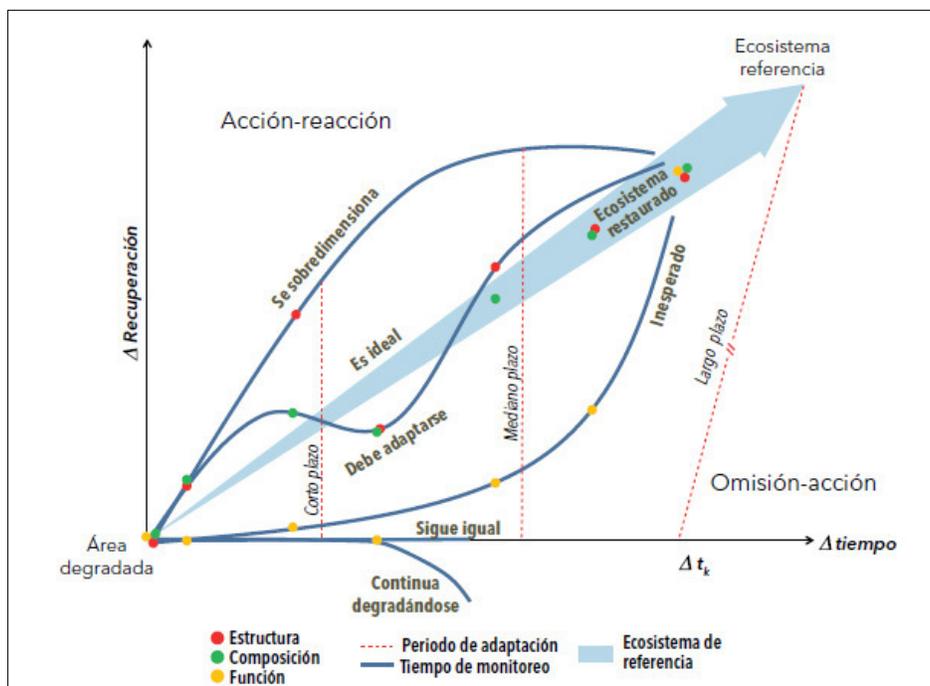
$$p_{ij} = 100(N_{ij} / \sum_{j=1}^n N_{ij})$$

donde  $N_{ij}$  es la abundancia de la especie  $i$  en el sitio muestreado  $j$ , y  $n$  es el número de sitios muestreados.

### **7.7.2 Monitoreos de los programas**

Para la evaluación y seguimiento del área propuesta para la recuperación y rehabilitación es muy importante monitorear los ecosistemas (agropecuario y natural) para conocer los cambios que ocurren luego de haber implementado los programas de restablecimiento en el área donde se debe verificar si se logró o no el objetivo de recuperación y/o rehabilitación ecológica del área disturbada. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, lo ideal es utilizar un enfoque de monitoreo adaptable para asegurar el éxito de los programas propuestos con la posibilidad de que se pueda adaptar a los cambios de la trayectoria de recuperación y rehabilitación de las áreas.

**Figura 7-20.** Monitoreo de la vegetación en procesos de restauración ecológica basados en un enfoque adaptativo



Fuente: González *et al.*, 2015.

Teniendo en cuenta lo anterior, para el monitoreo y seguimiento de los programas planteados se propone para cada uno de ellos lo siguiente según lo planteado por Barrera-Cataño *et al.*, (2010):

### 7.7.2.1 Programa 1: Conformación y estabilización de terrazas (ZODME y retrolenado de áreas de explotación)

Para este programa se plantea la ejecución del 100 % de las áreas planteadas para ser reconvertidas y estabilizadas en la zona de retrolenado y ZODME, esto teniendo en cuenta lo propuesto en el plan de cierre del operador minero.

### 7.7.2.2 Programa 2: Revegetalización de ZODME y áreas de explotación reconformadas con retrolenado

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, con respecto a la instalación de parcelas permanentes de muestreo de la vegetación se deben registrar aspectos del avance del programa donde se hará el monitoreo y seguimiento de la cobertura vegetal que se encuentra establecida sobre los taludes y las terrazas.

**Figura 7-21.** Formato para el registro de los aspectos de la vegetación herbácea

<b>Programa:</b>			<b>Monitoreo y seguimiento</b>	
<b>Zona:</b>				
<b>Fecha:</b>			<b>Cuadrilla:</b>	
<b>Coordenadas:</b>			<b>Altitud:</b>	
Descripción general del área:				
Cuadrante	Morfotipo	Altura (m)	Cobertura	Características generales

**Fuente:** Adaptado de Barrera-Cataño, et al, 2010.

### 7.7.2.3 Programa 3: Rehabilitación ecológica de áreas intervenidas

Para la rehabilitación ecológica se propone realizar el seguimiento en función del incremento de la vegetación nativa y su efecto sobre las áreas destinadas para este fin. Se plantea la utilizar variables de composición y estructura para evaluar la eficacia del tratamiento propuesto teniendo en cuenta que corresponde a una rehabilitación ecológica. Para el monitoreo de la vegetación pueden establecerse

parcelas permanentes en las áreas rehabilitadas, de modo que pueda llevarse un registro del avance de la estrategia utilizada.

**Figura 7-22.** Establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para el monitoreo de los procesos de rehabilitación



**Fuente:** Duarte *et al.*, 2017.

A continuación, se presentan las variables para el monitoreo que deben tenerse en cuenta según lo planteado por Barrera-Cataño *et al.*, 2010):

- Composición (abundancia, frecuencia, dominancia)
- Estructura (densidad, altura, estructura vertical y cobertura)

Para llevar a cabo el registro de las variables y evaluaciones que se realicen en el tiempo, puede utilizarse el siguiente formulario para obtener la información necesaria para determinar el estado de avance de la estrategia de rehabilitación:

**Figura 7-23.** Formato para el registro de los aspectos de la vegetación arbórea y arbustiva

<b>Programa:</b>							<b>Monitoreo y seguimiento</b>	
<b>Zona:</b>								
<b>Fecha:</b>					<b>Cuadrilla:</b>			
<b>Coordenada</b>					<b>Altitud:</b>			
Descripción general del área:								
Unidad de muestreo	Morfotipo	Área total (m <sup>2</sup> )	Copa (m)		CAP (cm)	Altura (m)	Cobertura	Características generales
			Diámetro mayor	Diámetro menor				

**Fuente:** Adaptado de Barrera-Cataño, et al, 2010.

Adicionalmente, es importante tener en cuenta la supervivencia y mortalidad de los individuos que fueron plantados y sembrados. Esto nos permite evaluar la necesidad de acciones de manejo adaptativo como por ejemplo, la resiembra y el cambio de especies, porque de su oportuna atención puede incidir en el éxito del proceso. Para realizar este análisis se presentan a continuación las fórmulas para calcular la mortalidad y supervivencia:

$$\%M_{spi} = Nm_{spi} \times 100 / Nt_{spi}$$

Donde:

$\%M_{spi}$  = % mortalidad de la especie i

$Nm_{spi}$  = número de Individuos muertos de la sp. i

$Nt_{spi}$  = número total de individuos de la misma especie que fueron sembrados

$$\%Mt = \sum Ntm / Nt$$

Donde:

$\%Mt$  = % mortalidad total

$N_{tm}$  = número total de individuos muertos

$N_t$  = número total de individuos sembrado en el área

% sobrevivencia/sp = 100 - % mortalidad/ sp

Para tasa de mortalidad genérica anual o bajo periodos de monitoreo:

$$M = 1 - \left[ 1 - \frac{(N_0 - N_1)}{N_0} \right]^{1/t} * 100$$

Donde:

$N_0$  = número de individuos vivos en el censo inicial

$N_1$  = número de individuos sobrevivientes en el segundo censo.

$t$  = tiempo en años

Para reclutamiento/supervivencia:

$$r = 1 - (1 - N_r - N_1)^{1/t} * 100$$

Donde:

$N_r$  = número de individuos reclutados  
entre censos

$t$  = tiempo en años

## 8. CONCLUSIONES

Existen diversos métodos para realizar planes de restauración y rehabilitación de minas a cielo abierto, sin embargo dentro del presente trabajo se llevó a cabo específicamente la formulación de una guía metodológica para contribuir con el desarrollo y ejecución del plan de cierre y desmantelamiento del operador minero Gravillera Albania S.A. tomando en cuenta los factores abióticos y bióticos como base para la selección de una metodología adecuada de restablecimiento del uso del suelo al finalizar la explotación minera.

La caracterización ambiental (línea base) es un aspecto muy importante para la formulación de programas y estrategias de rehabilitación ecológica en áreas mineras dado que estas metodologías se encuentran destinadas principalmente en el restablecimiento del suelo, la flora y la fauna, donde componentes como el clima, la geología, geomorfología, zonas de vida y formación vegetal son esenciales para la definición de los tratamientos a realizar.

Es importante tener en cuenta una zonificación y priorización de las áreas donde se realizarán los programas debido a que se presentan condiciones del terreno muy diferentes a una escala muy detallada. Dependiendo de cada zona se presentan actividades con metas y objetivos distintos que determinan la trayectoria de restauración deseada.

Los tratamientos diseñados en el presente documento permiten ofrecer a la empresa minera aumentar la probabilidad del éxito en la ejecución del plan de cierre con el fin de facilitar la recuperación del uso del suelo y fomentar el restablecimiento de alguno de los servicios ambientales a través de la rehabilitación ecológica.

## **9. RECOMENDACIONES**

Como complemento a la presente propuesta de recuperación y rehabilitación se recomienda agregar un cronograma y un análisis económico y financiero que implica determinar la implementación de los programas o tratamientos planteados en el presente trabajo. Para ello se debe incluir los gastos de material, equipos, personal y otros.

Es importante contemplar por lo menos un periodo de tres años como mínimo para las actividades de monitoreo y seguimiento de los procesos de recuperación y rehabilitación aquí planteados para verificar la eficacia de los programas establecidos que permitan llevar por buen rumbo los objetivos planteados en el presente trabajo.

Finalmente, es necesario contar con el avance minero que detalle de forma anual los sitios que van a ser intervenidos, esto con el fin de establecer de manera puntual las áreas específicas donde pueden desarrollarse los programas o tratamientos anteriormente expuestos conforme a las áreas que ya no serán utilizadas en la explotación minera.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M., & Vargas, O. (2008). Ampliación de fragmentos de Bosque Altoandino. En O. Vargas, & O. Vargas (Ed.), *Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino : el caso de la Reserva Forestal Municipal de Cogua, Cundinamarca* (págs. 266-281). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Aguirre, N., Torres, J., & Velasco, P. (2013). *Guía para la restauración ecológica en los páramos del Antisana*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente y agua.
- Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). (2010). *Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. Eugene, U.S.A.
- Alonso, E. (2005). *Estabilidad de taludes*. Catalunya: Universitat Politecnica de Catalunya.
- Arranz-González, J. (2015). *Rehabilitación o remediación de espacios degradados por minería a cielo abierto: Investigación, desarrollo e innovación en España*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Arranz-González, J., & Alberruche, E. (2008). *Minería, medio ambiente y gestión del territorio*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Barrera-Cataño, J. (2009). Barreras al restablecimiento natural y a la restauración ecológica de áreas afectadas por minería a cielo abierto. En *Restauración ecológica de áreas afectadas por minería a cielo abierto en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Barrera-Cataño, J., Contreras-Rodríguez, S., Garzón-Yepes, N., Moreno-Cárdenas, A., & Montoya-Villarreal, S. (2010). *Manual para la Restauración Ecológica de los Ecosistemas Disturbados del Distrito Capital*. Bogotá , Colombia: Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) - Pontificia Universidad Javeriana (PUJ).
- Bautista, P., & Páez, E. (2012). *Lecciones aprendidas en el ejercicio de interventoría en proyectos piloto de revegetalización de taludes por el método de hidrosiembra en campos petroleros*. Universidad Pontificia Bolivariana.

- Benitez, E., & Sarmiento, L. (2014). *Guía práctica para la estabilización de taludes generados por la construcción de plataformas para perforación mediante técnicas de hidrosiembra, en el área de Campo Llanito Ecopetrol S.A.* Trabajo de grado, Universidad de Santander, Bucaramanga.
- Borda-Niño, M., Carranza, M., Hernández-Muciño, D., & Muciño-Muciño, M. (2016). Restauración productiva en la práctica: el caso de las comunidades indígenas Me' Phaa de La Montaña de Guerrero, México. En E. Ceccon, & D. (. Pérez, *Más allá de la ecología de la restauración : perspectivas sociales en América Latina y el Caribe* (págs. 245-255).
- Brown, S., & Lugo, A. (1994). Rehabilitation of Tropical Lands: A Key to Sustaining Development. *Restoration Ecology*, 2(2), 97-111.
- Bruzón, N., Matos, A., & Milián, C. (2003). Prueba de especies forestales en áreas devastadas por la minería a cielo abierto en Holguín. *Centro Agrícola*, 30(1), 80-83.
- Ceccon, E. (2013). Bases prácticas para la restauración ecológica. En E. Ceccon, *Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales* (págs. 86-133).
- Chaviano, A., Cervantes, Y., & Pierra, A. (2011). Algunas consideraciones de rehabilitación minera en la minería del níquel: municipio de Moa, Cuba. *Revista Desarrollo Local Sostenible*, 4(10), 1-11.
- Cogollo, A., Velasco, P., & Manosalva, L. (2020). Caracterización funcional de plantas y su utilidad en la selección de especies para la restauración ecológica de ecosistemas altoandinos. *Biota Colombiana*, 21(1), 1-15. doi:<https://doi.org/10.21068/c2020.v21n01a01>
- Cornelissen, H. (2017). The development of a ranking tool for the selection of abandoned mine sites for rehabilitation. *Proceedings of the 3rd World Congress on New Technologies (NewTech'17)*. Roma, Italy: Paper No. ICEPR 145.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2009). *Guía para la Explotación, Mitigación y Recuperación de Canteras*. Bogotá.

- Cubillos, S., Gil, S., & Martínez, G. (2016). Historia e institucionalidad en la minería. *Econografos Escuela de Economía N° 99*, 6.
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). (2000). *Protocolo Distrital de Restauración Ecológica*. Bogotá: Convenio DAMA - Fundación Bachaqueros.
- Díaz, R. (2007). El monitoreo en la restauración ecológica. En O. Vargas, *Guía metodológica para la RESTAURACIÓN ECOLÓGICA del bosque altoandino* (págs. 119-122). Bogotá: Grupo de Restauración Ecológica.
- Díaz, W., & Torres, C. (2001). Estudio básico de restauración vegetal en áreas de subpáramo degradadas de la vereda Monquentiva- Guatavita. *Colombia Forestal*, 7(14), 116-123. doi:<https://doi.org/10.14483/2256201X.3212>
- Escobar, C., & Duque, G. (2017). *Geotecnia para el trópico andino*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Fuentes, R. (2015). Explotación y abandono de canteras de materiales para la construcción. Retos y realidades. *VI Congreso Cubano de Minería. Cierre de Minas y Gestión Patrimonio Geológico Minero* (págs. 1-15). La Habana (Cuba): VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra.
- García, D. (2016). *Formulación de actividades de restauración ecológica para el proyecto de mejoramiento, rehabilitación y reconstrucción de la vía Palomas – Mambita, departamento de Cundinamarca*. Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C.
- Gastauer, M., Reis, J., Caldeira, C., Martins, P., Furtini, A., & Siqueira, J. (2018). Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for more sustainable mining. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1409-1422.
- Gil, D. (2017). *Métodos de restauración en suelos andinos deteriorados por minería de carbón a cielo abierto aplicables en el municipio de Amagá (Antioquia-Colombia)*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- González, R., Avella, A., & Díaz, J. (2015). Plataformas de monitoreo para vegetación: toma y análisis de datos. En M. Aguilar, & W. Ramírez, *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*

- (págs. 86-107). Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Gravillera Albania. (2018). *Estudio de impacto ambiental para la modificación de la licencia ambiental del proyecto “Cantera El Pedregal” contrato de concesión 15590*. Bogotá D.C.
- Grupo de Energía de Bogotá. (2010). Capítulo 10. Plan de Abandono y Restauración Final . En G. d. Bogotá, *Refuerzo Suroccidental a 500 kV Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto La Virginia Alférez*. (pág. 17). Bogotá.
- Gualdrón, R. (2011). *Cerrejón: Hacia la rehabilitación de tierras intervenidas por la minería de cielo abierto*. Panamericana.
- Guzmán, D. (1996). Zonas de vida o formaciones vegetales. Área jurisdiccional CAR. 55. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Hawksworth, D., Iturriaga, T., & Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22, 71-82.
- Hernández, M., & Sierra, J. (2008). Restauración. En S. Purata, *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (págs. 46-51). CONABIO/RAISES.
- Herrera, J., & Ortiz, F. (2006). Clasificación y campo de aplicación de los métodos y sistemas de explotación a cielo abierto. En J. Herrera, *Métodos de minería cielo abierto*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico. (2012). Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y platino en el Chocó biogeográfico. 84. Colombia.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1989). La identificación de alteraciones y la evaluación del impacto ambiental. En *Manual de restauracion de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería* (págs. 59-72). Madrid.
- Martínez, C., & Fernández, B. (2001). Papel de la hidrosiembra en la revegetación de escombreras mineras. *Informes de la Construcción*, 53(476), 27-37.

- Martínez, M. (2020). *Planificación de operaciones para rehabilitación de botaderos de estériles en explotación de carbón en Isla Riesco, mina Invierno*. Tesis de pregrado, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería.
- MINERIA, A. N. (28 de 11 de 2019). *¿Cómo está distribuida la minería en Colombia?* Obtenido de <https://www.anm.gov.co/?q=distribucion-mineria-Colombia>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas*. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía minero ambiental de explotación*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario Técnico Minero*. Bogotá. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Iniciativa para la transparencia de las industrias extractivas*. Obtenido de EITI Colombia: <http://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-institucional/sector-mineria/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2019). *Minería*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/minas>
- Ministerio de Minas y Energía; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2013). Métodos extractivos. En M. d. Energía, & U. P. Colombia, *Explotación de materiales de construcción: canteras y material de arrastre* (págs. 34-36). Bogotá D.C.: Grafimpresos.
- Montes-Giraldo, N. (2009). El papel de la fauna en la restauración ecológica. En *Restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto en Colombia* (págs. 139-150). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- Noriega, P. (2016). *Propuesta de Restauración Ecológica para Cierre Minero Vereda el Manzano, La Calera Cundinamarca*. Universidad Militar Nueva

- Granada, Especialización de Planeación Ambiental y Gestión Integral de Recursos Naturales, Bogotá.
- Palacios, F. S. (2011). *Historia de Colombia. Pais Fragmentado, sociedad dividida*. Bogota: Ediciones Uniandes.
- Programa de Prácticas Líderes para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera (LPSPD). (2016). *Rehabilitación de minas*. Gobierno de Australia.
- Ramírez, C. (2015). *El fin de la operación minera: Implicaciones jurídicas desde lo ambiental y social*. Monografía, Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Facultad de Jurisprudencia.
- Ramírez, D. (2015). *Análisis comparativo de arreglos florísticos utilizados en módulos de restauración*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ramírez, N., & León, M. (2016). Uso de biotipos de líquenes como bioindicadores de perturbación en fragmentos de bosque altoandino (Reserva ecologica "Encenillo", Colombia). *Caldasia* 38(1), 31-52.
- Rodríguez, L., & Guerrero, A. (2015). *Guía de la flora vascular del predio La Chorrera. Une, Cundinamarca - Colombia*. Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Sarmiento, Y. (2008). Restauración en explotaciones de minas caliza. *Revista Luna Azul*, 27, 75-84.
- Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica. (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas.
- Tormo, J., Bochet, E., & García-Fayos, P. (2009). Restauración y revegetación de taludes de carreteras en ambientes mediterráneos semiáridos: procesos edáficos determinantes para el éxito. *Ecosistemas*, 18(2), 79-90.
- Torres, Y., Rodríguez, R., & Reynaldo, C. (2019). Propuesta de un procedimiento para la rehabilitación minera en explotaciones a cielo abierto. *Minería y Geología*, 35(1), 20.

- Unidad y restitucion de tierras. (2015). *Cartilla Minera*. Bogota: AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA (ANM).
- Vadillo, L., López, C., Escribano, M. d., & Sanglano, S. (1994). Alteraciones ambientales producidas por la explotación de gravas. En C. López, M. d. Escribano, & S. Sanglano, *Guía de restauración de graveras* (pág. 43). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Vargas, O. (2007). Los pasos fundamentales en la Restauración Ecológica. En O. Vargas, *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino* (págs. 17-20). Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, O. (2011). Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta biológica colombiana*, 16(2), 221-246.
- Vargas, O., & Díaz, A. (2007). Guía metodológica para la restauración ecológica de áreas potrerizadas. En O. Vargas, *Guía metodológica PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL BOSQUE ALTOANDINO* (págs. 159-168). Bogotá: Grupo de Restauración Ecológica.
- Vargas, O., Díaz, J., Reyes, S., & Gómez, P. (2012). *Guías técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia*. Bogotá: Grupo de Restauración Ecológica - Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, O., Díaz, J., Reyes, S., & Gómez, P. (2012). *Guías Técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Velasco, P. (2007). 12.A. Utilización de las perchas artificiales para aves. En O. Vargas, *Guía metodológica PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL BOSQUE ALTOANDINO* (págs. 96-98). Bogotá: Grupo de Restauración Ecológica.
- Villate, A., & Cortés, F. (2018). Las perchas para aves como estrategia de restauración en la microcuenca del río La Vega, Tunja, Boyacá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.*, 42(164), 202-211.

Yule, J., & Fournier, R. (2013). Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession by Andre F. Clewell and James Aronson. *The Quarterly Review of Biology*, 88, 332-333.