



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Plan de recuperación de suelos degradados por la minería en el municipio de Caucaasia

Pablo Andrés Castillo Quintero

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Gestión Ambiental

Asesor

Carlos Esteven Pulgarín, Doctor (PhD) MsC, Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2025



Cita numérica	1
Cita nota al pie	¹ Pablo Andrés Castillo Quintero, “Plan de recuperación de suelos degradados por la minería en el municipio de Caucasia” (Trabajo de grado especialización, Universidad de Antioquia, 2025).
Fuentes primarias / Bibliografía	Castillo Quintero, Pablo Andrés. “Plan de recuperación de suelos degradados por la minería en el municipio de Caucasia”. Trabajo de grado especialización, Universidad de Antioquia, 2025.

Estilo: Chicago 17 (2017) y adaptación de Trashumante. Revista Americana de Historia Social UdeA.



Especialización en Gestión Ambiental, Cohorte XIX.

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Tabla de Contenido

Resumen	6
Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Objetivos	12
2.1 Objetivo general.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. Metodología	12
3.1 Tipo de investigación	12
3.2 Área de Estudio.....	13
3.3 Instrumentos de recolección de datos.....	13
3.4 Plan de Manejo en la recuperación del suelo degradado en el Municipio de Caucasia	13
4. Cálculo de la abundancia relativa.....	14
5. Cálculo de la frecuencia relativa.	14
6. Calculo de la Dominancia relativa.	15
7. Cálculo del Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies.	15
8. Resultados y Discusión	16
8.1 Análisis de información bibliográfica	16
8.2 Resultados Trabajo piloto en campo	17
8.2.1 Prueba piloto en campo para la selección de las especies arbóreas	17
8.2.2 Levantamiento de las parcelas (50 m largo x 20 m ancho)	18
8.2.3 Identificar y registrar las especies pioneras presentes dentro de cada parcela	19
8.2.4 Conteo y medición de CAP y Altura de los árboles.	24
8.2.5 Georreferenciar los individuos arbóreos identificados	28
8.3 Plan de recuperación de suelos degradados por la minería	36

9. Conclusiones y recomendaciones.....	38
10. Bibliografía	39

Lista de tablas

Tabla 1 Registro de todos los individuos inventariados en cada parcela	20
Tabla 2 Enumeración de los individuos arbóreos y mediciones	24
Tabla 3 Individuo con su respectiva georreferenciación, realizada en campo Parcela 1	28
Tabla 4 Individuos con su respectiva georreferenciación, realizada en campo Parcela 2	30
Tabla 5 Individuos con su respectiva georreferenciación, realizada en campo Parcela 3	31
Tabla 6 Cálculo del Índice de Valor de Importancia de las especies (IVI)	33

Lista de figuras

Figura 1 IVI de las especies encontradas en las tres parcelas	35
--	----

Lista de Imágenes

Imagen 1 Alfalfa tropical en Madre de Dios	17
Imagen 2 Área de interés donde se llevará el estudio (18 ha)	18
Imagen 3 La siguiente imagen se puede observar las tres parcelas levantadas.	19

Resumen

El Municipio de Caucasia, Antioquia ha sido actualmente afectada por la minería informal, afectando los suelos indiscriminadamente, generando impactos negativos significativos. Por consiguiente, se ve la necesidad de elaborar un plan de recuperación de suelos degradados por la minería en el municipio. El objetivo es elaborar un plan de recuperación de suelos, proponiendo unos pasos técnicos que ayuden a restaurar la fertilidad, estructura y biodiversidad del suelo afectado por la minería, especialmente la minería informal. La metodología combina un enfoque Mixto, revisión de artículos científicos nacionales, como internacionales y un trabajo piloto de campo en la vereda Campo Alegre, del municipio de Caucasia, donde se levantaron tres parcelas (50 largo x 20 ancho), por lo cual se buscaba calcular el índice de valor de importancia (IVI) de las especies presentes.

Los resultados respaldan la eficacia de la fitorremediación, como estrategia central en la recuperación del suelo degradado. También destacan el uso de especies pioneras de primera sucesión para recuperar la materia orgánica y mejorar las propiedades químicas y biológicas del suelo. Los estudios citados también muestran el aumento en biomasa, fijación de nitrógeno, crecimiento microbiano y la diversidad de la macrofauna, cuando se recupera el suelo, por medio de la fitorremediación. En el trabajo piloto se logró identificar, mediante la utilización de la fórmula de abundancia, dominancia y frecuencia, que especies son de mayor valor ecológico en una zona que presenta degradación del suelo, por tal razón es fundamental tener en cuenta en el plan.

El plan propuesto se estructura en once pasos fundamentales y enfatiza aspectos a tener en cuenta para obtener éxito en la recuperación del suelo en el municipio de Caucasia, y estos pasos son: Diagnóstico del suelo: Análisis físico, químico y biológico, elección del sitio, preparación del suelo, explanado del terreno, manejo hidráulico, distribución e incorporación del material orgánico, acondicionamiento posterior, fitorremediación, producción de material nativo, mantenimiento y monitoreo periódico e indicadores de éxito.

Con el plan propuesto para la recuperación del suelo degradado por la minería en el municipio de Caucasia, se espera asegurar proyectos sostenibles, involucración de la participación de las

comunidades y llegar a recuperar los suelos a mediano plazo los servicios ecosistémicos que tuvieron antes de que la minería degradara.

Palabras clave: Plan de recuperación de suelos, fitorremediación, minería, Índice de Valor de Importancia, Caucasia.

Abstract

The municipality of Cauca, Antioquia has been significantly affected by informal mining, which has indiscriminately degraded soils and generated substantial negative impacts. Consequently, there is a clear need to design a plan for the recovery of soils degraded by mining in the municipality. The objective is to develop a soil recovery plan that proposes technical steps to restore the fertility, structure, and biodiversity of soils impacted by mining, particularly informal mining. The methodology combines a mixed approach, including a review of national and international scientific articles and a pilot field study in the village of Campo Alegre, Cauca, where three plots (50 m long $\times$ 20 m wide) were established to calculate the Importance Value Index (IVI) of the species present.

The results support the effectiveness of phytoremediation as a central strategy for the recovery of degraded soils. They also highlight the use of pioneer species of primary succession to restore organic matter and improve the chemical and biological properties of the soil. The cited studies further demonstrate increases in biomass, nitrogen fixation, microbial growth, and macrofauna diversity when soils are rehabilitated through phytoremediation. In the pilot study, the application of formulas for abundance, dominance, and frequency made it possible to identify species of greater ecological value in an area with soil degradation, underscoring their importance in the recovery plan.

The proposed plan is structured into eleven fundamental steps and emphasizes key aspects to ensure successful soil recovery in Cauca. These steps include: soil diagnosis (physical, chemical, and biological analysis), site selection, soil preparation, land leveling, hydraulic management, distribution and incorporation of organic material, post-conditioning, phytoremediation, production of native plant material, maintenance and periodic monitoring, and success indicators.

With the implementation of this plan for the recovery of soils degraded by mining in Cauca, the aim is to ensure sustainable projects, foster community participation, and achieve the medium-term restoration of ecosystem services that existed prior to mining activities.

Keywords: Soil recovery plan, phytoremediation, mining, Importance Value Index, Cauca.

1. Introducción

Las actividades extractivas de minerales que se desarrollan en el mundo, se calculan según los datos del programa de las naciones unidas del medio ambiente, en la minería del oro artesanal y en pequeña escala, se alcanza a generar entre 10 millones y 15 millones de empleos mineros directos y también de los cuales al menos 100 millones de personas de forma indirecta y en más de 55 países dependen de esta actividad para subsistir y se cree que la minería de oro artesanal y en pequeña escala, se produce el 20 % y el 30 % del oro del mundo, en efecto llegando al año producir entre 500 y 800 toneladas, y también se señala a la minería artesanal y de pequeña escala ser la causante de del deterioro del suelo y de la liberación intencional de mercurio en el mundo (PNUMA, 2008).

Colombia no es ajena a esta realidad, debido que en el país la explotación minera está dedicados más de 350 mil personas de forma directas en preparación, desarrollo y explotación minera y también esta actividad genera más de un millón de empleos indirectos en todo el territorio nacional (ANH, 2024), y más del 90% de la producción aurífera corresponde a Minería Artesanal y de pequeña escala MAPE. A estas pequeñas organizaciones mineras están ligadas en su mayoría a la informalidad, caracterizada por ausencia de métodos y tecnologías ambientalmente adecuados y también de estrategias de remediación ambiental en la fase posterior a la explotación, puesto que tienen insuficiencia de recursos económicos y ausencia de aprovisionamiento económico para atender un cierre minero apropiado, en conclusión generan grandes áreas degradadas, y cuya recuperación representa un gran desafío para el estado. (Marrugo, 2022).

En Antioquia la minería ilegal se ha aumentado en los últimos años, debido al auge del oro, debido que hoy en día el gramo de oro de 24 quilates cuesta en Colombia aproximadamente 249 mil pesos (Goldrate24, 2025). Esta actividad impulsada por la ausencia del estado, la falta de oportunidades laborales y las condiciones socioeconómicas adversas ha llevado al aumento de la minería informal y sin regulación, por lo cual esta actividad ha causado graves impactos ambientales, como la deforestación masiva, la degradación de los suelos, el uso inadecuado del mercurio afecta los cuerpos de agua, suelo, salud de los pobladores y biodiversidad (FCDS, 2024).

Así mismo en la región del Bajo Cauca como es el municipio de El Bagre, Cauca, Tarazá y Segovia, el uso intensivo de mercurio ha generado una contaminación que amenaza tanto a la biodiversidad como a las poblaciones (Ortiz, 2023). A pesar de que en Colombia está regulada esta actividad por un marco legal amplio que incluye el código de Minas (Ley 685 de 2001) y la Ley 1658 de 2013, por el cual se prohíbe el uso de mercurio en la minería en todo el territorio nacional; sin embargo, a pesar de estas prohibiciones y regulaciones ambientales, la minería ilegal evade el cumplimiento de estas normas y por consiguiente emplea prácticas insostenibles que comprometen los ecosistemas, la calidad del agua, suelo y la salud pública.

El municipio de Cauca ubicado en la región de Bajo Cauca Antioqueño se destaca por su riqueza en yacimientos auríferos, por lo cual ha sido su principal factor en su desarrollo económico, sin embargo, la región ha sido afectada de grandes dimensiones, por una minería aurífera, sin control y regulación ambiental. En cuanto a esta intensa actividad minera en su mayoría de tipo ilegal, ha generado preocupación en el deterioro en los suelos, debido a la gestión inadecuada de los mineros, gran parte por la minería aurífera artesanal y de pequeña escala, a los recursos naturales (Vargas Fernández. et al., 2024). Uno de los tipos de contaminación generados por la minería en Cauca y que afecta principalmente el suelo; uno es por contaminación química y por ende es la más crítica, debido al uso de sustancias químicas en los procesos de explotación del oro, como es el uso del cianuro, mercurio metálico que en el proceso de extracción del oro se pierde entre 6 y 9 gramos Hg por cada gramo de Au, (Alvarado, M. C. 2019), ácido nítrico, ácido sulfúrico y disolventes, nitrato de amonio y aceites combustibles para motor y otros combustibles como la gasolina y el Diesel, por consiguiente todas estas sustancias generan un mayor impacto negativo sobre el ecosistema del suelo, donde se lleva a cabo la actividad minera.

Otro tipo de contaminación es la física, como es la sedimentación y turbidez, es decir generando impactos ambientales con la remoción de cobertura vegetal, dragado y movimiento de tierras; un ejemplo muy común en la minería que para obtener un gramo de oro se tiene que remover 1 tonelada de suelo (Alvarado, M. C. 2019), acto seguido y como consecuencia generando degradación de los suelos, y lo que implica impactos ambientales sin precedentes, generando erosión, compactación y pérdida de fertilidad, también otros tipos de contaminación física encontramos el material particulado en el aire de PM10 y PM2.5, lo que impacta la salud de los

pobladores y por último la deforestación y aperturas de caminos alteran los hábitats, impactando y modificando la estructura del suelo los y corredores biológicos.

Para los impactos generados por la actividad minera informal, existen tratamientos eficaces y confiables para la recuperación de los ecosistemas perturbados, como es la biorremediación, que es el proceso biotecnológico que emplea organismos para recuperar un ambiente contaminado terrestre o acuático. Por ende, se utilizan organismos vivos como bacterias, hongos y plantas para inmovilizar, mineralizar o degradar los contaminantes pesados presentes en el suelo. Para el tratamiento de la biorremediación, se tiene que hacer in situ, es decir en el mismísimo lugar donde está el área contaminada, y según los organismos están clasificados en: degradación enzimática, es decir uso exclusivo de enzimas, biorremediación microbiana es decir uso de bacterias y hongos y por último la fitorremediación que es exclusivamente la utilización de plantas, que son capaces de extraer metales pesados a partir de la adsorción (Josefina, B. 2021). Muchos estudios señalan que la biorremediación es eficaz en la recuperación de los ecosistemas degradados, debido que presentan una alta adsorción de metales pesados y por consiguiente una mejor restauración de los suelos, agua y el aire.

Un estudio realizado por científicos en Perú, precisamente en el Amazonas, un sector llamado Madre de Dios, en una zona afectada por la minería ilegal, en el cual implementaron la biorremediación con Alfalfa tropical (planta primera sucesión), para recuperar las áreas mineras degradadas por la extracción del oro y dando como resultados una mejor fertilidad del suelo, así mismo permitiendo reintroducir especies forestales de alto valor ecológico (Agro Perú, 2025). Otro estudio que respalda la importancia de la biorremediación es la de los suelos contaminados por hidrocarburos, el cual impacta de manera grave la fertilidad del suelo; en el estudio utilizaron el estiércol del animal como el de vaca y las aves, el cual arrojaron resultados positivos, con la reducción entre el 80 % y el 96%, de la degradación de hidrocarburos en el suelo (Alegbeleye, O et al., 2017). Y así sucesivamente varios estudios científicos que destacan la importancia de la biorremediación, como un tratamiento eficaz y confiable en la recuperación de los suelos, causados por los impactos que genera la actividad minera (oro).

El objetivo de este trabajo es elaborar un plan de recuperación de suelos degradados por la minería ilegal en el municipio de Caucasia, Antioquia, con el fin de establecer pautas que lleven a mejorar la calidad del ecosistema y que a mediano plazo se pueda conservar la fertilidad, estructura y la biodiversidad de la zona. Sin embargo, se debe tener ciertas medidas de manejo, que se llevarán a cabo después de la extracción minera. En conclusión, es necesario tener en cuenta algunos factores determinantes para llevar al éxito una recuperación del suelo. Son cinco los factores a considerar, los cuales son, primero, preparación del suelo, segundo explanado del terreno, tercero, compactación del suelo y distribución del material orgánico, cuarto, acondicionamiento posterior es decir aporte de abonos y escarificación del suelo para la infiltración del agua y penetración de raíces y quinto un tratamiento de biorremediación. Todos estos factores son necesarios para una óptima adecuación del terreno, y que permita aproximarse al estado inicial del suelo (antes de la degradación) (MADS. 2025).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Elaborar un plan de recuperación de suelos degradados por la minería ilegal en el municipio de Caucasia.

2.2 Objetivos específicos

Restaurar la capacidad productiva del suelo afectado

Revertir la degradación causada por la minería

Promover prácticas para mitigar los impactos ambientales de la minería

3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se abordó fue principalmente un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), por cual por la parte cualitativa se analiza los saberes de otras investigaciones relacionadas con los suelos y plantas para elaborar un plan de recuperación de suelos degradados

y por la parte cuantitativa se incorpora datos, debido que hubo un trabajo piloto en campo en la zona de influencia en el municipio de Cauca, por lo cual se analiza datos dasométricos de las especies estudiadas y el índice de valor de importancia de las especies.

3.2 Área de Estudio

El trabajo piloto en campo se llevará a cabo en el municipio de Cauca, vereda Campo Alegre, que se encuentra localizado en la subregión denominada Bajo Cauca al norte del departamento de Antioquia. Cauca tiene una topografía plana, el clima del municipio es en su mayoría tropical cálido húmedo, desde los 21° C y un máximo promedio de 35° C, cuenta con una precipitación de 2115 mm anual y pertenece a la zona de vida de Bosque húmedo Tropical (Bh-T) según la clasificación de zonas de vida de (Holdridge, L. R. 1982).

El lugar es seleccionado debido que es uno de los municipios de Antioquia, donde más han degradado y afectado la superficie del suelo de manera significativa, a causa de la minería ilegal de oro.

3.3 Instrumentos de recolección de datos

La principal herramienta utilizada para recopilar la información bibliográfica fue el indexador Scopus el cual se verifica la autenticidad de los estudios que ahí reposan, y en todos los estudios científicos dan como resultado optimista la recuperación de suelos por medio de la fitorremediación y acompañado de unas actividades de adecuación del terreno, y que a mediano y largo plazo se obtenga un estado inicial del suelo, es decir, vuelva los microorganismos y por ende vuelva la flora y la fauna. También un instrumento muy utilizado en la investigación y que aportó en el plan de recuperación de suelos, es el Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas – PNR, (MADS. 2025).

3.4 Plan de Manejo en la recuperación del suelo degradado en el Municipio de Cauca

Para elaborar un buen manejo de recuperación de los suelos, afectados por la minería ilegal en el municipio de Cauca, se tuvo en cuenta varios estudios científicos a nivel nacional e internacional, que involucran en su proceso de recuperación la remediación con plantas, hongos,

bacterias, enzimas, biocarbon y estiércol, debido a su potente bioacumulación y eliminación de metales pesados. (Palacios P. M. 2009).

Las siguientes fórmulas son las que se utilizarán, para establecer el valor de importancia de las especies arbóreas encontradas en campo y de esta forma se seleccionará las que obtengan una mayor calificación.

4. Cálculo de la abundancia relativa.

Para el cálculo de la abundancia relativa, se calcula la proporción de individuos de una especie en relación con el total de individuos en una comunidad. Es decir, se calcula dividiendo el número de individuos de una especie por el total de individuos en la comunidad y multiplicando por 100 para obtener en porcentaje, (Díaz, I. 2023).

$$Ar = (n/N) \times 100$$

Donde:

Ar = Abundancia relativa por especie

n = Número de individuos de la especie

N = Número general de todas las especies

El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal

5. Cálculo de la frecuencia relativa.

Para el cálculo de la frecuencia relativa se refiere a la existencia o falta de una determinada especie en una parcela. Para este proyecto como se trata de la elaboración de tres parcelas, se va a calcular primero la frecuencia absoluta, es decir cuantas veces se encuentra determinada especie en las tres parcelas y por último se multiplica por 100 %, para saber la existencia de las especies en todas las parcelas (Frecuencia relativa), (Herrera, A. 2023).

$$Fr = (n/N) \times 100$$

Donde:

$Fr = \text{Frecuencia relativa de la especie}$

$n = \text{Número de parcelas en donde la especie está presente}$

$N = \text{Número total de Parcelas}$

El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal

6. Cálculo de la Dominancia relativa.

Para el cálculo de la Dominancia relativa se determina la proporción de la especie en el área total de la parcela, expresada en porcentaje. La Dominancia relativa se expresa en un rango de 0 a 100%, donde 0% indica que la especie no es dominante y 100% indica que es la especie más abundante en la parcela. (Gárate Escamilla, H. A 2023).

$$Dr = (i/N) \times 100$$

$Dr. = \text{Dominancia relativa de la especie}$

$i = \text{Área Basal}$

$N = \text{Área basal general de todas las especies}$

El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal

7. Cálculo del Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies.

Cálculo del IVI: Una vez que se tienen los valores de importancia relativa para todas las especies, se calcula el IVI sumando los VIR de todas las especies presentes en el ecosistema. El IVI es un valor numérico que representa la importancia relativa de todas las especies en conjunto. El IVI nos aporta información sobre la diversidad, la equidad y la similitud florística de las comunidades o ecosistemas vegetales, (Herrera, A. 2023).

$$IVI = \sum (ARi, DRi, FRi) / 3$$

Donde:

$$IVI = \text{Índice de Valor de Importancia}$$
$$AR i = \text{Abundancia relativa por especie}$$
$$DR i = \text{Dominancia relativa de la especie}$$
$$FR i = \text{Frecuencia relativa de la especie}$$

El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal

Para el cálculo del índice de valor de importancia, se tuvo en cuenta el número de individuos de cada especie respecto al total de individuos en la muestra (Abundancia relativa), la medida del área basal de cada especie en relación con el área basal del ecosistema (Dominancia relativa) y por último se tuvo en cuenta el número de las parcelas que se encuentra cada especie, respecto al total de las tres parcelas (Frecuencia relativa), es decir, una especie estuvo presente en cuantas de las tres parcelas. Ya teniendo el valor de cada especie en abundancia relativa, dominancia y frecuencia relativas, se puede detallar, como se puede observar en la Figura 1, la importancia de las especies en un ecosistema.

8. Resultados y Discusión

8.1 Análisis de información bibliográfica

Los diferentes estudios investigados y analizados a nivel nacional e internacional, se demuestra que las plantas de primera sucesión (especies pioneras como el Alfalfa) y segunda sucesión (árboles) (Agro, Perú. 2025), necesitan la incorporación de suplementos eficaces como es el biocarbon, hongos, el compost, el estiércol de los animales y las bacterias, (Alegbeleye, O., 2017), debido que son las indicadas en elevar aún más la absorción y a promover la eliminación gradual de los metales pesados en suelos contaminados; además contribuyen a mejorar la capa orgánica y a sustituir los sustratos mermados por la degradación y pérdida en la estructura del suelo, (Palacios P. M. 2009).

Un estudio muy relevante y exitoso por científicos del instituto de investigaciones de la Amazonía peruana (IIAP) en la recuperación de suelos degradados por la minería ilegal, fue la implementación de Alfalfa tropical, una planta de primera sucesión, en Madre de Dios, en el país

vecino de Perú, en el cual la estrategia era devolver a los suelos la fertilidad mínima necesaria, para permitir en el futuro procesos de reforestación. El estudio se basó con un bajo costo debido que esa planta era común en los bosques tropicales, y para obtenerla no tuvieron problema. Los resultados con Alfalfa tropical, fue muy exitosa debido que logró adaptarse a suelos contaminados, y en 470 días de estudio y seguimiento, produjo 23.9 toneladas de biomasa por hectárea y fijó 450 kg de nitrógeno por hectárea. Los resultados obtenidos mostraron mejorías sustanciales en la salud del suelo, el intercambio catiónico aumentó, la respiración microbiana se triplicó y la biodiversidad de la macrofauna se elevó de dos a once grupos taxonómicos, el secuestro de carbono aumentó de 0.004 t/ha a 0.07 t/ha, representa un incremento más de 1650 %. Es la mejor estrategia de biorremediación, implementar plántulas de primera sucesión, debido que no demandan tantos recursos en su etapa de crecimiento, como en las plántulas de segunda sucesión. La siguiente imagen muestra la capacidad del Alfalfa tropical, en copar con mucho volumen los espacios degradados por la minería ilegal. (Agro, Perú. 2025).

Imagen 1 Alfalfa tropical en Madre de Dios



Fuente: IIAP; 2025

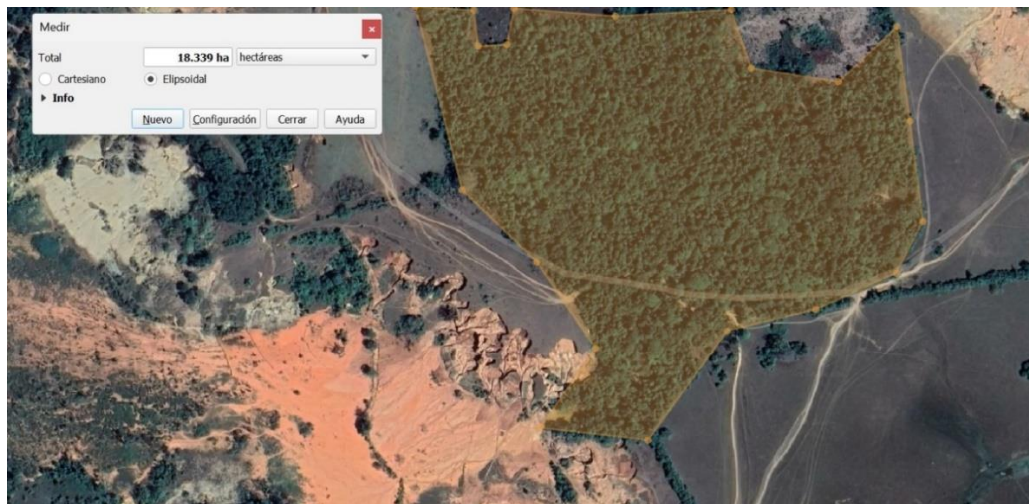
8.2 Resultados Trabajo piloto en campo

8.2.1 Prueba piloto en campo para la selección de las especies arbóreas

Lo siguiente es un estudio, basado a una prueba piloto en campo en un lugar específico en el municipio de Caucasia, en la vereda Campo Alegre, para establecer que especies arbóreas son de valor de importancia ecosistémico, en cuanto a la abundancia, dominancia y la relatividad. Debido que es importante a la hora de seleccionar las especies fitorremediadoras para establecer un plan de recuperación de un suelo degradado.

La siguiente imagen detalla el área de estudio.

Imagen 2 Área de interés donde se llevará el estudio (18 ha)



Fuente: Autor, aplicación QGIS Cartografía

La imagen anterior, se visualiza el lugar donde se llevó a cabo el trabajo piloto en campo, para establecer en una extensión pequeña de aproximadamente de 18 hectáreas, un levantamiento de parcelas, el cual se obtuvo datos dasométricos de especies forestales presentes en una zona de influencia de minería ilegal.

Las siguientes actividades a continuación se llevaron a cabo, para obtener la información necesaria en que nos pueden ayudar para seleccionar las mejores especies arbóreas, cuando se requiera elaborar un plan de recuperación de suelos degradados por la minería ilegal en el municipio de Caucasia.

8.2.2 Levantamiento de las parcelas (50 m largo x 20 m ancho)

Después de seleccionado el sitio, se elige un área representativa del ecosistema, se delimita la parcela con ayuda de la cinta métrica y marcando con estacas, de frente de 20 m por el largo de 50 m. (1000 M2). El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal.

Imagen 3 La siguiente imagen se puede observar las tres parcelas levantadas.



Fuente: Autor; Aplicación QGIS Cartografía

8.2.3 Identificar y registrar las especies pioneras presentes dentro de cada parcela

Después de delimitada la parcela, se registra la información de las especies pioneras que se encuentran en el lugar de estudio. El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal.

En esta actividad se elabora un censo cualitativo (identificar y registrar) de las especies arbóreas presentes dentro de la parcela (tres parcelas en total) y su posterior marcación de cada individuo. El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal.

Tabla 1 Registro de todos los individuos inventariados en cada parcela

Parcela	No. Árbol	Especie
1	1	<i>Bursera Simaruba (L) Sarg.</i>
1	2	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>
1	3	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>
1	4	<i>Muntingia Calabura L.</i>
1	5	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>
1	6	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	7	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>
1	8	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>
1	9	<i>Cecropia Peltata L.</i>
1	10	<i>Cecropia Peltata L.</i>
1	11	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	12	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>
1	13	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	14	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	15	<i>Cedrela Odorata L.</i>
1	16	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	17	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	18	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	19	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	20	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	21	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	22	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	23	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	24	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>
1	25	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	26	<i>Cedrela Odorata L.</i>
1	27	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>
1	28	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>

Parcela	No. Árbol	Especie
1	29	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	30	<i>Maclura Tinctoria</i>
1	31	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>
1	32	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	33	<i>Tamarindus Indica L</i>
1	34	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	35	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
1	36	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>
2	37	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>
2	38	<i>Handroanthus chrysanthus</i>
2	39	<i>Cedrela Odorata L.</i>
2	40	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
2	41	<i>Cecropia Peltata L.</i>
2	42	<i>Sapium glandulosum</i>
2	43	<i>Maclura Tinctoria</i>
2	44	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
2	45	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>
2	46	<i>Cedrela Odorata L.</i>
2	47	<i>Enterolobium Cyclocarpum (Jacg.)</i>
2	48	<i>Tamarindus Indica L</i>
2	49	<i>Cecropia Peltata L.</i>
2	50	<i>Cupania americana</i>
2	51	<i>Cupania americana</i>
2	52	<i>Tamarindus Indica L</i>
2	53	<i>Cecropia Peltata L.</i>
2	54	<i>Muntingia Calabura L.</i>
2	55	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>
2	56	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>
2	57	<i>Byrsonima crassifolia</i>

Parcela	No. Árbol	Especie
2	58	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>
2	59	<i>Tamarindus Indica L</i>
2	60	<i>Schefflera morototoni</i>
2	61	<i>Cedrela Odorata L.</i>
2	62	<i>Cedrela Odorata L.</i>
2	63	<i>Maclura Tinctoria</i>
2	64	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
2	65	<i>Cecropia Peltata L.</i>
2	66	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacq.)</i>
2	67	<i>Cupania americana</i>
2	68	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>
2	69	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>
2	70	<i>Cedrela Odorata L.</i>
2	71	<i>Ficus nymphaeifolia Mill.</i>
2	72	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>
2	73	<i>Piper auritum Kunth</i>
3	74	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	75	<i>Cecropia Peltata L.</i>
3	76	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>
3	77	<i>Gliricidia Sepium (Jacq)</i>
3	78	<i>Cecropia Peltata L.</i>
3	79	<i>Cecropia Peltata L.</i>
3	80	<i>Cespedesia spathulata</i>
3	81	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	82	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	83	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	84	<i>Ochroma Pyramidale (Cav. Ex Lam.)</i>
3	85	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	86	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>

Parcela	No. Árbol	Especie
3	87	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	88	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>
3	89	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	90	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>
3	91	<i>Cupania americana</i>
3	92	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	93	<i>Cecropia Peltata L.</i>
3	94	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	95	<i>Cecropia Peltata L.</i>
3	96	<i>Cecropia Peltata L.</i>
3	97	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	98	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>
3	99	<i>Mangifera indica</i>
3	100	<i>Cupania americana</i>
3	101	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	102	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	103	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>
3	104	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	105	<i>Enterolobium Cyclocarpum (Jacg.)</i>
3	106	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>
3	107	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>
3	108	<i>Maclura Tinctoria</i>
3	109	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>
3	110	<i>Bursera Simaruba (L) Sarg.</i>
3	111	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>
3	112	<i>Cedrela Odorata L.</i>
3	113	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>
3	114	<i>Mangifera indica</i>
3	115	<i>Maclura Tinctoria</i>

Parcela	No. Árbol	Especie
3	116	<i>Mangifera indica</i>
3	117	<i>Mangifera indica</i>
3	118	<i>Maclura Tinctoria</i>
3	119	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>

Fuente: Autor; 2025

La anterior tabla arroja 119 individuos inventariados y registrados en las tres parcelas evaluadas en la zona donde se llevó el estudio de investigación.

8.2.4 Conteo y medición de CAP y Altura de los árboles.

Después de identificar los individuos, se registran las especies arbóreas (datos dasométricos), se calcula la circunferencia a la altura del pecho (CAP) y la altura total. El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal

Tabla 2 Enumeración de los individuos arbóreos y mediciones

Parcela	No. Árbol	Especie	CAP	DAP (m)	Altura Total
1	1	<i>Bursera Simaruba (L) Sarg.</i>	121	0.39	14
1	2	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	34	0.11	6
1	3	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>	112	0.36	12
1	4	<i>Muntingia Calabura L.</i>	38	0.12	9
1	5	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>	160	0.51	13
1	6	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	75	0.24	12
1	7	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	36	0.11	9
1	8	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>	48	0.15	11
1	9	<i>Cecropia Peltata L.</i>	62	0.20	13
1	10	<i>Cecropia Peltata L.</i>	47	0.15	11
1	11	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	65	0.21	11
1	12	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	60	0.19	13
1	13	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	39	0.12	11

Parcela	No. Árbol	Especie	CAP	DAP (m)	Altura Total
1	14	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	72	0.23	13
1	15	<i>Cedrela Odorata L.</i>	135	0.43	15
1	16	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	69	0.22	12
1	17	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	45	0.14	10
1	18	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	41	0.13	8
1	19	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	58	0.18	6
1	20	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	47.5	0.15	8
1	21	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	65	0.21	8
1	22	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	61	0.19	6
1	23	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	55	0.18	7
1	24	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>	38	0.12	10
1	25	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	73	0.23	12
1	26	<i>Cedrela Odorata L.</i>	100	0.32	15
1	27	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	40	0.13	7
1	28	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	39	0.12	6
1	29	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	69	0.22	9
1	30	<i>Maclura Tinctoria</i>	42	0.13	7
1	31	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	36	0.11	6
1	32	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	46	0.15	11
1	33	<i>Tamarindus Indica L</i>	98	0.31	11
1	34	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	73	0.23	12
1	35	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	68	0.22	9
1	36	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	43	0.14	12
2	37	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>	130	0.41	18
2	38	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	67	0.21	12
2	39	<i>Cedrela Odorata L.</i>	150	0.48	17
2	40	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	61	0.19	8
2	41	<i>Cecropia Peltata L.</i>	73	0.23	14
2	42	<i>Sapium glandulosum</i>	44	0.14	9
2	43	<i>Maclura Tinctoria</i>	37	0.12	6

Parcela	No. Árbol	Especie	CAP	DAP (m)	Altura Total
2	44	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	55	0.18	7
2	45	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>	79	0.25	13
2	46	<i>Cedrela Odorata L.</i>	140	0.45	18
2	47	<i>Enterolobium Cyclocarpum (Jacg.)</i>	39	0.12	10
2	48	<i>Tamarindus Indica L.</i>	84	0.27	13
2	49	<i>Cecropia Peltata L.</i>	87	0.28	15
2	50	<i>Cupania americana</i>	46	0.15	8
2	51	<i>Cupania americana</i>	68	0.22	12
2	52	<i>Tamarindus Indica L.</i>	87	0.28	14
2	53	<i>Cecropia Peltata L.</i>	54	0.17	16
2	54	<i>Muntingia Calabura L.</i>	39	0.12	11
2	55	<i>Gliricidia Sepium (Jacg.)</i>	127	0.40	13
2	56	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	43	0.14	12
2	57	<i>Byrsonima crassifolia</i>	105	0.33	14
2	58	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	47	0.15	4
2	59	<i>Tamarindus Indica L.</i>	115	0.37	15
2	60	<i>Schefflera morototoni</i>	50	0.16	13
2	61	<i>Cedrela Odorata L.</i>	160	0.51	17
2	62	<i>Cedrela Odorata L.</i>	135	0.43	18
2	63	<i>Maclura Tinctoria</i>	38	0.12	4,5
2	64	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	47	0.15	8
2	65	<i>Cecropia Peltata L.</i>	42	0.13	12
2	66	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>	200	0.64	18
2	67	<i>Cupania americana</i>	54	0.17	10
2	68	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	42	0.13	12
2	69	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	37	0.12	8
2	70	<i>Cedrela Odorata L.</i>	180	0.57	19
2	71	<i>Ficus nymphaeifolia Mill.</i>	57	0.18	11
2	72	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	46	0.15	12
2	73	<i>Piper auritum Kunth</i>	34	0.11	12

Parcela	No. Árbol	Especie	CAP	DAP (m)	Altura Total
3	74	<i>Cedrela Odorata L.</i>	39	0.12	6
3	75	<i>Cecropia Peltata L.</i>	54	0.17	12
3	76	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	34	0.11	8
3	77	<i>Gliricidia Sepium (Jacq)</i>	92	0.29	7
3	78	<i>Cecropia Peltata L.</i>	41	0.13	8
3	79	<i>Cecropia Peltata L.</i>	43	0.14	11
3	80	<i>Cespedesia spathulata</i>	37	0.12	8
3	81	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	67	0.21	9
3	82	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	39	0.12	11
3	83	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	47	0.15	10
3	84	<i>Ochroma Pyramidale (Cav. Ex Lam.)</i>	165	0.53	16
3	85	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	69	0.22	11
3	86	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	48	0.15	8
3	87	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	88	0.28	9
3	88	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	52	0.17	10
3	89	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	44	0.14	9
3	90	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacq.)</i>	42	0.13	11
3	91	<i>Cupania americana</i>	41	0.13	8
3	92	<i>Cedrela Odorata L.</i>	100	0.32	17
3	93	<i>Cecropia Peltata L.</i>	48	0.15	10
3	94	<i>Cedrela Odorata L.</i>	34	0.11	7
3	95	<i>Cecropia Peltata L.</i>	43	0.14	9
3	96	<i>Cecropia Peltata L.</i>	45	0.14	11
3	97	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	43	0.14	7
3	98	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacq.)</i>	87	0.28	16
3	99	<i>Mangifera indica</i>	220	0.70	12
3	100	<i>Cupania americana</i>	81	0.26	16
3	101	<i>Cedrela Odorata L.</i>	44	0.14	11
3	102	<i>Cedrela Odorata L.</i>	54	0.17	13
3	103	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	65	0.21	8

Parcela	No. Árbol	Especie	CAP	DAP (m)	Altura Total
3	104	<i>Cedrela Odorata L.</i>	185	0.59	15
3	105	<i>Enterolobium Cyclocarpum (Jacg.)</i>	57	0.18	11
3	106	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	54	0.17	8
3	107	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	63	0.20	9
3	108	<i>Maclura Tinctoria</i>	66	0.21	9
3	109	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	137	0.44	17
3	110	<i>Bursera Simaruba (L) Sarg.</i>	68	0.22	15
3	111	<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>	127	0.40	10
3	112	<i>Cedrela Odorata L.</i>	105	0.33	14
3	113	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>	135	0.43	18
3	114	<i>Mangifera indica</i>	170	0.54	13
3	115	<i>Maclura Tinctoria</i>	48	0.15	11
3	116	<i>Mangifera indica</i>	140	0.45	13
3	117	<i>Mangifera indica</i>	168	0.53	13
3	118	<i>Maclura Tinctoria</i>	78	0.25	16
3	119	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacg.)</i>	508	1.62	25

Fuente: Autor; 2025

8.2.5 Georreferenciar los individuos arbóreos identificados

Al momento de registrar y calcular las variables de medición de cada especie arbórea, lo siguiente es la georreferenciación, es decir coordenada a cada individuo arbóreo presente. El responsable de ejecutar esta actividad es un Ingeniero Forestal

Tabla 3 Individuo con su respectiva georreferenciación, realizada en campo Parcela 1

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
Parcela 1	83	m	473988	889205
<i>Bursera Simaruba (L) Sarg.</i>	78	m	473998	889206
<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	81	m	473986	889202
<i>Gliricidia Sepium (Jacg)</i>	80	m	473987	889201

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
<i>Muntingia Calabura L.</i>	82	m	473986	889199
<i>Gliricidia Sepium (Jacq)</i>	82	m	473988	889202
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	84	m	473985	889208
<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	84	m	473985	889208
<i>Pseudobombax Septenatum (Jacq.)</i>	84	m	473984	889202
<i>Cecropia Peltata L.</i>	83	m	473983	889200
<i>Cecropia Peltata L.</i>	84	m	473978	889198
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	84	m	473978	889198
<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	85	m	473978	889204
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	84	m	473978	889206
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	85	m	473982	889211
<i>Cedrela Odorata L.</i>	85	m	473986	889208
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473986	889209
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473984	889217
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473979	889217
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473977	889218
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	87	m	473975	889221
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473972	889221
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473966	889220
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	87	m	473965	889218
<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>	87	m	473968	889209
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	473970	889210
<i>Cedrela Odorata L.</i>	87	m	473969	889209
<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	86	m	473967	889209
<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	87	m	473964	889214
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	88	m	473960	889216
<i>Maclura Tinctoria</i>	87	m	473962	889217
<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	89	m	473966	889226
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	89	m	473968	889228
<i>Tamarindus Indica L</i>	89	m	473964	889233

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	89	m	473968	889236
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	89	m	473970	889235
<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	88	m	473962	889233

Fuente: Autor; 2025

Tabla 4 Individuos con su respectiva georreferenciación, realizada en campo Parcela 2

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
Parcela 2	86	m	473993	889207
<i>Pseudobombax Septenatum</i> (Jacq.)	88	m	473995	889274
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	88	m	474000	889273
<i>Cedrela Odorata L.</i>	90	m	473992	889263
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	90	m	473994	889260
<i>Cecropia Peltata L.</i>	90	m	473992	889257
<i>Sapium glandulosum</i>	91	m	473996	889251
<i>Maclura Tinctoria</i>	91	m	473998	889251
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	89	m	474011	889245
<i>Pseudobombax Septenatum</i> (Jacq.)	89	m	474017	889246
<i>Cedrela Odorata L.</i>	89	m	474021	889243
<i>Enterolobium Cyclocarpum</i> (Jacq.)	91	m	474016	889235
<i>Tamarindus Indica L</i>	91	m	474015	889232
<i>Cecropia Peltata L.</i>	91	m	474016	889231
<i>Cupania americana</i>	92	m	474009	889226
<i>Cupania americana</i>	91	m	474008	889226
<i>Tamarindus Indica L</i>	92	m	474010	889225
<i>Cecropia Peltata L.</i>	91	m	474013	889222
<i>Muntingia Calabura L.</i>	92	m	474018	889220
<i>Gliricidia Sepium (Jacq)</i>	92	m	474019	889217
<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	93	m	474014	889218
<i>Byrsonima crassifolia</i>	93	m	474015	889219

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	93	m	474021	889223
<i>Tamarindus Indica L</i>	91	m	474026	889226
<i>Schefflera morototoni</i>	93	m	474026	889229
<i>Cedrela Odorata L.</i>	92	m	474027	889230
<i>Cedrela Odorata L.</i>	93	m	474025	889242
<i>Maclura Tinctoria</i>	92	m	474027	889243
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	92	m	474030	889245
<i>Cecropia Peltata L.</i>	91	m	474031	889242
<i>Pseudobombax Septenatum</i> (Jacq.)	92	m	474035	889238
<i>Cupania americana</i>	93	m	474036	889237
<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	92	m	474037	889235
<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	92	m	474037	889235
<i>Cedrela Odorata L.</i>	92	m	474036	889236
<i>Ficus nymphaeifolia Mill.</i>	91	m	474032	889232
<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	91	m	474032	889232
<i>Piper auritum Kunth</i>	92	m	474030	889245

Fuente: Autor; 2025

Tabla 5 Individuos con su respectiva georreferenciación, realizada en campo Parcela 3

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
Parcela 3	83	m	474056	889258
<i>Cedrela Odorata L.</i>	87	m	474056	889310
<i>Cecropia Peltata L.</i>	87	m	474051	889308
<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	86	m	474053	889306
<i>Gliricidia Sepium (Jacq)</i>	86	m	474052	889301
<i>Cecropia Peltata L.</i>	86	m	474049	889300
<i>Cecropia Peltata L.</i>	86	m	474048	889299
<i>Cespedesia spathulata</i>	85	m	474047	889299
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	474040	889303
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	86	m	474037	889303
<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	85	m	474037	889305

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
<i>Ochroma Pyramidale</i> (Cav. Ex Lam.)	85	m	474035	889305
<i>Guazuma Ulmifolia</i> Lam.	85	m	474036	889303
<i>Guazuma Ulmifolia</i> Lam.	86	m	474039	889299
<i>Guazuma Ulmifolia</i> Lam.	85	m	474038	889298
<i>Miconia elata</i> (Sw) DC.	85	m	474041	889297
<i>Guazuma Ulmifolia</i> Lam.	85	m	474042	889295
<i>Pseudobombax Septenatum</i> (Jacg.)	84	m	474039	889291
<i>Cupania americana</i>	84	m	474038	889290
<i>Cedrela Odorata</i> L.	84	m	474037	889287
<i>Cecropia Peltata</i> L.	84	m	474038	889287
<i>Cedrela Odorata</i> L.	84	m	474033	889284
<i>Cecropia Peltata</i> L.	84	m	474031	889281
<i>Cecropia Peltata</i> L.	85	m	474030	889281
<i>Guazuma Ulmifolia</i> Lam.	85	m	474029	889280
<i>Pseudobombax Septenatum</i> (Jacg.)	85	m	474026	889279
<i>Mangifera indica</i>	86	m	474026	889279
<i>Cupania americana</i>	84	m	474025	889276
<i>Cedrela Odorata</i> L.	84	m	474035	889274
<i>Cedrela Odorata</i> L.	84	m	474037	889275
<i>Vismia Macrophylla</i> Kunth	83	m	474043	889272
<i>Cedrela Odorata</i> L.	83	m	474045	889272
<i>Enterolobium Cyclocarpum</i> (Jacg.)	83	m	474047	889263
<i>Guazuma Ulmifolia</i> Lam.	83	m	474058	889261
<i>Vismia Macrophylla</i> Kunth	83	m	474059	889260
<i>Maclura Tinctoria</i>	84	m	474054	889257
<i>Zanthoxylum Riedelianum</i> Engl.	84	m	474055	889257
<i>Bursera Simaruba</i> (L) Sarg.	84	m	474054	889256
<i>Gliricidia Sepium</i> (Jacg.)	85	m	474049	889253
<i>Cedrela Odorata</i> L.	84	m	474057	889257
<i>Pseudobombax Septenatum</i> (Jacg.)	83	m	474059	889260

Árboles	Altitude	Unidad	Coordenada X	Coordenada Y
<i>Mangifera indica</i>	83	m	474060	889261
<i>Maclura Tinctoria</i>	83	m	474066	889263
<i>Mangifera indica</i>	83	m	474066	889263
<i>Mangifera indica</i>	83	m	474071	889267
<i>Maclura Tinctoria</i>	83	m	474065	889269
<i>Pseudobombax Septenatum (Jacq.)</i>	83	m	474063	889271

Fuente: Autor; 2025

Lo siguiente son los datos cualitativos y cuantitativos obtenidos en campo (prueba piloto), el cual se reemplazó en las fórmulas de Abundancia, Frecuencia y Dominancia, para calcular el índice de valor de importancia, dando resultados confiables en la fitorremediación para un plan de recuperación de los suelos degradados por la minería, como se puede observar en la siguiente tabla 6.

Tabla 6 Cálculo del Índice de Valor de Importancia de las especies (IVI)

No	ESPECIE	AA	AR %	FA	FR %	DA	DR %	IVI
1	<i>Piper auritum Kunth</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.009	0.10%	3.07%
2	<i>Cespedesia spathulata</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.011	0.12%	3.09%
3	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.011	0.13%	3.10%
4	<i>Sapium glandulosum</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.015	0.17%	3.14%
5	<i>Schefflera morototoni</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.020	0.23%	3.19%
6	<i>Ficus nymphaeifolia Mill.</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.026	0.29%	3.26%
7	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.036	0.40%	3.37%
8	<i>Byrsonima crassifolia</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.088	0.99%	3.96%
9	<i>Ochroma Pyramidale (Cav. Ex Lam.)</i>	1	0.84%	0.3	2.13%	0.217	2.45%	5.42%
10	<i>Muntingia Calabura L.</i>	2	1.68%	0.7	4.26%	0.024	0.27%	6.20%
11	<i>Enterolobium Cyclocarpum (Jacq.)</i>	2	1.68%	0.7	4.26%	0.038	0.43%	6.37%
12	<i>Bursera Simaruba (L) Sarg.</i>	2	1.68%	0.7	4.26%	0.153	1.74%	7.67%
13	<i>Cupania americana</i>	5	4.20%	0.7	4.26%	0.142	1.61%	10.07%
14	<i>Tamarindus Indica L</i>	4	3.36%	0.7	4.26%	0.298	3.38%	10.99%
15	<i>Miconia elata (Sw) DC.</i>	6	5.04%	1.0	6.38%	0.099	1.12%	12.54%
16	<i>Vismia Macrophylla Kunth</i>	6	5.04%	1.0	6.38%	0.121	1.37%	12.79%

No	ESPECIE	AA	AR %	FA	FR %	DA	DR %	IVI
17	<i>Zanthoxylum Riedelianum Engl.</i>	5	4.20%	1.0	6.38%	0.198	2.24%	12.83%
18	<i>Maclura Tinctoria</i>	6	5.04%	1.0	6.38%	0.138	1.56%	12.99%
19	<i>Mangifera indica</i>	4	3.36%	0.3	2.13%	0.996	11.28%	16.77%
20	<i>Gliricidia Sepium (Jacq)</i>	5	4.20%	1.0	6.38%	0.628	7.11%	17.69%
21	<i>Cecropia Peltata L.</i>	12	10.08%	1.0	6.38%	0.289	3.27%	19.73%
22	<i>Cedrela Odorata L.</i>	14	11.76%	1.0	6.38%	1.666	18.87%	37.01%
23	<i>Guazuma Ulmifolia Lam.</i>	29	24.37%	1.0	6.38%	0.815	9.23%	39.99%
24	<i>Pseudobombax Septenatum (Jacq.)</i>	8	6.72%	1.0	6.38%	2.794	31.64%	44.74%
TOTAL		119	100%	15.7	100%	8.830	100%	300.00%

Fuente: Autor; 2025

La anterior tabla demuestra que las especies *Pseudobombax Septenatum (Jacq.)*, *Guazuma Ulmifolia Lam.* Y *Cedrela Odorata L.*, son las más indicadas en repoblar un ecosistema perturbado por la actividad minera, la importancia radica en la adaptabilidad y supervivencia que demuestran las especies en entornos con influencia minera, la abundancia, la frecuencia y la dominancia de las especies; por lo cual es un factor clave en la recuperación de los suelos degradados, y es de vital importancia en proyectos de restauración y reforestación (protector), que se tengan en su integración el Índice de Valor de Importancia de la especies (IVI) de la zona.

Figura 1 IVI de las especies encontradas en las tres parcelas

Fuente: Autor; 2025

Lo que se puede analizar la anterior gráfica es que la especie que mayor dominancia tiene en las tres parcelas es la *Pseudobombax Septenatum* (Jacq.), debido que son especies que tienden a ganar mayor área basal en cuanto a las demás especies en área determinada y la de mayor abundancia es la *Guazuma Ulmifolia* Lam, debido que tienen un mayor número de individuos con respecto a las demás especies. En conclusión, son especies que se adaptan muy rápido frente a las demás en esos ecosistemas estudiados, y propicios para integrar en un plan de recuperación de suelos degradados.

La selección de las especies es fundamental para encaminar una recuperación de suelos degradados por la minería ilegal, debido que los estudios respaldan la importancia de las plantas, en la estabilización de los metales contaminantes presentes en los suelos. La prueba piloto realizado en la vereda Campoalegre, del municipio de Cauca, Antioquia, resalta la importancia de calcular el peso ecológico de una especie, el cual permite establecer que especies son más importantes en

un ecosistema y por ende sería las candidatas valoradas en implementarse en un plan de recuperación de suelos.

8.3 Plan de recuperación de suelos degradados por la minería

De acuerdo con la información obtenida y analizada de las investigaciones y del trabajo piloto en campo de manera cualitativa y cuantitativamente, se elabora un plan de recuperación de suelos degradados por la minería en el municipio de Caucasia, el cual se detalla a continuación en once pasos fundamentales.

- a) Diagnóstico del suelo: Análisis físico, químico y biológico.
- b) Elección del sitio: El lugar a recuperar tiene que ser el mismo donde fue la actividad minera y no en otro lugar diferente.
- c) Preparación del suelo: Reacondicionar el suelo, en cuanto a perfilación, compactación y forma.
- d) Explanado del terreno: El suelo debe ser nivelado y que beneficie la infiltración del agua, para evitar inundaciones.
- e) Manejo hidráulico: Cunetas o zanjas de infiltración de escorrentías para evitar erosión del suelo.
- f) Distribución e incorporación del material orgánico: Por ejemplo, el compost, que ayuda a retener los contaminantes y por ende alimenta las plantas.
- g) Acondicionamiento posterior: Después del aporte orgánico, se escarifica el suelo con profundidades entre 10 y 15 cm, para facilitar la infiltración, el crecimiento de las raíces y no compacta el suelo.
- h) Fitorremediación: Selección de especies fitorremediadoras. Es importante propiciar la vegetación pionera, es decir de primeras sucesiones, por ejemplo, la Alfalfa tropical, debido su aporte significativo de materia orgánica. Después de cierto tiempo y con abundante abono de la vegetación de primera sucesión, se prioriza la siembra de árboles nativos con interés ecosistémico de la zona, como son las leguminosas, ya que fijan nitrógeno y enriquece los suelos desnudos con materia orgánica.

-
- i) Producción de material nativo: Debido que se trata de recuperar un ecosistema degradado, habrá que desarrollar un vivero, para tener el material adecuado y seleccionado y de esta manera garantizar una restauración exitosa.
 - j) Mantenimiento y monitoreo periódico: Es necesario para garantizar la eficacia de los tratamientos, debido que algunas especies no germinan o mueren a temprana edad, por ende, hay que resembrar hasta lograr la eficacia total del tratamiento, por lo cual se recomienda un monitoreo y mantenimiento por alrededor de 3 años.
 - k) Indicadores de éxito: El 100 % del suelo esté repoblado por vegetación, altura del dosel garantiza una eficacia en los tratamientos, presencia de regeneración natural de especies no plantadas, sin desertificación, número de especies arbóreas por hectárea, presencia de fauna, filtración del agua exitoso y suelo sin erosionar.

9. Conclusiones y recomendaciones

El plan de recuperación de suelos degradados, mencionados anteriormente en este documento, el cual se detalla en once pasos fundamentales, es de vital importancia tenerlos en cuenta en la implementación de proyectos de recuperación del suelo degradado por la minería en el municipio de Caucasia para tener éxito y llevar una adecuada recuperación del componente suelo, debido que los estudios científicos y el Plan Nacional de Restauración ecológica en Colombia, coinciden en los pasos que se mencionan en el Plan, con el fin de mejorar y recuperar un ecosistema afectado por la actividad minera.

10. Bibliografía

- Agro Perú. (2025, septiembre 17). Alfalfa tropical: La estrategia de bajo costo para recuperar áreas mineras degradadas en Madre de Dios. *Inforegión* |. <https://inforegion.pe/alfalfa-tropical-la-estrategia-de-bajo-costo-para-recuperar-areas-mineras-degradadas-en-madre-de-dios/>
- Alegbeleye, O., Opeolu, B. y Jackson, V., 2017. *Hidrocarburos aromáticos policíclicos*: una revisión crítica de la ocurrencia ambiental y la biorremediación. *Gestión ambiental*, 60, págs. 758-783. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0896-2>
- Alvarado, M. C., & Ochoa, J. V. (2019). *USO DE MERCURIO EN LA RINCONADA - PUNO*. Org.bo. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v4n1/v4n1_a03.pdf
- ANH. (2024). *Agencia Nacional de Hidrocarburos*. Retrieved from Portal web de la Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia.
- Díaz, I. (2023, octubre 1). *Guía completa para calcular la abundancia relativa en ecología. Ecología Digital*. <https://ecologiadigital.bio/como-se-calcula-la-abundancia-relativa-en-ecologia-y-que-importancia-tiene/>
- FCDS. (2024). *Minería en el bioma amazónico occidental*. Retrieved from observatorioamazonia.fcds.org.co:
- Gárate Escamilla, H. A., Tovar Cárdenas, A., Jurado Ybarra, E., Cotera Correa, M., Alanís Rodríguez, E., & Gutiérrez Gutiérrez, M. (2023). *Diversidad y análisis germinativo de especies arbóreas y arbustivas de interés ecológico en un área incendiada*. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(79), 317–331. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1352>
- Goldrate24. (2025). *Precio del oro por Gramo en Colombia en Peso colombiano (COP)*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.goldrate24.com/es/precios-del-oro/america-del-sur/colombia/gram/>
- Herrera, A. (2023, septiembre 20). *IVI en ecología: importancia y cálculo en ecosistemas. Ecología Digital*. <https://ecologiadigital.bio/que-es-el-ivi-en-ecologia-y-como-se-calcula-su-importancia-en-los-ecosistemas/>
- Josefina, B. (2021). *Ecologiaverde.com*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.ecologiaverde.com/biorremediacion-que-es-tipos-y-ejemplos-3566.html>
- MADS. (2025). *Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas - PNR*. Gov.co. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/gestion-en-biodiversidad/restauracion-ecologica>

- Marrugo, J. L. (2022). *Evaluación Internacional de Experiencias y Lecciones Aprendidas en la Gestión de la Contaminación por Mercurio en la Mape*. Fondo Editorial Universidad de Córdoba.
- Ortiz, M. I. (30 de Noviembre de 2023). El Minería ilegal sin freno: *La fiebre del oro que sigue devorando a Colombia*. El Tiempo. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/justicia/investigacion/mineria-ilegal-la-fiebre-del-oro-amenaza-el-ambiente-y-los-rios>
- Palacios P. M. 2009. *Metodologías de Restauración de Ecosistemas Degradados por Actividades Bélicas y por la Explotación Ilegal del Oro dentro del Ámbito de la Cordillera del Cóndor*. Fundación Conservación Internacional Av. 2 de Mayo 741, Miraflores, Lima, Perú Teléfono: 610-0300 ciperu@conservation.org www.conservation.org.pe.
- PNUMA. (2008). *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala*. PNUMA. Retrieved from https://ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf.
- Sepúlveda, B., Nazer, A., Pavez, O., Para, E., & Contaminadas, R. (2023). Potencial de plantas silvestres para fitorremediación de metales pesados presentes en residuos mineros: *un enfoque para restaurar áreas contaminadas*. Proceedings. <https://doi.org/10.61547/3415>
- Vargas Fernández, C. E., Minaya Lizárraga, A. A., & Málaga Cornejo, M. V. M. (2024). The toxic legacy of artisanal and informal mining: XRF and gis analysis of soil contamination by Hg, Pb and As in the Secocha annex, Camaná, Peru. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 40, 387–402. <https://doi.org/10.20937/rica.55079>