

Observaciones en la diversidad, estructura vegetal y la química del suelo, en sitios de extracción de carbón en Enciso Santander.

Jhon Alexander Calderon Correa, Silvia Alejandra Corzo León

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero forestal.

Director

Ronald Alfonso Montañez Valencia

MSc. Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales

Codirector

Diego Suescún Carvajal

MSc. en Bosques y Conservación Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Instituto de proyección regional de educación a distancia

IPRED

Ingeniería Forestal

Málaga, Santander

2022

Dedicatoria

A nuestro hijo Alan Joseph Calderon Corzo, quien es nuestro motivo para lograr nuestros objetivos y quien nos enseña día a día, que las personas con discapacidades no son diferentes ni poseen capacidades diferentes, todos con o sin discapacidad somos un mundo diferente, cada ser humano es único y valioso, con diferentes maneras y tiempos de aprendizaje. A ti hijo, gracias, por enseñarnos a ser perseverantes, pacientes y luchar incansablemente por cumplir cada meta, eres y serás siempre nuestro motor y mejor regalo de vida.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos formarnos como profesionales íntegros. A nuestro director, Ingeniero Msc. Ronald Alfonso Montañez Valencia y codirector ingeniero Msc. Diego Suescún Carvajal por el apoyo y orientación en cada etapa de investigación, y por motivarnos día a día a ser mejores investigadores.

A la comunidad, dueños y trabajadores de las minas de carbón, por hacer parte de este trabajo al depositar su confianza en nosotros, permitiéndonos trabajar en su bosque y aportándonos conocimientos.

A nuestra familia, amigos y demás personas que fueron participes de manera directa o indirecta, motivándonos siempre y apoyándonos a ser mejores y tener un resultado exitoso.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
2. Objetivos	18
2.1 Objetivo General	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. Marco referencial	19
3.1 Marco histórico	19
3.2 Marco teórico	20
3.2.1 <i>Minería de carbón</i>	20
3.2.2 <i>Relación suelo-planta</i>	20
3.2.3 <i>Respuesta de las plantas a la contaminación por metales pesados</i>	22
3.2.4 <i>Diversidad y estructura vegetal</i>	23
4. Metodología	24
4.1 Área de estudio	24
4.2 Composición florística, diversidad y estructura de la vegetación	26
4.2.1 <i>Ubicación de los sitios de muestreo</i>	26
4.2.2 <i>Establecimiento de parcelas</i>	26
4.2.3 <i>Toma de datos – Inventario forestal</i>	27
4.2.4 <i>Trabajo de herbario</i>	27
4.2.5 <i>Procesamiento de datos</i>	27
4.2.5.1 <i>Número de individuos</i>	28
4.2.5.2 <i>Área basal</i>	28

4.2.5.2.1 Área basal por individuo.....	28
4.2.5.2.2 Área basal total por UM ²	28
4.2.5.2.2 Área basal total por hectárea	28
4.2.5.3 Volumen.....	29
4.2.5.3.1 Volumen total por individuo.....	29
4.2.5.3.2 Volumen total por UM.....	29
4.2.5.3.3 Volumen total por hectárea	29
4.2.5.4 Densidad.....	30
4.2.5.5 Abundancia.....	30
4.2.5.5.1 Abundancia absoluta.....	30
4.2.5.5.2 Abundancia relativa	30
4.2.5.6 Frecuencia	31
4.2.5.6.1 Frecuencia absoluta.....	31
4.2.5.6.2 Frecuencia relativa	31
4.2.5.7 Dominancia	32
4.2.5.7.1 Dominancia absoluta.....	32
4.2.5.7.2 Dominancia relativa	32
4.2.5.8 Composición florística.....	32
4.2.5.8.1 Diversidad alfa.....	33
4.2.5.8.2 Diversidad beta	34
4.2.5.1.3 Estructura física.....	35
4.3 Criterio de distancia	35
4.4 Muestreo de suelos.....	35

4.4.1 Toma de la muestra	36
4.4.2 Conservación de la muestra y almacenamiento	37
4.4.3 Procesamiento de las muestras en laboratorio	37
4.5 Relación de las variables estructurales y el análisis químico del suelo.	37
5. Resultados.....	38
5.2 Composición florística, diversidad y estructura de la vegetación.....	38
5.2.1 Índices de diversidad alfa	40
5.2.2 Índice de diversidad beta	43
5.2.3 Estructura horizontal	43
5.2.3.1 DAP Medio	43
5.2.3.2 Distribución de clases dimétricas.....	44
5.2.3.2 Área basal.....	45
5.2.3.3 Densidad.....	45
5.2.3.4 Índice de valor de importancia para latizales y fustales.....	46
5.2.4 Estructura vertical	47
5.2.4.1 Altura media.....	48
5.2.4.1 Volumen.....	48
5.3 Análisis químico de suelos.....	49
5.3.1 pH del suelo	49
5.3.2 Materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO).....	50
5.3.3 Elementos mayores	51
5.3.3.1 Fósforo, Azufre (mg/kg)	51
5.3.3.2 Calcio, Magnesio, Potasio disponibles (cmol(+)/kg).....	51

5.3.4 Elementos menores	52
5.3.4.1 Hierro y sodio disponibles (mg/kg)	52
5.3.4.2 Boro, Manganeseo, Cobre y Zinc disponibles (mg/kg)	53
5.3.5 Conductividad eléctrica (CE)	53
5.3.6 Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)	54
5.3.7 Metal pesado Cadmio (Cd).....	55
5.4 Relación de las variables estructurales del bosque con la composición química del suelo. ...	55
6. Discusión de resultados.....	61
7. Conclusiones	69
8. Recomendaciones.....	70
Referencias bibliográficas.....	72
Apéndice	82

Lista de Tablas

Tabla 1. Ubicación de las minas de carbón.....	25
Tabla 2. Ubicación de las parcelas temporales	26
Tabla 3. Cantidad de familias, géneros, morfo especié e individuos para fustal y latizal	38
Tabla 4. Familias y morfoespecies identificadas en la zona carbonífera.....	39
Tabla 5. Número de géneros, morfoespecies e individuos por familia.....	40
Tabla 6. Valores de índices de diversidad alfa para fustal y latizal en zona carbonífera	40
Tabla 7. Valores de índices de diversidad alfa para categoría fustal en tres distancias de referencia	41
Tabla 8. Valores de índices de diversidad alfa para categoría latizal en tres distancias de referencia.....	42
Tabla 9. Beta diversidad, índice de Jaccard.....	43
Tabla 10. DAP medio para cada parcela en la categoría fustal y latizal.....	43
Tabla 11. Área basal para la categoría de fustal y latizal.....	45
Tabla 12. Densidad para cada unidad de muestreo de fustal y latizal	45
Tabla 13. Altura media para cada unidad de muestreo, fustal y latizal	48
Tabla 14. Volumen total para cada unidad de muestreo, fustal y latizal	48
Tabla 15. Coeficiente de correlación de Pearson entre variables estructurales de la vegetación y la composición química del suelo para la categoría diamétrica fustal.....	58
Tabla 16. Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables estructurales de la vegetación y la composición química del suelo para categoría diamétrica latizal.....	59
Tabla 17. Coeficiente de correlación de Pearson de la composición química del suelo para las categorías fustales y Latizales.....	60

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización área de estudio.....	24
Figura 2. Ubicación muestreo de suelos.....	39
Figura 3. Diagrama de distribución de clases dimétricas por número de individuos.....	44
Figura 4. Índice de valor de importancia (IVI), latizales.....	46
Figura 5. Índice de valor de importancia (IVI), fustales.....	47
Figura 6. Diagrama de distribución de árboles respecto a su altura.....	47
Figura 7. pH del suelo.....	49
Figura 8. Materia orgánica (MO) y Carbono orgánico (CO) para las distancias de referencia, parte alta, media y baja.....	50
Figura 9. Fósforo, Azufre disponibles (mg/kg).....	51
Figura 10. Calcio, Magnesio, Potasio disponibles (cmol (+) /kg).....	52
Figura 11. Hierro, sodio y disponibles (mg/kg).....	52
Figura 12. Boro, Manganeso, Cobre y Zinc disponibles (mg/kg).....	53
Figura 13. Conductividad eléctrica (CE).....	53
Figura 14. Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)......	54
Figura 15. Análisis de componentes principales (ACP) para fustales.....	55
Figura 16. Análisis de componentes principales (ACP) para latizales.....	60

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Bosque seco tropical (bs-T)	81
Apéndice B. Establecimiento de parcelas	81
Apéndice C. Formato de inventario forestal	83
Apéndice D. Trabajo de herbario y recolección de muestras vegetales	84
Apéndice E. Toma muestra de suelos	86
Apéndice F. Conservación y almacenamiento de la muestra.....	88

Glosario

Análisis de suelos: consiste en determinar los elementos, propiedades físicas y química, presentes en la muestra, lo que permite evaluar y aplicar correctivos en función del balance de nutrientes.

Cadmio: el cadmio (Cd) es un metal pesado presente en el medio ambiente (agua, aire, suelo) procedente de fuentes naturales y de la actividad industrial y agrícola, pudiéndose acumular en los cultivos, organismos terrestres y acuáticos.

Carbón mineral: roca sedimentaria muy rica en carbono y con variedad de elementos como hidrogeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Siendo este, uno de los combustibles fósiles más utilizados.

Carbono: elemento químico no metálico, se encuentra presente en la naturaleza como carbón y diamantes, formando compuestos inorgánicos como el CO₂ u orgánicos como el petróleo.

Cobertura vegetal: capa de vegetación natural que cubre la superficie de la tierra.

Composición florística: es la identidad de las especies vegetales y cantidad de individuos que las representan en determinada área.

Contaminación del suelo: vertimiento de sustancias o elementos de tipo sólido o líquido a suelo, que ocasionan afectación a la biota edáfica, las plantas, la vida animal y la salud humana.

Diversidad de especies: hace referencia a las plantas, animales, hongos y microorganismos que viven en determinado lugar.

Elementos contaminantes del suelo: es la degradación de la calidad del suelo debido a la presencia de sustancias químicas y niveles de concentración, generando alteraciones en el suelo, dada su toxicidad y abundancia como lo son el mercurio, arsénico, plomo y cromo.

Elementos mayores: llamados también como macronutrientes, elementos necesarios en grandes cantidades para asegurar el crecimiento y la supervivencia de las plantas presentes en el suelo, como lo son: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S).

Elementos menores: denominado también como micronutrientes esenciales para las plantas requerido en cantidades pequeñas presentes en el suelo como lo son: el boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), níquel (Ni), molibdeno (Mo) y cloro (Cl).

Estructura florística: es la organización física o el patrón del sistema (incluye abundancia relativa de las especies, abundancia relativa de los ecosistemas, grado de conectividad, etc.)

Fustal: son árboles establecidos con DAP (Diámetro a la altura del pecho) superiores a 10 cm y alturas mayores a 3 m.

Impacto ambiental: modificación positiva o negativa en el ambiente, ocasionada por la acción antrópica o amenaza natural.

Latizal: son arbustos entre 1,50 y 3 m con DAP (Diámetro a la altura del pecho) entre 2,5 y 10 cm.

Materia orgánica del suelo: conjunto de células animales y vegetales descompuestas total o parcialmente por la acción de microorganismos.

Minería: actividad de explotación y extracción de los minerales que se encuentran dispersos o acumulados en el suelo y subsuelo en forma de yacimiento.

Plan de manejo ambiental minero (PMA): es el conjunto de medidas y actividades de una evaluación ambiental, donde, están orientadas a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales debidamente identificados, que se causen por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad.

Suelo: es la capa superficial de la corteza terrestre considerada la parte biológicamente activa, también, es un recurso natural esencial para la vida y para la producción de otros recursos.

Toxicidad en plantas: variabilidad en las concentraciones de determinados elementos disponibles en el suelo. La toxicidad depende de las condiciones del suelo, el manejo de los cultivos (fertilización, riego, etc.) y de la cercanía a zonas industriales o mineras.

Toxicidad del suelo: se debe a los metales pesados en altas concentraciones presentes en el suelo, como consecuencia directa de la actividad minera e industrial.

Vegetación arbórea: vegetación mayor de tres metros de alto y tronco ancho.

Resumen

Título: Observaciones en la diversidad, estructura vegetal y la química del suelo, en sitios de extracción de carbón en Enciso Santander.*

Autores: Jhon Alexander Calderon Correa, Silvia Alejandra Corzo León**

Palabras clave: Bosque seco tropical, contaminación ambiental, minería de socavón, correlaciones, pH, suelos.

Descripción:

El bosque seco tropical (bs-T), en Colombia es un ecosistema frágil, debido, a la fragmentación a causa de incendios forestales, expansión agrícola, ganadera y la minería; degradado dicho ecosistema. El proyecto de grado se realizó en la zona carbonífera del municipio de Enciso Santander, con una extensión de 38 ha, con el objetivo de estudiar la estructura y diversidad de la vegetación con la composición química del suelo. Se establecieron nueve parcelas temporales circulares de 500 m²; la toma de muestra de suelos fue distribuida en tres partes: alta, media y baja. El índice de Simpson para latizal presenta diversidad de media a alta con un valor promedio de 0,70 y para fustal la diversidad es de media a baja con 0,47, además, el coeficiente de mezcla indicó para fustales y latizales que el bosque es homogéneo. Las especies con mayor peso ecológico (IVI) en latizales fueron: *Zanthoxylum rhoifolium* con 16,76% y *Acacia sp. 1* con 11,64 y para fustales *Acacia sp. 1* y *Haematoxylum brasiletto* con 22,85% y 13,88%, respectivamente. Por otro lado, el pH registrado para las partes alta y baja fue de 6,28 y 6,56, respectivamente, y la parte media 5,6 moderadamente ácido. Así mismo, la parte alta presentó bajo contenido de materia orgánica (MO) con un valor de 2,33 g/100g. Las tres partes mostraron bajas concentraciones de fósforo (P), manganeso (Mn) y altas concentraciones de calcio (Ca). Finalmente, la MO presentó una relación inversa con la densidad de individuos, debido, a que los suelos de los bs-T, se erosionan fácilmente debido a la pendiente y baja humedad, por otro lado, la toxicidad por Cd reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, el contenido de clorofilas, también, interfiere en la entrada y transporte de nutrientes.

* Degree Work

** Instituto de proyección regional y educación a distancia IPRED. Programa Ingeniería forestal. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia. MSc. Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales. Codirector: Diego Suescún Carvajal. MSc. en Bosques y Conservación Ambiental.

Abstract

Title: Observations on the diversity and plant structure and soil chemistry, in coal extraction sites in Enciso Santander*

Author(s): Jhon Alexander Calderon Correa, Silvia Alejandra Corzo León**

Key Words: Tropical dry forest, environmental contamination, underground mining, correlations, pH, soils.

Description:

The tropical dry forest (bs-T) in Colombia is a fragile ecosystem, due to fragmentation due to forest fires, agricultural expansion, livestock and mining; degraded this ecosystem. The degree project was carried out in the coal zone of the municipality of Enciso Santander, with an area of 38 ha, with the aim of studying the structure and diversity of the vegetation with the chemical composition of the soil. Nine temporary circular plots of 500 m² were established; soil sampling was distributed in three parts: high, medium and low. The Simpson index for poles presents diversity from medium to high with an average value of 0.70 and for poles the diversity is medium to low with 0.47, in addition, the mixing coefficient indicated for poles and poles that the forest is homogeneous. The species with the highest ecological weight (IVI) in latizales were: *Zanthoxylum rhoifolium* with 16.76% and *Acacia* sp. 1 with 11.64 and for *Acacia* sp. 1 and *Haematoxylum brasiletto* with 22.85% and 13.88%, respectively. On the other hand, the pH registered for the upper and lower parts was 6.28 and 6.56, respectively, and the middle part was 5.6 moderately acid. Likewise, the upper part presented a low content of organic matter (OM) with a value of 2.33 g/100g. The three parts showed low concentrations of phosphorus (P), manganese (Mn) and high concentrations of calcium (Ca). Finally, the OM presented an inverse relationship with the density of individuals, due to the fact that the soils of the bs-T are easily eroded due to the slope and low humidity, on the other hand, the Cd toxicity reduces the growth, the photosynthetic activity, the chlorophyll content also interferes with the entry and transport of nutrients.

* * Degree Work

**Institute for Regional Projection and Distance Education IPRED. Forest Engineering Program. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia. MSc Conservation and Sustainable Use of Forest Systems. Codirector: Diego Suescún Carvajal. MSc Forests and Environmental Conservation.

Introducción

La minería es una de las prácticas más antiguas, consistiendo en la obtención selectiva de minerales y otros materiales (Delgado, 2006). La producción de energéticos y combustibles, ha llevado a que la explotación del carbón se incremente notoriamente en las últimas décadas, debido a la viabilidad económica del mercado. En la actualidad, Colombia posee una abundancia de recursos naturales que debería ser la base de su productividad y especialización para el comercio internacional. La minería en el país está considerada como una de las actividades económicas con mayor crecimiento y desarrollo en los últimos años; se estima, que el país posee 9.600 títulos mineros que ocupan laboralmente entre 100.000 y 200.000 personas, siendo el 70% de estos títulos ilegales (Suárez et al., 2012). Esta tendencia económica y minera demuestra que existen particularidades dentro del uso y comercio de la minería en los distintos departamentos, que afectan directamente el desarrollo económico.

En departamentos como Santander, la economía se desarrolla desde distintas actividades; su principal fuente económica es la agricultura, seguida del sector industrial y la minería de tradición. En la vereda Quebrada de Vera de Enciso Santander se ha intensificado la exploración y explotación de recursos minerales como el carbón, generando conflictos ambientales y de uso del suelo como la remoción de las capas superficiales, pérdida de capas vegetales sobre las formaciones rocosas, erosión e inestabilidad en taludes y procesos de separación de las rocas; biológicamente el principal impacto es sobre los bosques naturales debido a la deforestación, lo cual ocasiona la pérdida de recursos, especies animales y vegetales (Manrique y Vega, 2020). La pérdida de bosque seco tropical (bs-T), obedece a que soporta largas temporadas de sequía (Moncada et al., 2021), y en los últimos años, la fragmentación ha dejado susceptibles estos

ecosistemas considerados de los más estratégicos y amenazados del país (Pizano y García, 2014); además los cuerpos de agua se ven afectados por los vertimientos de residuos industriales relacionados especialmente con la actividad minera (Fernández et al., 2018). Los bs-T aportan una amplia gama de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento: frutos, maderas, fibras, plantas ornamentales y toda una serie de compuestos químicos secundarios como resinas, alcaloides, aceites esenciales, látex y fármacos; Captura y almacenamiento de dióxido de carbono para la amortiguación del cambio climático global; Protección de los suelos contra la erosión y la desertificación; la absorción, almacenamiento y liberación de agua lluvia y freática, el reciclamiento de nutrientes, la regulación del clima, el amortiguamiento de la intensidad del viento y del ruido, entre otros (Balvanera, 2012).

En la zona de estudio esta problemática, no se refleja únicamente en la parte ambiental, sino también en los cambios sociales que ha sufrido la población rural, debido a la baja producción de los suelos y la escasa oportunidad laboral, lo que trae consigo conflictos poblacionales por el uso del suelo, generando un entorno menos sostenible.

El presente estudio analiza la estructura y diversidad de la vegetación del bs-T y la composición química del suelo, con el fin de dar a conocer las afectaciones que se presentan por la minería de carbón y sus procesos de extracción, dado que esta actividad no es sostenible con el medio ambiente y la comunidad, ya que, genera grandes afectaciones de manera directa o indirecta, disminuyendo la flora y fauna, generando cambios en la estructura del suelo y el paisaje, así como problemas de salubridad en la población (Castro et al., 2015).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Estudiar la estructura y diversidad de la vegetación con la composición química del suelo, en una zona de extracción de carbón en el municipio de Enciso Santander.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar la diversidad, composición florística y estructura de la vegetación del bs-T en la zona de extracción de carbón en el municipio de Enciso Santander.

Conocer la composición química de los suelos y la presencia de Cd, en una zona de influencia de extracción de carbón en el municipio de Enciso Santander.

Correlacionar las variables estructurales del bosque seco con la composición química del suelo, en la zona de extracción de carbón de Enciso Santander.

3. Marco referencial

3.1 Marco histórico

Los gobiernos de la colonia trajeron la legislación minera que regía en España desde la Edad Media y la impusieron a la actividad minera de estos territorios (Monte et al., 2014); a fines del siglo XVIII, Carlos III envió expertos extractores alemanes a buscar más plata y más oro. Durante casi todo el siglo XIX el oro fue el principal producto de exportación y permitió equilibrar la vacilante balanza de comercio, este metal, además, de la plata y el platino, atrajeron casi desde el comienzo de la República a inversionistas extranjeros que trajeron capital y tecnología (Ronderos, 2011).

En los primeros años del siglo XX, los metales preciosos fueron los únicos productos de la minería nacional; en los años 1910, 1912 comenzó a extraerse hulla, para impulsar las primeras locomotoras de vapor, en 1920 comenzó a perforarse en Barrancabermeja para producir petróleo. En 1930 y 1937 aparecieron las dos primeras cementeras que iniciaron la explotación de yacimientos de calizas. Entonces, en la economía colombiana la minería había perdido su tradicional importancia, al haber sido muy superada por la industria manufacturera, la agricultura, la ganadería y demás sectores (Ortega et al., 2019).

A mediados de los años ochenta comenzó la exportación en grande de carbón de El Cerrejón, aunque, esto ha traído nueva vida al sector minero, su importancia relativa hoy es modesta en el marco de la economía nacional. Pese a todo, el carbón, el cobre, el petróleo, el gas natural y el mismo oro siguen ofreciendo un gran potencial de riqueza para el país, mediante la utilización de diferentes técnicas y estrategias que permiten el buen uso y aprovechamiento de estos (Viloria, 1998).

3.2 Marco teórico

3.2.1 Minería de carbón

El carbón es considerado como la fuente de energía contaminante en todas sus etapas, es decir, en el transporte, almacenamiento, preparación y transformación (Delgado, 2006). Existe suficiente evidencia de los impactos derivados de esta, siendo el punto de mayor preocupación la generación de partículas, donde, luego de un período considerable de tiempo de exposición por inhalación causa patologías pulmonares y afectaciones ambientales como la desertización, modificación del relieve, alteración de la dinámica de procesos de ladera, desestabilización por excavaciones, alteraciones en propiedades físicas y químicas del suelo (Mamurekli, 2010).

Durante la extracción y transporte de carbón se genera material particulado, cuya toxicidad depende del tamaño, naturaleza química, presencia de metales/metaloides y trazas, entre los cuales, son comunes el plomo, cadmio, níquel, mercurio y arsénico, Las partículas de carbón, dependiendo del tamaño tienen la capacidad de suspenderse y dispersarse en el aire (Suárez et al., 2012).

En Colombia, la situación de la minería como factor que impacta la salud de las personas ha sido muy poco documentada, al igual que territorios o países en vía de desarrollo (Verbel, 2010). La alteración del ecosistema obedece en parte al incumplimiento normativo ambiental referente a los permisos exigidos para dicha actividad, como la captación del recurso hídrico, emisión de gases, partículas suspendidas en el aire y lixiviados, vertimiento de sustancias y depósito de material residual y escombreras, así, como los monitoreos de los impactos ocasionados.

3.2.2 Relación suelo-planta

El interés en estudios de la relación suelo-planta para la fitorremediación, la fitoextracción, la fitominería y la prospección de minerales va en aumento. También, el estudio de análisis bioquímico de las plantas, para detectar mineralización en manto superficial del suelo. La composición de iones metálicos en la vegetación refleja la disponibilidad de elementos en la vecindad del sistema radicular y la capacidad de la absorción y acumulación de estos elementos (Naseem et al., 2009).

Las plantas son componentes de transferencia entre ambientes abióticos (aire, agua y suelo) hasta bióticos. Elementos de contaminación para los suelos y vegetación pueden ser: arsénico As, cadmio Cd, mercurio Hg y plomo Pb de la cadena alimentaria en fauna y vegetación. Mientras que, alta concentraciones de Cu, Cr, Ni, Zn producen toxicidad a las plantas y fauna (Chojnacka et al., 2005).

La biodisponibilidad de los elementos químicos para las plantas está controlada por el genotipo de la planta, condiciones climáticas y el manejo silvicultural y agronómico, que incluyen: procesos de transferencia activa/pasiva, secuestro y especiación, estados redox, el tipo de sistema radicular de la planta y la respuesta de las plantas a elementos en relación con los ciclos estacionales (Lora, 2001).

En áreas contaminadas, la presencia de elementos tóxicos en el suelo está definida por el contenido permisible de estos elementos en las plantas de consumo. Casos de referencia como en Polonia, los contenidos críticos de oligoelementos fueron evaluados por el Instituto de Protección Vegetal en Poznań, Polonia, regulando la aplicabilidad agrícola de las plantas utilizadas como alimento (Cd 0,15, Zn 50, Pb, 1,0, Ni 10, As 0,20 mg/kg) y (Cd 0,5, Zn 100, Pb, 10, Ni 25, como 0,20 mg/kg) (Cruz et al., 2004).

3.2.3 Respuesta de las plantas a la contaminación por metales pesados

La heterogeneidad química de los metales pesados y los distintos grados de afinidad en relación con los ligandos con oxígeno (elementos de la "clase A"), con N o S (elementos de la "clase B") o con ambos (elemento de la clase "borderline") explica las funciones y acciones biológicas tan dispares de estos elementos e incluso la diversificación entre elementos esenciales y no esenciales para las plantas (Barceló y Poschenrieder, 1992).

En la diversidad de concentraciones, referida a algunos elementos metálicos, en el sistema suelo/planta afecta tanto al tipo de suelo (metalífero o no) como a las concentraciones respectivas en suelo y en planta (parte aérea) normal o sometida a concentración crítica tóxica. El tipo y composición del suelo, las características de las sustancias orgánicas e inorgánicas y su poder quelante, el valor y márgenes de pH, el estrato redox y la especiación química, así, como las interacciones suelo/planta de la rizosfera ocupan un lugar central en las relaciones de disponibilidad, toxicidad y respuestas de las plantas al estrés por metales (Méndez et al., 2009).

La fitotoxicidad por metales pesados se refleja en el crecimiento de la planta. Evidente, para raíces, clorosis y necrosis en hojas y luego síntomas típicos de senescencia y abscisión. La reducción del crecimiento radicular se causa porque las membranas y la pared celular son potencialmente el blanco de acción inicial en las propiedades de semipermeabilidad y de transporte, y de extensibilidad y crecimiento, se comprende la multiplicidad de procesos fisiológicos que secundariamente se verán modificados (García et al., 2002).

En el caso de los metales pesados la toxicidad, que normalmente se inicia en la raíz y que en concentraciones más bajas suele alcanzar a las hojas, se atenúa por mecanismos de

compartimentación extracelular o extra citosólica o por mecanismos de secuestro e inactivación en el propio citosol (Barceló y Poschenrieder, 1992).

3.2.4 Diversidad y estructura vegetal

La diversidad se define como el número de especies (riqueza) presentes en un área determinada, con respecto a la abundancia relativa de cada especie, ésta es compleja y se puede diferenciar en diversidad biológica, genética y taxonómica. Las características ambientales como la cantidad de luz y disponibilidad recursos, son factores por los que las plantas compiten y desarrollan estrategias de vida y definen su capacidad productiva, así, las especies que aprovechan gran parte de estos recursos tienen gran valor de importancia para un ecosistema, (Whittaker, 1972).

Existen tres tipos de diversidad a saber: diversidad alfa; la cual se define como la riqueza de especies presentes en un área estándar, diversidad beta; es el cambio o remplazo en la composición de especies entre dos ecosistemas y la diversidad gamma; esta última está presente en una unidad de paisaje más grande (Casanoves et al., 2011).

Para medir la diversidad alfa, se deben medir dos aspectos, la riqueza de especies en el área y las medidas dependiente, de estas medidas el índice de Simpson expresa dominancia o concentración relativa de sus valores de importancia en las primeras especies, mientras que el índice de Shannon-Wiener expresa la uniformidad relativa o equidad de importancia (Halfpter y Ezcurra, 1992).

Por su parte, se entiende por estructura vertical a los gradientes altitudinales existentes en un bosque, es decir la forma de crecimiento de los organismos y en la estructura horizontal, se miden parámetros como el DAP y área basal para saber el área que ocupa la biomasa; la

composición hace referencia a la riqueza de especies (número de especies), diversidad (número de especies por área) y abundancia relativa de cada especie, además, abarca la identificación taxonómica (familia, género, especie, etc..) de las plantas presentes en un ecosistema. Estos dos aspectos de la diversidad son de gran importancia para conocer el grado de regeneración en un bosque, los recursos disponibles y el estado de sucesión (Manson et al., 2013).

4. Metodología

4.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en la zona carbonífera del municipio de Enciso Santander, ubicada en la vereda Quebrada de Vera, con una extensión aproximada de 38 ha. Se referenciaron e identificaron cuatro minas: San Miguel, La Perla, El Espino y El Rubí; las cuales se ubican en la Figura 1, mientras, en la Tabla 1, se presentan las coordenadas. El área de interés del presente estudio registra pisos térmicos templado (Medina y Aldana, 2019). Por consiguiente, la temperatura media anual, precipitación total anual y humedad relativa media anual, se registran entre 17,5 a 20°C; 1000 a 1500 mm y 65 al 75%, respectivamente (IDEAM, 2010).

Los suelos son jóvenes poco evolucionados, correspondientes a los órdenes Entisoles, Inceptisoles y Andisoles. Además, presentan las siguientes clases agrológicas, III (apto para el establecimiento de cultivos), IV (explotación con pastos) y VII (reforestación y conservación del bosque) (IGAC, 2019).

A nivel de relieve, se ubica en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental. El río Tunebo, nace en la región de páramos del municipio de Carcasí y sirve como límite con el municipio de Enciso, bañando las veredas de Carrizal y Quebrada de vera, además, es conformado por dos ramales de la Quebrada Mínero uno a 3200 m. s. n. m., en tierras de Enciso

y el otro a 3900 m. s. n. m. en lagunas, tierras del Municipio de Carcasí, desciende pasando paralelo al Municipio de Carcasí 200 abajo a 1900 m. s. n. m., uniéndose posteriormente con el otro ramal del minero. Pasando 7 km río debajo de Capitanejo, se encuentra la desembocadura de la Quebrada de Vera, que se conforma por los ríos Servita y Tunebo, los cuales se unen 3 km antes de llegar al Río Chicamocha, denominándose de Vera.

Figura 1

Localización área de estudio.

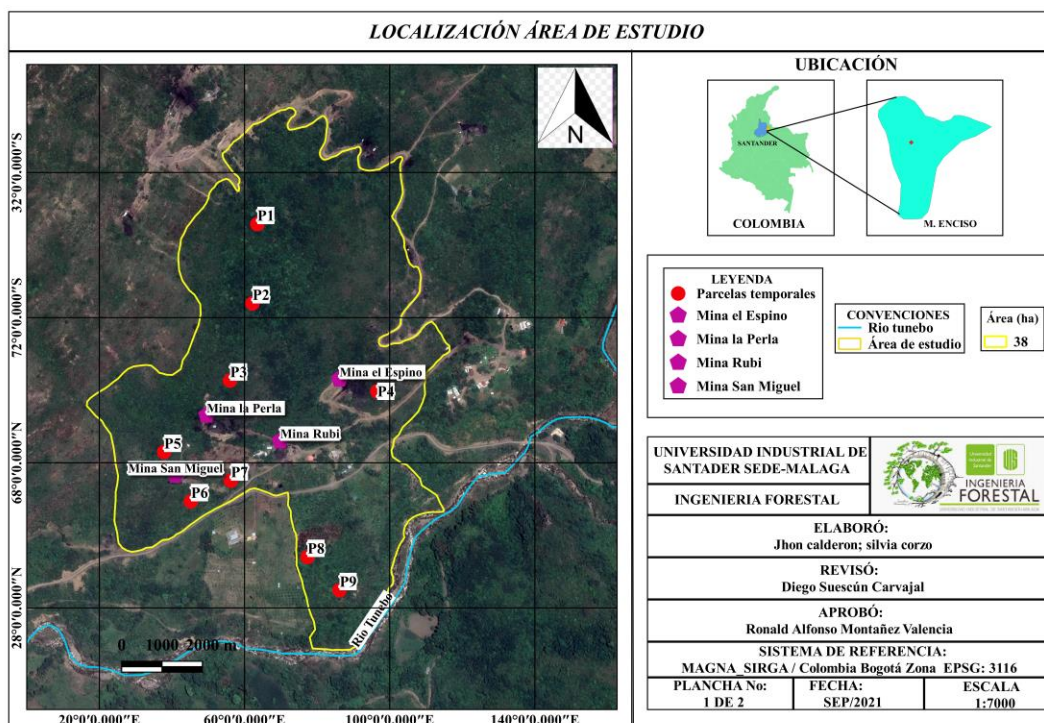


Tabla 1

Ubicación de las minas de carbón.

Ubicación de las minas de carbón			
Minas	Latitud	Longitud	Altitud (m. s. n. m.)
San Miguel	6°36'10,8"	72°41'22,5"	1377
La Perla	6°46'14,6"	72°41'20,5"	1414

Rubí	6°46'13,0"	72°41'15,9"	1385
El Espino	6°36'16,8"	72°41'12,2"	1413

4.2 Composición florística, diversidad y estructura de la vegetación

4.2.1 Ubicación de los sitios de muestreo

Las parcelas se ubicaron en el área de estudio, el cual corresponde a un bs-T (Holdrige, 1987) (Apéndice A). Se establecieron de manera aleatoria nueve parcelas temporales, con distancias de 100 m entre sí. De igual manera, fueron georreferenciadas empleando el equipo GPS map 62s.

4.2.2 Establecimiento de parcelas

Se establecieron nueve parcelas cada una con un área de 500 m² (radio equivalente a 12,62 m) de forma circular. El sistema de coordenadas UTM sirvió como referencia espacial para la captura de coordenadas en el centro de la parcela; y su delimitación consistió en trazar cuatro ejes (radios) empleando cinta métrica y brújula, estableciendo estacas de madera de 30 cm en los extremos de los puntos cardinales de la parcela (McRoberts et al., 1992), (Tabla 2), (Apéndice B).

Tabla 2

Ubicación de las parcelas temporales.

Ubicación de las parcelas temporales			
Parcelas	Latitud	Longitud	Altitud (m. s. n. m.)
P1	6°36'26,6"	72°41'17,3"	1443
P2	6°46'06,9"	72°41'06,9"	1383
P3	6°46'07,1"	72°41'40,3"	1346
P4	6°36'16,1"	72°41'09,8"	1395
P5	6°36'12,3"	72°41'23,2"	1410

P6	6°36'09,2"	72°41'21,5"	1390
P7	6°36'10,5"	72°41'19,0"	1366
P8	6°36'05,7"	72°41'14,2"	1343
P9	6°36'03,6"	72°41'12,2"	1325

4.2.3 Toma de datos – Inventario forestal

La toma de datos se realizó de forma independiente en cada parcela. Las variables dendrométricas medidas en campo fueron: circunferencia a la altura del pecho (CAP) en cm; altura total (H_t) en m, los instrumentos empleados fueron: cinta métrica y pértiga de aluminio. Los datos colectados fueron clasificados en fustales y latizales, teniendo en cuenta diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 10 cm y entre 2,5 y 9,9 cm respectivamente. Se diligenciaron los datos colectados para cada individuo arbóreo según el formato de inventario forestal, (Apéndice C).

4.2.4 Trabajo de herbario

Se recolectaron dos muestras por cada especie no identificada en campo, las muestras se envolvieron en papel periódico y después de unir las todas, se sujetó con una cuerda el paquete en forma de cruz y se depositó en una bolsa transparente, seguidamente se alcoholizó el paquete para su posterior envío. El proceso de identificación consistió, en clasificar a nivel de familia o género. Luego, con la ayuda de claves taxonómicas, guías de flora, herbarios virtuales y preguntas a expertos, se identificaron la mayoría de las muestras a nivel de especies; las muestras que no se lograron identificar a nivel de especie, fueron enumeradas como morfoespecies, (Apéndice D).

4.2.5 Procesamiento de datos

Se procedió a tabular los datos recolectados en campo en el programa Microsoft Excel versión 2016, y posterior estimación de:

4.2.5.1 Número de individuos. Se estimó el número de individuos, mediante la realización de una tabla dinámica en el software Excel 2016 la cual permitió el conteo de las especies presentes en la zona de estudio.

4.2.5.2 Área basal. El cálculo del área basal permitió dar valores del potencial productivo y de tener una idea de la calidad del sitio. Además, es una variable muy útil a la hora de calcular las existencias maderables (Uslar et al., 2004). El área basal por individuo, total por unidad de muestreo y por hectárea se calculó mediante las siguientes fórmulas:

4.2.5.2.1 Área basal por individuo.

$$AB_i = \frac{\pi}{4} * (DAP)^2$$

Donde:

DAP: Diámetro a la altura del pecho en centímetros.

4.2.5.2.2 Área basal total por UM².

$$AB_t/UM = \Sigma (AB_1 \dots AB_n)$$

Donde:

AB₁: AB del árbol No. 1 de la UM.

AB_n: AB del enésimo árbol de la UM.

4.2.5.2.2 Área basal total por hectárea

$$ABt/ha = \frac{\Sigma [(AB UM_1 + \dots + AB UM_n)] * 10000}{\text{Área de cada UM (m}^2\text{)}}$$

Donde:

ABUM₁: AB de los árboles de la Unidad de Muestreo No. 1.

ABUM_n: AB de los árboles de la Unidad de Muestreo ienésima.

n: Número de unidades de muestreo levantadas.

4.2.5.3 Volumen. Se calculó el volumen total por individuo, por unidad de muestreo y por hectárea, mediante las siguientes formulas (Melo y Lizarazo, 2017):

4.2.5.3.1 Volumen total por individuo.

$$VT_i = AB_i * HT * ff$$

Donde:

V_{t_i}: Volumen total del individuo (en m³).

AB_i: Área Basal (en m²) para el individuo.

HT: Altura total en m.

ff: Factor forma igual a 0,7.

4.2.5.3.2 Volumen total por UM.

$$Vt/UM = \Sigma (Vt_1, \dots, Vt_n)$$

Donde:

V_{t₁}: V_t del árbol No. 1 de la UM.

V_{t_n}: V_t del enésimo árbol de la UM.

4.2.5.3.3 Volumen total por hectárea.

$$Vt/ha = \frac{\Sigma [(Vt UM_1 + \dots + Vt UM_n)] * 10000}{\text{Área de cada UM (m}^2\text{)}}$$

Donde:

$V_t UM_1$: V_t de los árboles de la Unidad de Muestreo No. 1.

$V_t UM_n$: V_t de los árboles de la Unidad de Muestreo enésima.

n: Número de unidades de muestreo levantadas.

4.2.5.4 Densidad. Se calculó la densidad mediante la siguiente fórmula: (Uslar et al., 2004).

$$Di = \frac{ni}{UM}$$

Donde:

ni: el número de individuos por especie.

UM: unidad de muestreo.

4.2.5.5 Abundancia. Se calculó la abundancia absoluta y relativa mediante las siguientes formulas (Cayola et al., 2005):

4.2.5.5.1 Abundancia absoluta.

$$Aa = \Sigma (N_1, \dots, N_n)$$

Donde:

N_1 : Individuo No. 1 de la UMS1.

N_n : Individuo enésimo de la UM 4.

4.2.5.5.2 Abundancia relativa.

$$Ari (\%) = \frac{Aa_{spi}}{(\sum Aa_{sp1} \dots Aa_{spn})} * 100$$

Donde:

Ari (%): Abundancia Relativa de la especie ienésima.

Aa_{sp1}: Abundancia Absoluta de la especie ienésima.

Aa_{sp1}: Abundancia Absoluta de la especie 1.

Aa_{spn}: Abundancia Absoluta de la enésima especie.

4.2.5.6 Frecuencia. Se calculó la frecuencia absoluta y frecuencia relativa, mediante las siguientes formulas (Cayola et al., 2005):

4.2.5.6.1 Frecuencia absoluta.

Fa: Cantidad de UM en las que se presenta cada especie

4.2.5.6.2 Frecuencia relativa.

$$Fr i = \frac{Fa_{spi}}{(\sum Fa_{sp1} \dots Fr_{spn})} * 100$$

Donde:

Fr_i: Abundancia Relativa de la especie ienésima.

Fa_{spi}: Frecuencia Absoluta de la especie ienésima.

Fa_{sp1}: Frecuencia Absoluta de la especie 1.

Fa_{spn}: Frecuencia Absoluta de la especie n.

4.2.5.7 Dominancia. La dominancia absoluta y relativa se determinaron, mediante las siguientes formulas (Cayola et al., 2005):

4.2.5.7.1 Dominancia absoluta.

$$Da = \Sigma (AB1 \dots ABn)$$

Donde:

AB₁: Área Basal del árbol 1 en la UM 1.

AB_n: Área Basal del árbol n en la UM 4.

4.2.5.7.2 Dominancia relativa.

$$Dr_i (\%) = \frac{Da_{spi}}{(\Sigma Da_{sp1} \dots DA_{spn})} * 100$$

Donde:

Dr_i: Dominancia Relativa de la especie ienésima.

Da_{spi}: Dominancia Absoluta de la especie ienésima.

Da_{sp1}: Dominancia Absoluta de la especie 1.

Da_{spn}: Dominancia Absoluta de la especie n.

4.2.5.8 Composición florística. Para la medición de la diversidad alfa, se halló para cada parcela los índices de diversidad alfa y beta, con el fin, de obtener datos para fustales y latizales de las especies. La diversidad alfa, se llevó a cabo calculando los índices de Simpson para dominancia, índice de Shannon-Wiener como índice de equidad, el índice de Margalef para riqueza, así, como el cociente de mezcla como índice de homogeneidad o heterogeneidad del bosque (Moreno, 2001). Además, se obtuvo el número de familias, géneros, morfo especies e individuos por fustales y latizales. Para identificar las especies más importantes registradas, se

calculó el índice de valor de importancia (IVI), el cual tiene en cuenta para cada especie su abundancia, dominancia y frecuencia relativa. Finalmente, con el objetivo de comparar la diversidad entre parcelas y coberturas, se utilizó el índice de Jacard como indicador de beta diversidad.

4.2.5.8.1 Diversidad alfa. Se halló el índice de Simpson el cual sus valores oscilan entre 0 y 1, siendo 1 alta diversidad y 0 baja diversidad (Magurran, 1988). La expresión utilizada fue:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^S ni(ni - 1)}{N(N - 1)}$$

Donde:

D: Diversidad alfa para el índice de Simpson.

S: número de especies

N: número de individuos de todas las especies

ni: número de individuos por cada especie.

Por otro lado, se midió el índice de Shannon-Wiener el cual tiene en cuenta la riqueza de especies y su abundancia (Moreno et al., 2011). La fórmula empleada fue:

$$D' = - \sum_{i=1}^S \frac{ni}{N} \log_2 \left(\frac{ni}{N} \right)$$

Donde:

D: es la diversidad alfa del índice de Shannon.

S: representa el número de especies.

N: representa el número de individuos totales de todas las especies.

n_i : el número de individuos por especie.

También, se halló el índice de Margalef. Supone que hay una relación funcional entre el número de especies y el número total de individuos (Moreno et al., 2011).

$$DMg = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Donde:

S: es igual al número de especies.

N: el número total de individuos.

Por último, se calculó el Cociente de Mezcla, como indicador del grado de homogeneidad o heterogeneidad de las coberturas (Reyes, 2012). Se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$C.M = \frac{S}{N}$$

Donde:

S: Número total de especies.

N: Número total de individuos en el muestreo.

4.2.5.8.2 Diversidad beta. Las similitudes florísticas de las comunidades presentes en la zona de estudio se evaluaron mediante el índice de Jaccard (J), donde el valor más cercano a 1 indica mayor semejanza (Magurran, 1988). Este índice fue definido mediante la ecuación:

$$J_{ij} = C / S1 + S2 - C.$$

Donde:

S1: Número de especies presentes en la zona 1.

S2: Número de especies presentes en la zona 2.

C: Número de especies que están presentes en las dos muestras (Niwattanakul et al., 2013).

4.2.5.1.3 Estructura física. Para el estudio de las características físicas de la vegetación, se determinaron variables estructurales y parámetros descriptivos de la estructura horizontal y vertical de cada cobertura. Para el desarrollo estadístico y gráfico de los datos se utilizó el programa de Excel versión 2016 y en RStudio.

4.3 Criterio de distancia

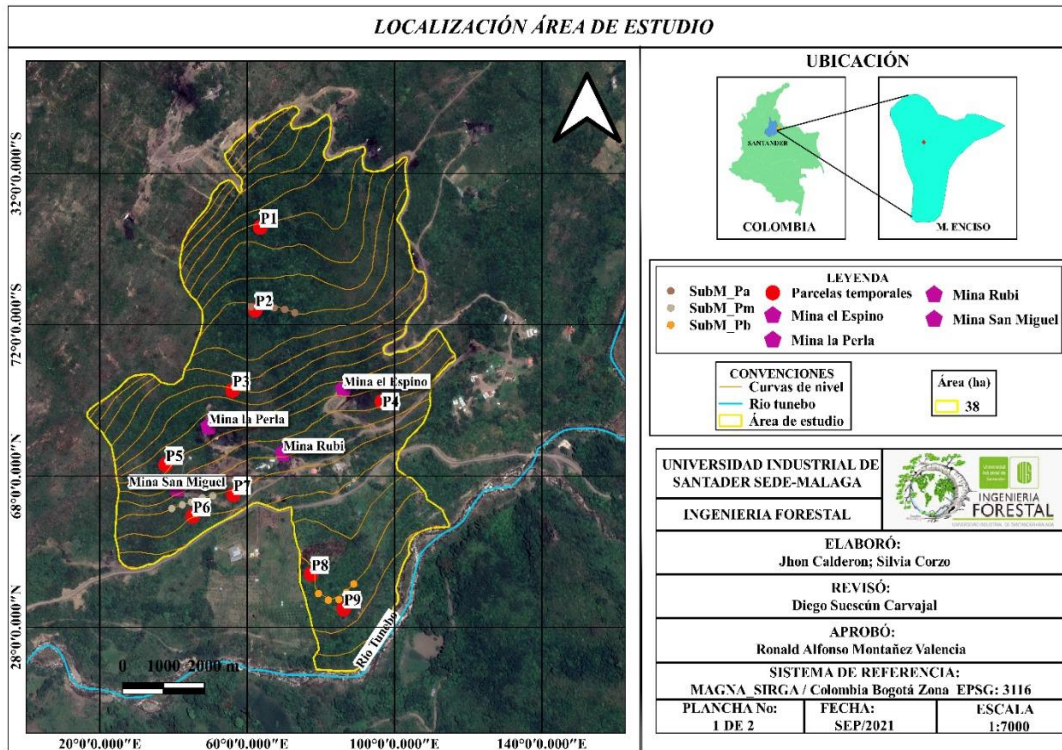
Se estableció el criterio de distancia, parte alta, media y baja, teniendo en cuenta la ubicación de las minas de carbón, relacionando dicha ubicación con la parte media, de esta manera, distancias hacia arriba de la mina hacen referencia a la parte alta y distancia hacia abajo de la mina a la parte baja; para la toma de las muestras de suelos se midieron las distancias desde cada una de las minas a cada una de las parcelas más cercanas respectivamente, obteniendo nueve valores de distancia los cuales se promediaron y se estableció el valor de la curva de nivel donde se recolectó cada muestra de suelos.

4.4 Muestreo de suelos

Se establecieron cinco réplicas para cada una de las distancias de referencia en función de la parte alta, media, baja. Es decir, se tomaron submuestras de suelo cada 20 m según el trazo de la curva de nivel (Figura 2). Se procedió a mezclar las submuestras en un recipiente desinfectado obteniendo así una muestra representativa para cada distancia de referencia para su previo análisis en laboratorio.

Figura 2

Ubicación muestreo suelos.



Nota; SubM_Pa: submuestras parte alta, SubM_Pm: submuestras parte media, SubM_Pb: submuestras parte baja.

4.4.1 Toma de la muestra

La recolección de las muestras se realizó teniendo en cuenta la remoción de piedras, raíces gruesas, hojarasca, lombrices e insectos del suelo (profundidad 1-3 cm) y luego se excavo a una profundidad de 35 cm con similar dimensión para el ancho, empleando la herramienta desinfectada del palín. La submuestra correspondiente a cada replica, se colectó del punto de máxima profundidad. Luego, se colocaron las muestras dentro de un balde limpio. Así pues, se mezclaron las submuestras hasta homogeneizar toda la muestra y obtener una muestra compuesta de 1 kg (AGROSAVIA, 2021) (Apéndice E).

4.4.2 Conservación de la muestra y almacenamiento

Las muestras recolectadas se colocaron en doble bolsa plástica limpia y fueron debidamente etiquetadas como: coordenadas, nombre del sector, nombre de la verdad, municipio, departamento, tipo de análisis, tipo de cobertura, profundidad (Apéndice F). Se mantuvo en su estado original a temperatura ambiente y sin exposición directa al sol, evitando cualquier tipo de contaminación y transformación. Las tres muestras de suelos fueron enviadas al laboratorio de AGROSAVIA ubicado en Mosquera Cundinamarca, con previo diligenciamiento de los formatos: GA-F-84 química de suelos v7, Formato de Modelo de exclusión de IVA de Laboratorios y formato de vinculación.

4.4.3 Procesamiento de las muestras en laboratorio

El procesamiento de las muestras para la identificación de las propiedades química de los suelos de la zona de estudio se llevó a cabo en el laboratorio de AGROSAVIA (2021), mediante la determinación analítica de los siguientes ensayos: pH (GA-R-46 versión 05 de 2019-10-02), fósforo disponible Bray II (GA-R-48, versión 05 de 2019-10-02), conductividad eléctrica en suelos (NTC 5596:2008. Método b. Medición en suspensión suelo/agua en relación 1:5 (peso/volumen)), cationes cambiabiles en suelo: calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02), micronutrientes en suelo por Olsen modificado Hierro, Manganeso, Cobre y Zinc (NTC 5526:2007), determinación de Carbono Orgánico en el suelo (GA-R-119 versión 2 2019-09-20).

4.5 Relación de las variables estructurales y el análisis químico del suelo

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP), donde se tuvo una visión amplia de las relaciones entre las variables de la estructura del bosque (densidad de individuos

(D), altura (H), diámetro a la altura del pecho (DAP), volumen (V), área basal (G)), y los nutrientes del análisis químico del suelo (Borcard et al., 2011).

El coeficiente de correlación de Pearson, se utilizó para medir el grado de covarianza entre distintas variables que se relacionan linealmente. Puede tomar valores entre -1 y 1 indicando que existe una asociación matemática lineal perfecta, positiva o negativa, entre las dos variables y correlaciones iguales a cero, muestran ausencia de asociación (Borcard et al., 2011).

5. Resultados

5.2 Composición florística, diversidad y estructura de la vegetación

En el área de estudio se registró un total de 1271 individuos, clasificados en 112 fustales y 1154 latizales. De lo anterior, se identificaron 22 especies correspondientes a 22 géneros distribuidas en 13 familias (Tablas 3).

Tabla 3

Cantidad de familias, géneros, morfoespecie e individuos para fustal y latizal.

Clase diamétrica	Nº Familias	Nº Géneros	Nº Morfoespecie	Nº individuos
Fustal	9	14	14	112
Latizal	13	22	22	1154

La Tabla 4, muestra la familia Rutaceae, representada por: *Amyris sylvatica*, *Zanthoxylum fagara* y *Zanthoxylum rhoifolium*, seguida de la familia Mimosaceae, representada por: *Acacia farnesiana*, *Acacia sp. 1*, *Gliricidia sepium*, *Haematoxylum brasiletto*, *Mimosa sp. 1*, *Pithecellobium dulce*, *Prosopis juliflora* y Verbenaceae con *Duranta erecta* y *Duranta sp. 1*. De igual manera la clasificación entre fustales y latizales fue representada por nueve y 13 familias, respectivamente.

Los fustales fueron representados por las familias Mimosaceae, Apocynaceae y Acanthaceae, mientras que latizales se tomaron las familias Mimosaceae, Rutaceae y Malvaceae, teniendo como criterio el mayor número de individuos que registra las familias mencionadas anteriormente.

Tabla 4

Familias y morfoespecies identificadas en la zona carbonífera.

N	Familia	Nombre científico
1	Acanthaceae	<i>Trichanthera gigantea</i> Humb. & Bonpl.
2	Apocynaceae	<i>Cascabela thevetia</i> L.
3	Asteraceae	<i>Asteraceae sp. 1</i>
4	Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i> L.
5	Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum oxycarpum</i> O.E.
6	Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.
7	Mimosaceae	<i>Acacia farnesiana</i> L.
8	Mimosaceae	<i>Acacia sp. 1</i>
9	Mimosaceae	<i>Gliricidia sepium</i> Jacq
10	Mimosaceae	<i>Haematoxylum brasiletto</i> H.
11	Mimosaceae	<i>Mimosa sp. 1</i>
12	Mimosaceae	<i>Pithecellobium dulce</i> Roxb.
13	Mimosaceae	<i>Prosopis juliflora</i> L.
14	Euphorbiaceae	<i>Croton sp. 1</i>
15	Moraceae	<i>Maclura tinctoria</i> L.
16	Polygonaceae	<i>Coccoloba lehmannii</i> Lindau
17	Rutaceae	<i>Amyris sylvatica</i> Jacq
18	Rutaceae	<i>Zanthoxylum fagara</i> L.
19	Rutaceae	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.
20	Urticaceae	<i>Urera sp. 1</i>
21	Verbenaceae	<i>Duranta erecta</i> L.
22	Verbenaceae	<i>Duranta sp. 1</i>

La Tabla 5, muestra las familias más representativas en número de especies para la parte alta fueron Mimosaceae (4), Rutaceae (3), Verbenaceae (2), en la parte media las familias fueron

Mimosaceae (4), Rutaceae (2), Verbenaceae (2) y en la parte baja las familias, Mimosaceae (6) Rutaceae (3) y Verbenaceae (2).

Tabla 5

Número de géneros, morfoespecies e individuos por familia.

Familia	Nº género	Nº morfoespecie	Nº individuos
Rutaceae	3	3	413
Mimosaceae	7	7	367
Verbenaceae	2	2	224
Malvaceae	1	1	99
Apocynaceae	1	1	51
Erythroxylaceae	1	1	39
Acanthaceae	1	1	19
Urticaceae	1	1	18
Burseraceae	1	1	17
Polygonaceae	1	1	16
Asteraceae	1	1	4
Moraceae	1	1	3
Euphorbiaceae	1	1	1
Total			1271

5.2.1 Índices de diversidad alfa

En el índice de Simpson para la categoría de latizales presentó diversidad media con un valor promedio de 0,70 y la categoría de fustales presentó baja diversidad con un valor de 0,47. Para el índice de Shannon-Wiener y Margalef se observan valores menores a dos, indicando baja diversidad. En general, el bosque indicó ser muy homogéneo según el cociente de mezcla (Tabla 6).

Tabla 6

Valores de índices de diversidad alfa para fustal y latizal en zona carbonífera.

	Índice de dominancia	Índice de Equidad	Riqueza Especifica	Heterogeneidad
--	-----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------

Categoría	Parcela	Parte	Simpson	Shannon-Wiener	Margalef	CM
Fustal	1	Alta	0,50	0,95	0,98	0,19
	2	Alta	0,13	0,25	0,37	0,14
	3	Alta	0,66	1,20	1,17	0,31
	4	Media	0,00	0,00	0,00	0,09
	5	Media	0,59	0,97	0,91	0,33
	6	Media	0,75	1,50	1,56	0,38
	7	Baja	0,47	0,66	0,48	0,25
	8	Baja	0,50	1,04	1,36	0,26
	9	Baja	0,62	1,04	1,44	0,75
Promedio			0,47 (+/- 0,25)	0,85 (+/- 0,47)	0,92 (+/- 0,53)	0,30 (+/- 0,19)
Latizal	1	Alta	0,66	1,40	1,91	0,06
	2	Alta	0,61	1,20	1,10	0,03
	3	Alta	0,82	1,99	1,98	0,07
	4	Media	0,18	0,43	0,68	0,05
	5	Media	0,89	2,28	1,95	0,06
	6	Media	0,80	1,88	2,18	0,16
	7	Baja	0,85	1,90	1,63	0,18
	8	Baja	0,62	1,31	1,87	0,08
	9	Baja	0,85	2,06	2,13	0,10
Promedio			0,70 (+/- 0,22)	1,61 (+/- 0,58)	1,71 (+/- 0,50)	0,09 (+/- 0,05)

En cuanto, a los índices de diversidad alfa por parte (alta, media y baja) según la categoría de fustales; el índice de Simpson presenta diversidad baja en las tres partes con valores promedio entre 0,43 a 0,53; así mismo, el índice de Shannon-Wiener y Margalef arrojaron baja diversidad con valores promedios entre 0,80 a 1,09 en las tres partes (Tabla 7). El Cociente de mezcla para las tres partes arrojó poca mezcla, es decir, bosque homogéneo.

Tabla 7

Valores de índices de diversidad alfa para categoría fustal en tres distancias de referencia.

Índice de dominancia	Índice de Equidad	Riqueza Específica	Heterogeneidad
----------------------	-------------------	--------------------	----------------

Categoría	Parcela	Parte	Simpson	Shannon-Wiener	Margalef	CM
Fustal	1	Alta	0,50	0,95	0,98	0,19
	2	Alta	0,13	0,25	0,37	0,14
	3	Alta	0,66	1,20	1,17	0,31
	Promedio		0,43 (+/- 0,27)	0,80 (+/- 0,49)	0,84 (+/- 0,42)	0,21 (+/- 0,09)
	4	Media	0,00	0,00	0,00	0,09
	5	Media	0,59	0,97	0,91	0,33
	6	Media	0,75	1,50	1,56	0,38
	Promedio		0,45 (+/- 0,40)	0,82 (+/- 0,79)	0,82 (+/- 0,78)	0,27 (+/- 0,16)
	7	Baja	0,47	0,66	0,48	0,25
	8	Baja	0,50	1,04	1,36	0,26
	9	Baja	0,62	1,04	1,44	0,75
	Promedio		0,53 (+/- 0,08)	0,91 (+/- 0,22)	1,09 (+/- 0,53)	0,42 (+/- 0,29)

En cuanto, a los índices de diversidad alfa por parte (alta, media y baja) según la categoría de latizales; el índice de Simpson presenta baja diversidad en la parte media con un promedio de 0,62, además, para la parte alta indica diversidad media con 0,70 y la parte baja presenta una alta diversidad con 0,77; así mismo, el índice de Shannon Wiener y Margalef arrojó diversidad baja con valores promedios entre 1,53 a 1,88 en las tres partes (Tabla 8). El Cociente de mezcla para las tres partes arrojó poca mezcla, es decir, bosque homogéneo.

Tabla 8

Valores de índices de diversidad alfa para categoría latizal en tres distancias de referencia.

Categoría	Parcela	Parte	Índice de dominancia Simpson	Índice de Equidad Shannon-Wiener	Riqueza Específica Margalef	Heterogeneidad CM
Latizal	1	Alta	0,66	1,40	1,91	0,06
	2	Alta	0,61	1,20	1,10	0,03
	3	Alta	0,82	1,99	1,98	0,07
	Promedio		0,70 (+/- 0,11)	1,53 (+/- 0,41)	1,66 (+/- 0,49)	0,05 (+/- 0,02)
	4	Media	0,18	0,43	0,68	0,05
	5	Media	0,89	2,28	1,95	0,06
	6	Media	0,80	1,88	2,18	0,16

Promedio		0,62 (+/- 0,39)	1,53 (+/- 0,97)	1,60 (+/- 0,81)	0,09 (+/- 0,06)
7	Baja	0,85	1,90	1,63	0,18
8	Baja	0,62	1,31	1,87	0,08
9	Baja	0,85	2,06	2,13	0,10
Promedio		0,77 (+/- 0,13)	1,79 (+/- 0,40)	1,88 (+/- 0,25)	0,12 (+/- 0,05)

5.2.2 Índice de diversidad beta

El índice de Jaccard, en la primera intersección presenta alta diversidad para fustales y latizales, mientras que, la segunda y tercera, arrojaron alta diversidad de fustales y moderada diversidad en latizales (Tabla 9).

Tabla 9

Beta diversidad, índice de Jaccard.

Índice de Jaccard				
Categoría	Intersección	Colina \cap Ladera	Colina \cap Terraza	Ladera \cap Terraza
Fustal	Número de especies	1	2	1
	Cj	0,10	0,22	0,09
Latizal	Número de especies	7	9	10
	Cj	0,39	0,47	0,53

5.2.3 Estructura horizontal

5.2.3.1 DAP Medio. En la Tabla 10, el DAP medio para la categoría de fustales fue de 14,43 cm, siendo la parcela siete la de mayor diámetro promedio con 19,67 cm y la parcela cuatro obtuvo el menor DAP promedio con 11,64 cm. En la categoría de latizales el promedio para todas las parcelas fue de 4,75 cm, el mayor diámetro se encontró en la parcela cuatro con un valor de 5,63 cm, seguido de la parcela dos con un valor de 5,03 cm.

Tabla 10

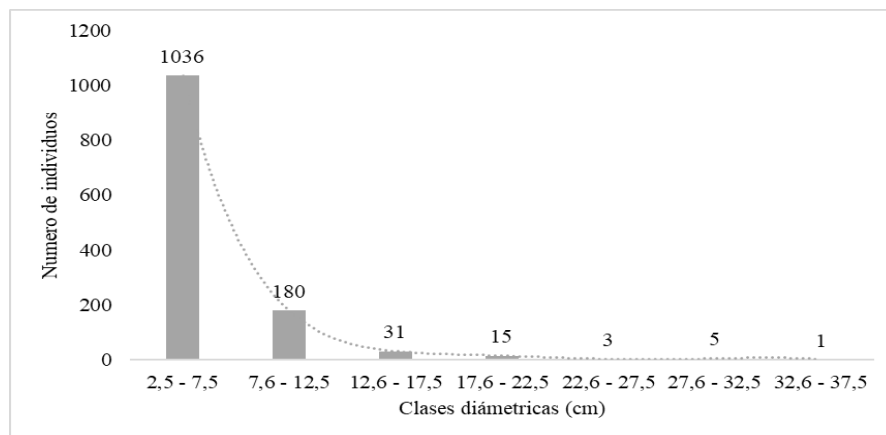
DAP medio para cada parcela en la categoría fustal y latizal.

Parcela	DAP medio fustal (cm)	DAP medio latizal (cm)
1	12,39	4,57
2	11,99	5,03
3	12,34	4,55
4	11,64	5,63
5	14,91	4,77
6	18,23	4,40
7	19,67	4,75
8	16,69	4,73
9	11,99	4,32
DAP medio total	14,43 (+/-3,07)	4,75 (+/-0,39)

5.2.3.2 Distribución de clases diamétricas. La tendencia de la curva en J invertida, indica que la comunidad estudiada presenta buena regeneración, una vez que existe una alta concentración de individuos en las clases menores con reducción acentuada para las clases mayores, también señala que la comunidad vegetal se encuentra en coherente proceso de desarrollo en dirección a etapas de crecimiento y productividad vegetal (Figura 3).

Figura 3

Diagrama de distribución de clases diamétricas por número de individuos.



5.2.3.2 Área basal. El área basal para fustales arrojó un valor total de 4,61 m²/ha y para latizales de 5,21 m²/ha, esto debido a que en la categoría latizal la especie *Zanthoxylum rhoifolium*, es la que presenta mayor peso ecológico, sin embargo, no hay una diferencia significativa respecto a los fustales, dado que, en esta categoría se presentan especies con mayores diámetros, (Tabla 11).

Tabla 11

Área basal para la categoría de fustal y latizal.

Parcela	Fustales		Latizales	
	Área basal total (ABt/UM) (m ²)	Área basal total (ABt/ha) (m ²)	Área basal total (ABt/UM) (m ²)	Área basal total (ABt/ha) (m ²)
1	0,27	5,32	0,35	6,94
2	0,16	3,20	0,51	10,28
3	0,16	3,28	0,29	5,90
4	0,12	2,38	0,23	4,54
5	0,17	3,30	0,35	7,01
6	0,40	8,03	0,11	2,20
7	0,27	5,34	0,08	1,58
8	0,49	9,74	0,24	4,79
9	0,05	0,92	0,18	3,65
Área basal total	2,08	4,61	2,34	5,21

5.2.3.3 Densidad. Como se muestra en la Tabla 12, en la categoría de fustales la parcela que presentó el mayor valor es la uno con 0,84 m²/ha y en la categoría de latizales, la parcela número dos con un valor de 9,04 m²/ha.

Tabla 12

Densidad para cada unidad de muestreo de fustal y latizal.

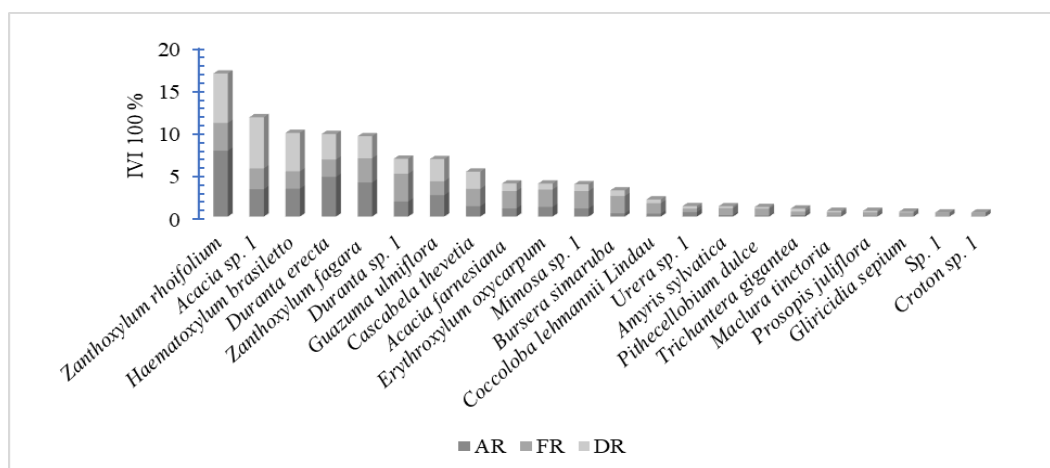
Parcela	Fustales		Latizales	
	Densidad (Dtí) (m ²)	Densidad (Dt/ha) (m ²)	Densidad (Dtí) (m ²)	Densidad (Dt/ha) (m ²)
1	0,04	0,84	0,37	7,48

2	0,03	0,56	0,45	9,04
3	0,03	0,52	0,31	6,24
4	0,02	0,44	0,16	3,24
5	0,02	0,36	0,34	6,80
6	0,03	0,52	0,12	2,48
7	0,02	0,32	0,08	1,60
8	0,04	0,76	0,24	4,88
9	0,01	0,16	0,22	4,40
Densidad total	0,22	4,48	2,31	46,16

5.2.3.4 Índice de valor de importancia para latizales y fustales. El Índice de Valor de Importancia (IVI) para la categoría de latizales, arrojó que las especies más importantes son el *Zanthoxylum rhoifolium* con 16,76% y *Acacia sp. 1* con 11,64%. Las especies de menor importancia fueron *Asteraceae sp. 1* y *Croton sp. 1* con un valor de 0,47%. Además, se observó que en la categoría de latizales hay más números de especies que en la de fustales (Figura 4).

Figura 4

Índice de valor de importancia (IVI), latizales.

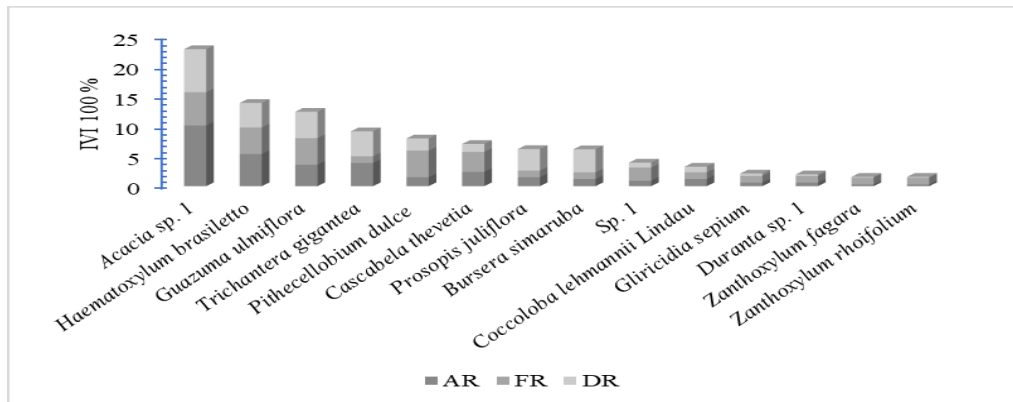


Para el índice valor de importancia (IVI), la categoría de fustales se tiene que la especies *Acacia sp. 1* y *Haematoxylum brasiletto* presentan mayor importancia con valores de 22,85 y

13,88% respectivamente, mientras que las especies de menor importancia fueron *Zanthoxylum rhoifolium* y *Zanthoxylum fagara* con un valor 1,56% cada una (Figura 5).

Figura 5

Índice de valor de importancia (IVI), fustales.

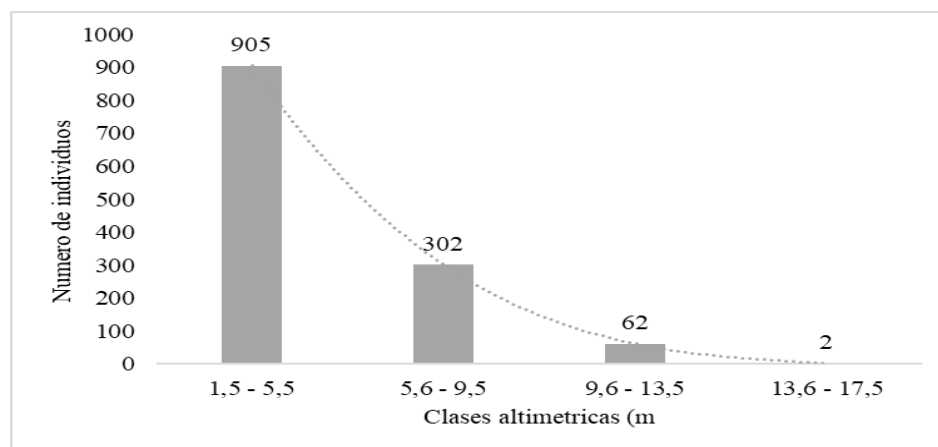


5.2.4 Estructura vertical

En la Figura 6, se observa un mayor número de especies entre 1,5 y 5,5 m de altura. Seguidamente, la gráfica presenta un decrecimiento en el número de especies conforme aumenta la altura, con individuos que van desde 13,6 a 17,5 m de altura.

Figura 6

Diagrama de distribución de árboles respecto a su altura.



5.2.4.1 Altura media. Se observa un promedio en altura de 7,77 m para la categoría de fustales y un promedio de 4,43 m para la categoría de latizales. La mayor altura se obtuvo en la parcela ocho para fustal y en la parcela dos para latizal (Tabla 13).

Tabla 13

Altura media para cada unidad de muestreo, fustal y latizal.

Parcela	Altura media fustal (m)	Altura media latizal (m)
1	8,86	5,39
2	9,96	5,49
3	5,88	4,09
4	4,12	3,57
5	7,98	4,15
6	8,87	3,87
7	6,76	3,75
8	11,38	5,23
9	6,10	4,34
Altura media total	7,77 (+/-2,26)	4,43 (+/-0,74)

5.2.4.1 Volumen. Al analizar los valores de volumen para la categoría de fustales se obtuvo un volumen total de 13,29 m³/UM, siendo, la parcela ocho la de mayor volumen con valor de 3,74 m³/UM y para la categoría de latizales un volumen total de 8,77 m³/UM, siendo, la parcela dos la de mayor volumen con un valor de 2,36 m³/UM (Tabla 14).

Tabla 14

Volumen total para cada unidad de muestreo, fustal y latizal.

Parcela	Fustales		Latizales	
	Volumen total (Vt/UM) (m ³)	Volumen total (Vt/ha) (m ³)	Volumen total (Vt/UM) (m ³)	Volumen total (Vt/ha) (m ³)
1	1,75	35,03	1,47	29,49
2	1,13	22,56	2,36	47,29
3	0,69	13,82	0,95	18,98
4	0,34	6,89	0,60	12,02
5	1,03	20,58	1,17	23,40

6	2,91	58,29	0,34	6,82
7	1,49	29,75	0,22	4,44
8	3,74	74,73	1,00	20,05
9	0,20	4,07	0,65	12,93
Volumen total	13,29	265,71	8,77	175,43

5.3 Análisis químico de suelos

Según el (Instituto Colombiano Agropecuario, 1992), Se categorizaron los resultados del análisis químico de suelo, como alto medio y bajo.

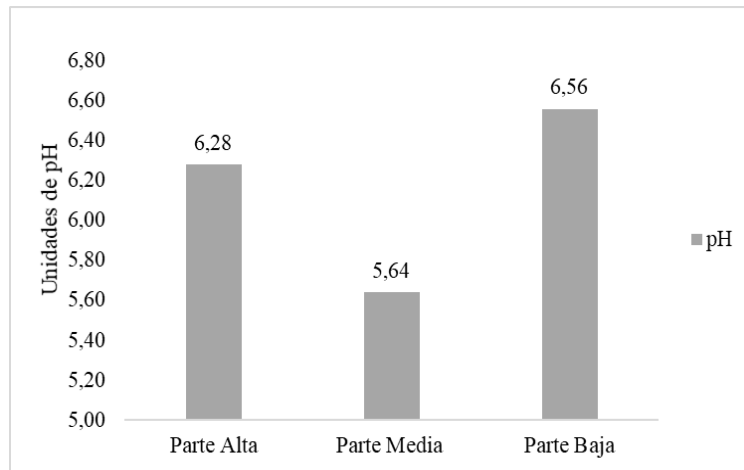
El N, K y P son los nutrientes considerados mayores para las plantas, y junto con Ca, S y Mg son los elementos esenciales abundantes o macroelementos, a los que se suman los oligoelementos: B, Fe, Si, Zn, Mn, Cu, Mo, Co y Cl (Arranz, 2007).

5.3.1 pH del suelo

El pH, para las distancias de referencia de la parte alta y baja arrojaron valores de 6,28 y 6,56 lo que indica un pH ligeramente ácido, es decir, estos sitios presentan suelos con disponibilidad máxima de nutrientes para las plantas y en la parte media suelo con un pH de 5,6 moderadamente ácido (Figura 7).

Figura 7

pH del suelo, para la parte alta, media y baja.

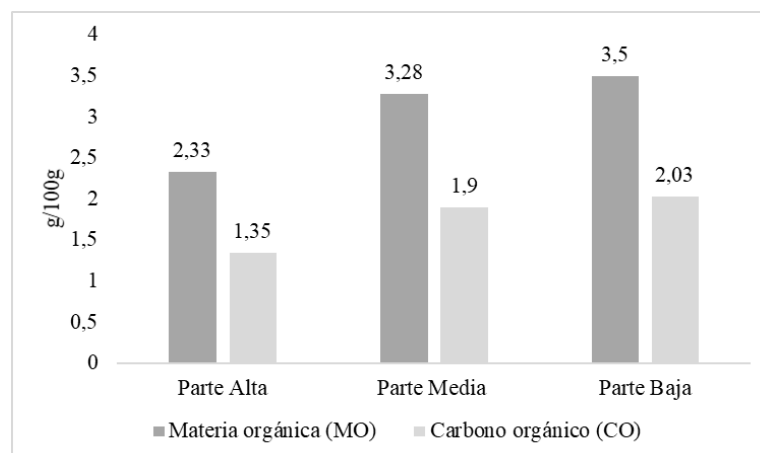


5.3.2 Materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO)

La parte alta presentó bajo contenido de materia orgánica (MO) con un valor de 2,33 g/100g, afectando la disponibilidad de nutrientes. A diferencia, de las zonas media y baja que mostraron concentraciones medias de MO, con valores de 3,28 g/100g y 3,50 g/100g. En cuanto, al carbono orgánico (CO) en la parte baja, se obtuvo un mayor valor (2,03 g/100g) que la parte alta y media (Figura 8).

Figura 8

Materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO) para las distancias de referencia, parte alta, media y baja.

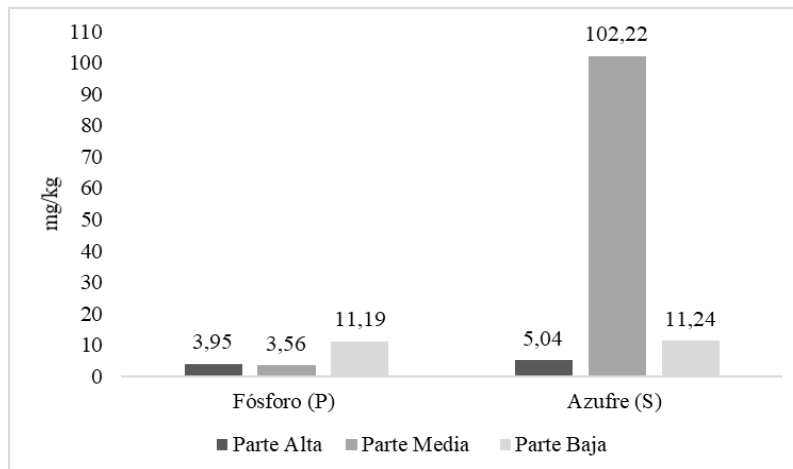


5.3.3 Elementos mayores

5.3.3.1 Fósforo, Azufre (mg/kg). El azufre en la parte media presentó un alto contenido (102,22 mg/kg), indicando toxicidad según, Molina y Meléndez (2002), una concentración media para la parte baja (11,24 mg/kg) y en la parte alta una baja concentración con un valor de 5,04 mg/kg. Las tres distancias de referencia mostraron concentraciones bajas de fósforo con valores de 3,95 mg/kg, 3,59 mg/kg, 11,19 mg/kg, respectivamente para la parte alta, media, baja, (Figura 9).

Figura 9

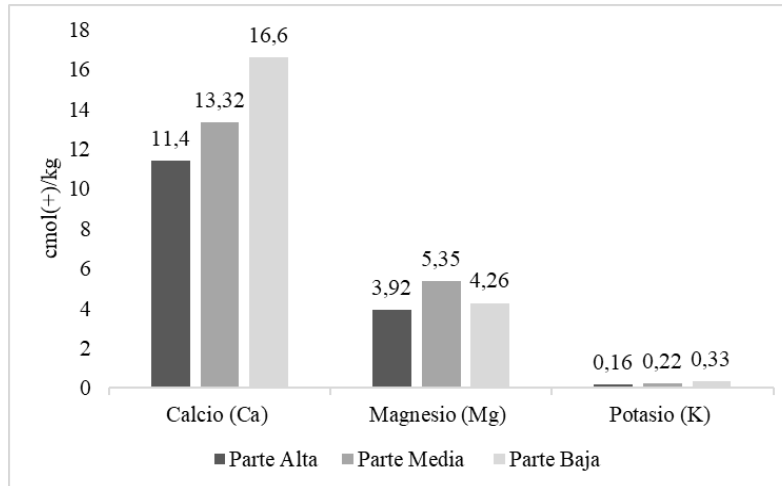
Fósforo, Azufre disponibles (mg/kg).



5.3.3.2 Calcio, Magnesio, Potasio disponibles (cmol(+)/kg). Los suelos en la zona alta, media y baja presentaron altos contenidos de calcio con valores de 11,40, 13,32 y 46,60 cmol(+)/kg, respectivamente. Para el caso del magnesio, en parte alta se obtuvo un valor de 3,92 cmol(+)/kg, en la parte media 5,35 cmol(+)/kg y en la parte baja 4,26 cmol(+)/kg. El potasio para la parte alta presentó una concentración baja con un valor de 0,16 cmol(+)/kg, en la parte media y baja presentaron contenidos medios con valores de 0,22, 0,33 cmol(+)/kg respectivamente (Figura 10).

Figura 10

Calcio, Magnesio, Potasio disponibles (cmol (+) /kg).

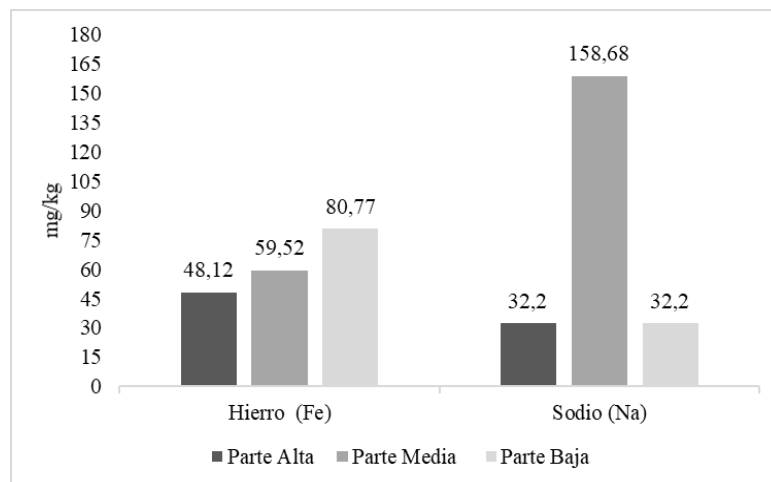


5.3.4 Elementos menores

5.3.4.1 Hierro y sodio disponibles (mg/kg). El hierro para la parte media y baja presentó contenidos altos con valores de 59,52 y 80,77 mg/kg, respectivamente y la parte alta con concentraciones medias con un valor de 48,12 mg/kg. Los suelos presentan valores normales de sodio (Figura 11).

Figura 11

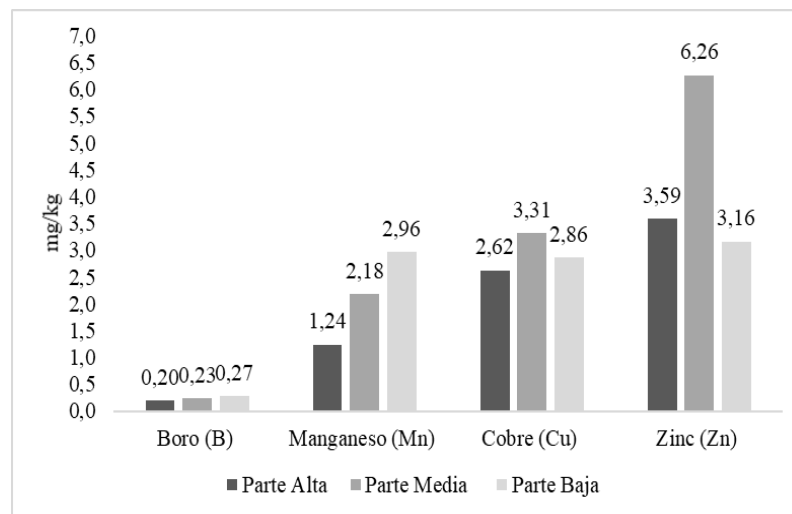
Hierro, sodio y disponibles (mg/kg).



5.3.4.2 Boro, Manganeso, Cobre y Zinc disponibles (mg/kg). El manganeso presentó contenidos bajos en las tres partes alta, media y baja con valores de 1,24, 2,18 y 2,96 mg/kg respectivamente. El zinc presentó altos contenidos siendo, mayor en la parte media con un valor de 6,26 mg/kg. La parte media presentó altas concentraciones de cobre con un valor de 3,31 mg/kg (Figura 12).

Figura 12

Boro, Manganeso, Cobre y Zinc disponibles (mg/kg).

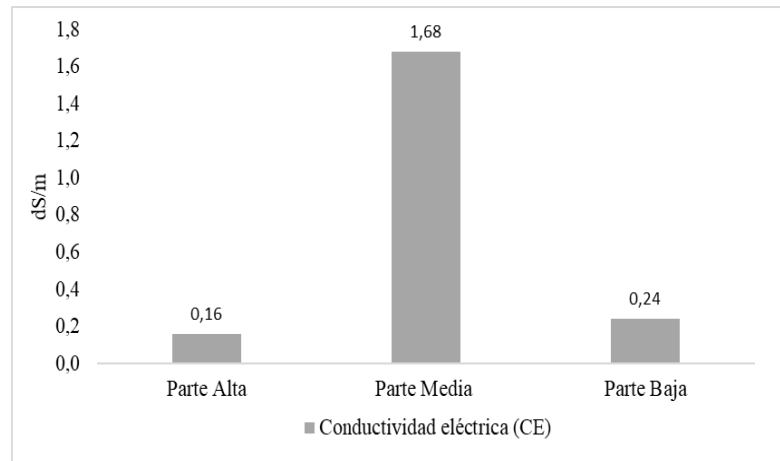


5.3.5 Conductividad eléctrica (CE)

Los suelos presentes en la zona son no salinos con valores para la parte alta, media y baja de 0,16, 1,68 y 0,24 mg/kg, respectivamente (Figura 13).

Figura 13

Conductividad eléctrica (CE).

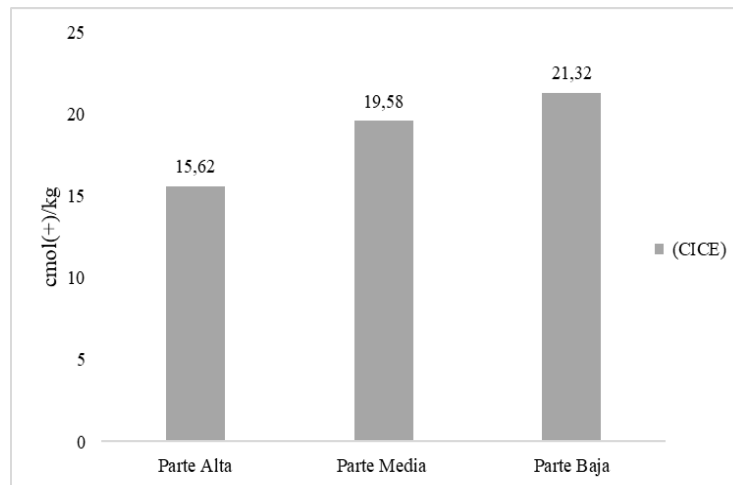


5.3.6 Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)

La parte alta y media presentan media CICE con valores 15,62 y 19,58 cmol (+)/kg, respectivamente, y la parte baja presenta alta CICE con 21,32 cmol(+)/kg (Figura 14).

Figura 14

Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE).



5.3.7 Metal pesado Cadmio (Cd)

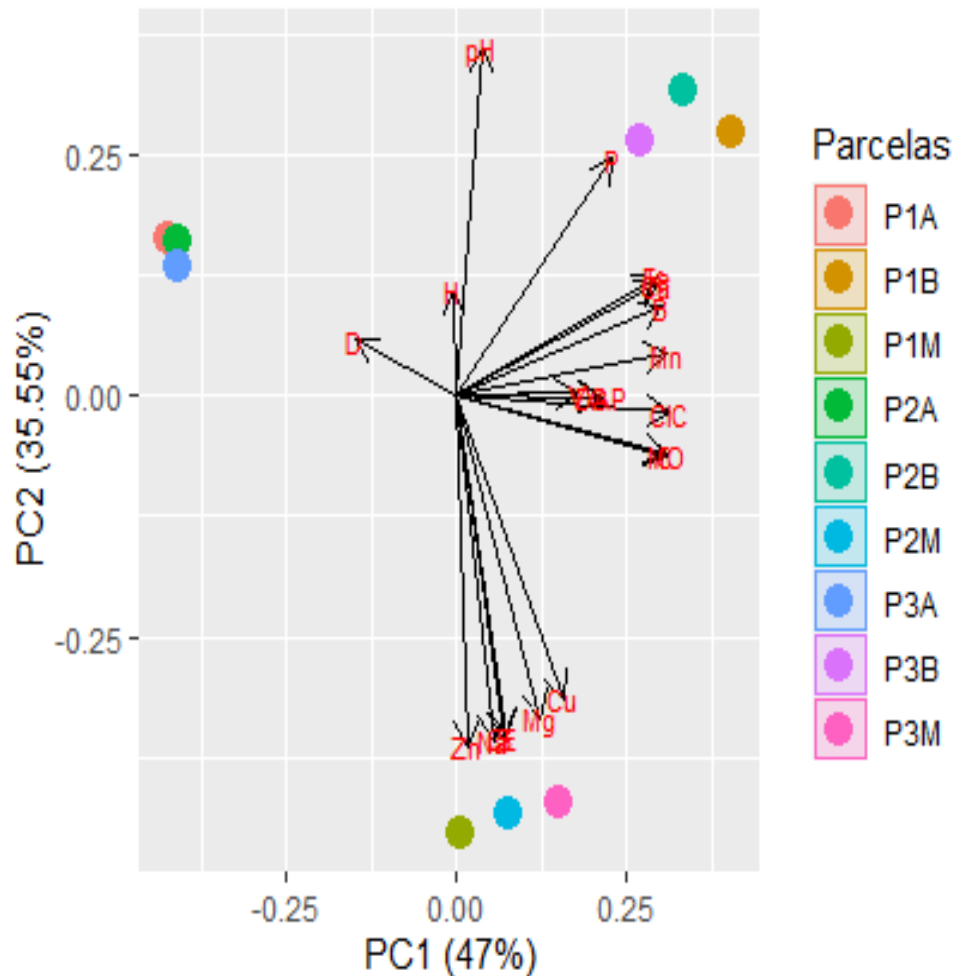
Según el análisis de metal pesado realizado en la parte media de la mina, el Cd, arrojó un valor de 1.38 mg/kg. Según, Orozco (2019), indica que, el límite máximo permisible de Cd disponible para Suelos con $\text{pH} < 7$ es 1 mg/kg y en $\text{pH} > 7$ es 3 mg/kg, por lo cual, se está presentando un exceso de dicho metal en los suelos de la parte media del presente estudio.

5.4 Relación de las variables estructurales del bosque con la composición química del suelo

En la Figura 15, el ACP muestra en sus dos componentes una explicación de la varianza total en 82,5%, el componente PC1 explica el 47% de la misma varianza. Se observa que las variables volumen (V), diámetro a la altura del pecho (DAP), área basal (G), manganeso (Mn), boro (B), calcio (Ca), hierro (Fe), fósforo (P) y pH, aportan a la variación de este componente de forma positiva. Las variables capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), cobre (Cu), magnesio (Mg), conductividad eléctrica (CE), potasio (K), sodio (Na) y zinc (Zn), aportan a la variación de ese componente de forma negativa. El componente PC2 expresa el 35,55%, donde, las variables que más aportan a esta variación de forma positiva son la densidad de individuos (D) y la altura (H).

Figura 15

Análisis de componentes principales (ACP) para fustales.

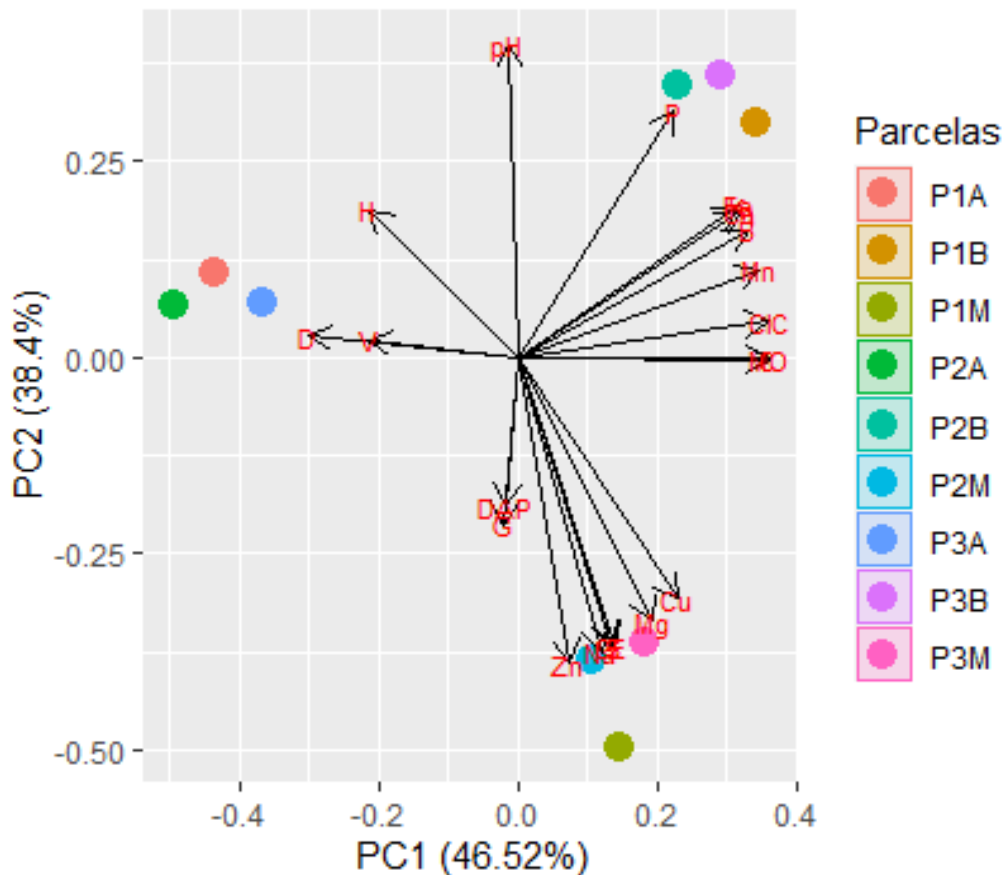


En la Figura 16, el ACP muestra en sus dos componentes una explicación de la varianza total en 84,92%, el componente PC1 explica el 46,52% de la misma varianza. Se observa que las variables capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), boro (B), calcio (Ca), hierro (Fe), fósforo (P) aportan a la variación de este componente de forma positiva. Las variables, cobre (Cu), magnesio (Mg), conductividad eléctrica (CE), potasio (K), sodio (Na) y zinc (Zn), aportan a la variación de ese componente de forma negativa. El componente PC2 expresa el 38,4%, donde, las variables que más aportan a esta variación de

forma positiva son la densidad de individuos (D), volumen (V), altura (H) y pH y de forma negativa el diámetro a la altura del pecho (DAP) y el área basal (G).

Figura 16

Análisis de componentes principales (ACP) para latizales.



Por otra parte, se observa para el ACP de fustales y latizales, que el Ca y el Fe presenta una relación estrecha, al igual que la MO con CO, una relación inversamente proporcional entre D y la MO, H y PH con el Zn, Na, CE, K, Mg y Cu. Además, altas concentraciones de P en la parte bajan y mayor D en la parte alta.

La Tabla 15, muestra el coeficiente de correlación de Pearson para la categoría de fustales, donde, la variable altura de individuos, presenta unas correlaciones positivas, es decir, directamente proporcional al V y D con valores de 0,5903 y 0,6166 respectivamente. La variable, tiene una correlación negativa con la MO con un valor de -0,5054, es decir, que el D es inversamente proporcional a la MO.

Tabla 15

Coeficiente de correlación de Pearson entre variables estructurales de la vegetación y la composición química del suelo para la categoría diamétrica fustal.

VARIABLES	H	V	D
H	1		
V	0,5903 ^{^^}	1	
D	0,6166 ^{^^}	0,1941	1
pH	0,2376	0,0305	0,0578
MO	-0,1156	0,447	-0,5054 ^{^^}
CICE	-0,0858	0,4498	-0,497
CE	-0,2592	0,1244	-0,226
P	0,1138	0,3126	-0,2802
Fe	0,0148	0,4133	-0,4214
Mn	-0,0437	0,4426	-0,4737
Zn	-0,2522	0,0471	-0,1436
Na	-0,2581	0,104	-0,2046
Mg	-0,2582	0,2009	-0,3047
Cu	-0,2582	0,2477	-0,351

Nota: H: altura de individuos, V: volumen de individuos, D: densidad de individuos, pH: potencial de hidrogeno, MO: Materia orgánica, CICE: capacidad de intercambio catiónico efectivo, CE: conductividad eléctrica, P: fosforo, Fe: hierro, Mn: manganeso, Zn: zinc, Na: sodio, Mg: magnesio, Cu: cobre.

**Fuerte correlación, ^^ Moderada correlación*

La Tabla 16, muestra el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables estructurales de la vegetación y la composición química del suelo para la categoría diamétrica

latizal, donde, la variable altura de individuos, presenta unas correlaciones positivas, es decir, directamente proporcionales al V y D con valores de 0,7744 y 0,7494 respectivamente y correlaciones negativas con el CE (-0,5871), Zn (-0,5268), Na (-0,5727), Mg (-0,6309), Cu (-0,6482), es decir, una relación inversamente proporcional. La variable V de los individuos, tiene una correlación positiva con el D con un valor de 0,7316, es decir, que el V de individuos presenta una relación directamente proporcional al D. La variable D, presenta correlaciones negativas con la MO (-0,7539), CICE (-0,7434), Fe (-0,6362), Mn (-0,7111) y Cu (-0,2121), es decir, son inversamente proporcionales al D.

Tabla 16

Coefficiente de correlación de Pearson entre las variables estructurales de la vegetación y la composición química del suelo para categoría diamétrica latizal.

VARIABLES	H	V	D
H	1		
V	0,7744*	1	
D	0,7494*	0,7316*	1
pH	0,4514	0,0948	0,0712
MO	-0,4966	-0,4804	-0,7539*
CICE	-0,4393	-0,4675	-0,7434*
CE	-0,5871^^	-0,2518	-0,3233
P	0,0776	-0,2346	-0,4299
Fe	-0,2185	-0,3808	-0,6362^^
Mn	-0,3518	-0,4388	-0,7111*
Zn	-0,5268^^	-0,1755	-0,1995
Na	-0,5727^^	-0,2321	-0,2911
Mg	-0,6309^^	-0,3232	-0,4419
Cu	-0,6482^^	-0,3643	-0,5121^^

Nota: H: altura de individuos, V: volumen de individuos, D: Densidad de individuos, pH: potencial de hidrogeno, MO: Materia orgánica, CICE: capacidad de intercambio catiónico efectivo, CE: conductividad eléctrica, P: fosforo, Fe: hierro, Mn: manganeso, Zn: zinc, Na: sodio, Mg: magnesio, Cu: cobre.

**Fuerte correlación, ^^ Moderada correlación*

La Tabla 17, muestra el Coeficiente de correlación de Pearson de la composición química del suelo para las categorías de fustales y Latizales, donde, la variable pH, tiene correlaciones positivas con el P y el Mn con valores de 0,7645 y 0,9859 respectivamente, y correlaciones negativas con la CE, Na, Mg y Cu con valores de -0,9399, -0,9852, -0,8623, -0,7954 respectivamente, es decir, que el pH es directamente proporcional al P y el Mn e inversamente proporcional a la CE, Na, Mg y Cu. La variable MO presenta correlaciones positivas con la CICE (0,9922), Fe (0,8687) y Mn (0,9576), es decir, que tienen una relación directamente proporcional a la MO. La CICE es directamente proporcional al P, Fe y Cu mostrando correlaciones positivas con valores de 0,7037, 0,9235, 0,5403 respectivamente. La CE presenta correlaciones positivas, indicando una relación directamente proporcional con el Zn (0,9847), Na (0,9989), Mg (0,9833) y Cu (0,9544). El P presenta correlaciones positivas, indicando una relación directamente proporcional con el Fe (0,9224) y el Mn (0,8123) y correlaciones negativas con el Zn (-0,6421) y el Na (-0,5387) indicando una relación inversamente proporcional. La variable Fe indica una correlación positiva con el Mn (0,9745), indicando una relación directamente proporcional. El Zn presenta correlaciones positivas, mostrando una relación directamente proporcional con el Na (0,9917), Mg (0,9366) y Cu (0,8879). El Na presenta correlaciones positivas, mostrando una relación directamente proporcional con el Mg (0,9737) y Cu (0,9394). El Mg presenta una correlación positiva, mostrando una relación directamente proporcional con el Cu (0,9927).

Tabla 17

Coeficiente de correlación de Pearson de la composición química del suelo para las categorías fustales y Latizales.

Variables	pH	MO	CIC	CE	P	Fe	Mn	Zn	Na	Mg	Cu
pH	1										
MO	-0,0443	1									
CIC	0,0801	0,9922*	1								
CE	-0,9399*	0,3825	0,2647	1							
P	0,7645*	0,6099^^	0,7037*	-0,4988	1						
Fe	0,4563	0,8687*	0,9235*	-0,1253	0,9224*	1					
Mn	0,9859*	0,9576*	0,2452	0,1002	0,8123*	0,9745*	1				
Zn	0,2452	0,2156	0,0926	0,9847*	-0,6421^^	-0,2972	-0,0746	1			
Na	-0,9852*	0,3389	0,2193	0,9989*	-0,5387^^	-0,1715	-0,0746	0,9917*	1		
Mg	-0,8623*	0,5441^^	0,4356	0,9833*	-0,3329	0,057	0,2794	0,9366*	0,9737*	1	
Cu	-0,7954*	0,6407^^	0,5403^^	0,9544*	-0,2175	0,1762	0,3924	0,8879*	0,9394*	0,9927*	1

Nota: pH: potencial de hidrogeno, MO: Materia orgánica, CICE: capacidad de intercambio catiónico efectivo, CE: conductividad eléctrica, P: fosforo, Fe: hierro, Mn: manganeso, Zn: zinc, Na: sodio, Mg: magnesio, Cu: cobre.

**Fuerte correlación, ^^ Moderada correlación*

6. Discusión

Al observar la composición florística realizada en el presente estudio se tiene que la vegetación perteneciente a la categoría de fustales, fueron representados por las familias Mimosaceae, Apocynaceae y Acanthaceae, mientras que latizales se tomaron las familias Mimosaceae, Rutaceae y Malvaceae. Esto concuerda con Vitola et al. (2016), donde, los bosques estudiados presentaron una composición típica de bosques secos en Colombia, en los cuales la familia Fabaceae reporta el mayor número de especies (incluida, Mimosaceae).

En cuanto a los índices de Simpson, Shannon y Margalef, mostraron baja diversidad; en general, el bosque indicó ser muy homogéneo según el cociente de mezcla. Esto concuerda con lo reportado por Fuentes (2019), el índice de Simpson arrojó un valor de 0,77, Shannon 1,12 y Margalef 1,24, siendo estos valores relacionados a baja diversidad, de esta misma manera, el cociente de mezcla fue de 1:15, lo cual indica que por cada 15 individuos muestreados es posible encontrar una especie diferente; considerándose como un bosque homogéneo.

Según el índice de Jaccard, la diversidad beta mostró alta diversidad para fustales y latizales, esto concuerda con Benítez et al. (2016), donde, mencionan que los bosques secos, presentan una alta diversidad β , lo que quiere decir, que su composición florística varía significativamente a través de gradientes ambientales a una escala relativamente pequeña, siendo esto evidente en Colombia, donde, los bosques secos varían en las seis regiones.

La distribución de las categorías diamétricas indica la tendencia de la curva de la J invertida, mostrando que la comunidad estudiada presenta buena regeneración, una vez que existe una alta concentración de individuos para la categoría de latizales y menores individuos para las categorías de fustales, encontrándose un mayor número de especies entre 1,5 y 5,5 m de altura y un decrecimiento en el número de especies conforme aumenta la altura, con individuos que van desde 13,6 a 17,5 m de altura. Esto concuerda con lo propuesto por Sanmartín (2016), donde, muestran que las especies no superan una altura de 15 m y la mayor parte de los individuos presenta un intervalo de altura entre los 4 a 6 m, demostrando claramente el estado temprano de regeneración en el que se encuentra el bosque, lo cual nos permite tipificarlo como bosque secundario. Dado que este bosque presenta buena regeneración, Farreras y Aymard (2011), explican que un bosque con baja altura del dosel es un bosque que ha tenido un grado de intervención antrópica que origina la pérdida de muchos elementos del estrato arbóreo. En base a ello, la existencia de este tipo de bosque se debe por un lado a los límites climáticos de precipitación y biotemperatura y por el otro, la condición determinada por la intervención y destrucción al cual fue sometido (Olascuaga et al., 2016).

Con relación al IVI, la especie más dominante fue *Zanthoxylum rhoifolium*, para la categoría latizal, esto concuerda con Londoño y Torres (2014). Dicha especie según Gonzales y Devia (1994), es una especie típica de los bs-T de Colombia.

Con respecto a los análisis de suelos, se presentaron pH ligera y moderadamente ácidos. Esto contrario con lo reportado por Useda y Pineda (2016), el cual, en su estudio realizado en una zona minera, tomaron cuatro muestras de suelos para análisis de pH, los cuales arrojaron valores entre 4,00 y 4,59 indicando suelos extremadamente ácidos, indicando que permiten la disponibilidad y acumulación de metales pesados. En los suelos, el rango más favorable de pH está entre 6 y 7, en el que la disponibilidad de los principales nutrientes es máxima (Arranz, 2011), es decir, la parte alta y baja de la mina presentan suelos con disponibilidad máxima de nutrientes para las plantas.

Los suelos de la parte alta indicaron bajo contenido de MO, lo que puede deducir que contienen bajos niveles de N, P y S, encargados del crecimiento de la vegetación, pues sirve como energía para los organismos de la microflora y microfauna del suelo, lo que fomenta buena estructura (Arranz, 2006), sin embargo, la parte alta presenta buen crecimiento de vegetación. La parte media y baja presentaron, medio contenido de MO, aludiendo que son suelos que pueden presentar residuos orgánicos que se encuentran en descomposición y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Martínez et al., 2008). Así mismo, contribuye de modo importante al crecimiento de la vegetación, al proporcionar elementos esenciales como N, P y S, no obstante, la parte media es la zona de mayor incidencia por el proceso de extracción de carbón, presentando la menor cantidad de individuos. Esto coincide con Pérez y Betancourt (2016), quienes afirman que los impactos directos a la biodiversidad y los ecosistemas por la minería son la eliminación definitiva de coberturas vegetales de diferente tipo, que son por su condición biológica un hábitat de especies del tipo mamíferos, aves, anfibios y reptiles que dependen de las plantas para su subsistencia.

El CO arrojó, contenidos de 1,35, 1,90 y 2,03 g/100g, contrario con lo reportado por Oliveros et al. (2017), en donde, los valores de CO presentes fueron mayores de 3,7 g/100g. El CO mejora la estabilidad estructural del suelo promoviendo la formación de agregados que, junto con la porosidad, aseguran suficiente aireación e infiltración de agua para promover el crecimiento de las plantas.

El N, F y P son los nutrientes considerados mayores para las plantas, y junto con Ca, S y Mg son los elementos esenciales abundantes o macroelementos, a los que se suman los oligoelementos: B, Fe, Si, Zn, Mn, Cu, Mo, Co y Cl (Arranz, 2007). La limitación de P en el área de estudio concuerda con Muegue et al. (2013), el cual, realizó seis muestreos de suelos y estériles mineros, donde, los niveles de P fueron bajos en tres de ellos, esto muy posiblemente, porque en las muestras de suelos realizadas parte del P se encuentre precipitado formando fosfato de Fe o de Al, o que suele ser corriente en suelos ácidos. De la misma manera, él puede verse también limitado debido a la alta capacidad de fijación del mismo en estériles con grandes contenidos en fragmentos gruesos procedentes de areniscas, además, la alteración de los suelos mineros determina que se enriquezcan en óxidos de Fe que secuestran el P. Adicionalmente, la deficiencia de P en el suelo puede producir, en las plantas una disminución de los brotes, tallos finos y cortos con hojas pequeñas, menor desarrollo radicular, floración y cuajado de los frutos (Mengel y Kirkybi, 2000).

Los niveles altos de S en el suelo conllevan a un grado de toxicidad en las plantas, la parte media presentó niveles altos de S, esto generalmente, no indica un tipo de problema, aunque posteriormente puede inducir una deficiencia de N en el suelo, a la vez, se presentaron niveles bajos de este nutriente en los suelos de la parte alta, indicando una deficiencia de dicho elemento y viéndose reflejado en la vegetación por medio de una clorosis general, con hojas más

claras hacia la parte superior de la planta (Fried y Dean, 1952). Esto concuerda con lo reportado por Ma et al. (2020), donde, en su estudio sobre S, Fe, estos provocan cambios en el suelo y la vegetación en las áreas de ganga de carbón.

El elemento Ca, presentó para la parte alta, media y baja, niveles altos con valores de 11,40, 13,32, y 16,60 cmol (+)/kg respectivamente, consecuencia de una pluviometría débil y poca lixiviación, dado esto, el crecimiento de los ápices radicales y el meristemo se ve determinado por las altas concentraciones de Ca (Miransari, 2013). Así mismo, el Mg presentó para la parte alta, media y baja, niveles altos con valores de 3,92, 5,35, y 4,26 cmol (+) /kg respectivamente, señalando una competencia con el Ca y el K para ser absorbido por la planta, causando deficiencia de ellos en el tejido foliar (John et al., 2007). El K, presentó niveles bajos en la parte alta, con un valor de 0,16 cmol (+) /kg, lo que indica una deficiencia, reduciendo la floración, fructificación y desarrollo de las plantas, además, se pierde la resistencia de las plantas a enfermedades, a la sequía y al frío, volviéndose más vulnerables (Mengel y Kirkybi, 2000). Esto no concuerda con lo reportado por Jiménez (2015), donde, se estudió el aprovechamiento de estériles de carbón , mediante análisis de suelos los cuales, mostraron niveles bajos de Ca, Mg, K y Na con valores de 0,21, 0,19 y 0,22 cmol(+)/kg, es decir, la cantidad de bases totales es de 0,86 cmol(+)/kg, indicando un contenido muy bajo de elementos esenciales en el estéril, así que se puede deducir que el material tiene características de un suelo con deficiencia nutricional para el crecimiento de las plantas.

El Mn presentó bajas concentraciones, el Zn por su parte presento altas concentraciones y el Cu en la parte media presento altas concentraciones. Esto contrario con lo estudiado por Muegue et al. (2013), dado que, en su investigación realizada en zona carbonífera del Cesar se encontraron altos niveles de Mn asociados a la presencia de siderita en carbones de origen

tropical, el Zn arrojó valores medios y aunque se destacó en las muestras influidas por la actividad minera no pueden considerarse peligrosos y el Cu está presente en muy bajas concentraciones.

La CE arrojó, suelos no salinos, esto concuerda con lo reportado por Mendieta (2011), dado que, el grado de salinidad de los suelos estudiados es muy bajo clasificándolos como no salinos lo que permite detallar que esta zona no está propensa a facilitar la movilización y retención de metales pesados, por tanto, se podría concluir que la actividad antrópica del sitio no está afectando el desarrollo de la biota que lo rodea.

La parte alta y media presentaron media CICE y la parte baja presentó altos niveles, mostrando que los suelos tienen alta capacidad para contener nutrientes, además cuanto mejor sea la CICE, más fácil es que las raíces extraigan los nutrientes del suelo; en los suelos con alta CICE, las moléculas de H amontonan nutrientes en los sitios de intercambio catiónico (García, 2014).

El Cd arrojó, un valor de 1,38 mg/kg. Esto no concuerda con lo reportado por Cheng et al. (2018), en donde, en los suelos alrededor de un área minera de carbón de la cuenca carbonífera de Huaibei, las concentraciones de Cd en los suelos oscilaron entre 0,05 y 0,87 mg/kg, así mismo, en el estudio realizado por Orozco (2019), indica que, el límite máximo permisible de Cd disponible para Suelos con $\text{pH} < 7$ es 1 mg/kg y en $\text{pH} > 7$ es 3 mg/kg, por lo cual, se está presentando un exceso de dicho metal en los suelos de la parte media del presente estudio, por otro lado, en lo reportado por Barrón (2016), las concentraciones de metales en zonas mineras representan los mayores niveles de contaminación, representando los valores mayores a 1 mg/kg un índice de peligrosidad. El exceso de Cd y su acumulación en la capa superficial de los suelos hace que esta tienda a entrar en las cadenas alimentarias, ya que son

absorbidos por las raíces de las plantas (directamente), transferidos por los animales (indirectamente) y lixiviados a las aguas subterráneas, afectando así a las poblaciones humanas, animales y vegetales en una forma negativa (Galunin et al., 2014). En la vegetación la toxicidad por Cd reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, el contenido de clorofilas y provoca clorosis principalmente en hojas jóvenes, también, interfiere en la entrada y transporte de nutrientes y ocasiona estrés oxidativo y afectaciones en las actividades enzimáticas (Hernández et al., 2019).

El ACP para fustales evidenció, que el calcio tiene una relación con el Fe, dicha relación es antagónica ya que la presencia de un elemento en el suelo provoca que el otro este en menor disponibilidad para que las plantas puedan absorberlo.

De acuerdo con el ACP y el coeficiente de correlación de Pearson, la densidad de individuos tanto en fustales como latizales mostró una relación inversamente proporcional a la MO. Esto se debe a que los suelos de los bs-T, su formación es más lenta que en ecosistemas húmedos, ya que estos se erosionan fácilmente debido a la pendiente, baja humedad, precipitaciones y menor infiltración del agua (Otiniano et al., 2006). Estos procesos edafoclimáticos en suelos con altas pendientes no permiten una estabilidad de este y a su vez la cantidad de MO es baja, por menores procesos de meteorización, dado que, habrá mayor MO en zonas de acumulación de sedimentos (Otiniano et al., 2006). Así mismo, la variable volumen presentó una relación inversa con la MO, es decir, a mayor materia orgánica menor es el volumen de los individuos. Esto se presentó debido a que los individuos que dominan el área de estudio son los de la categoría latizal; por ende, estas especies no tienen grandes volúmenes ya que se encuentran en etapa de crecimiento y desarrollo de su fuste, además, las especies de categoría fustal no mostraron volúmenes significativos.

El ACP tanto para fustales como latizales evidenció, que el pH presentó una relación inversamente proporcional con el Zn, Na, K, Mg y Cu. Las relaciones más fuertes, se corroboran con el coeficiente de correlación de Pearson, donde la variable pH, mostró una relación negativa con el Na, Mg y Cu. Esto concuerda con Osorio (2012), quien en su estudio reportó que a pH mayores a 6,5, nutrientes como P y la mayoría de los micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn) se hacen menos disponibles. Por otro lado, en su estudio afirmó que en suelos con pH bajo los nutrientes de Ca y Mg se hacen menos disponibles. Así mismo, Días (2017), en su estudio afirma que, a pH bajo, las concentraciones de Fe, Cu, Zn, también, pueden ser tóxicos para las plantas, y es más probable que ocurran cuando Al y Mn están presentes. La CE presentó una correlación positiva con el Na, esto concuerda con lo reportado por Camacho et al. (2013), quien encontró una correlación positiva entre la CE y el Na, dado que al encontrarse mayores contenidos de Na en el suelo, la CE aumenta debido a la disponibilidad de sales presentes.

Además, el ACP, arrojó que la parte baja de la mina presentó mayor contenido de P en el suelo, esto debido a que en tiempos atrás estos suelos fueron trabajados en la agricultura, donde los agricultores aplicaban altas cantidades de fertilizantes de fósforo, especialmente fertilizantes compuestos de NPK o cuando se acidifica el agua de riego con ácido fosfórico.

Según el coeficiente de correlación de Pearson de la composición química del suelo, mostró una relación positiva entre la CICE con la MO, P y Fe, es decir, a medida que aumenta la CICE, aumenta la disponibilidad de estos nutrientes. Al presentarse mayores contenidos de MO en un suelo la CICE es mayor, la MO tiene la capacidad de mejorar la capacidad de intercambio catiónico, lo cual disminuye la capacidad de retención de P, favorecen la actividad microbiológica, mejoran las condiciones físicas y biológicas del suelo y aumentan el nivel de fertilidad del suelo (Cruz et al., 2020). El Fe al ser un elemento que forma un catión y se

encuentra en pequeñas cantidades en el suelo, tiene una relación directamente proporcional con la CICE, dado que al aumentar esta, el Fe aumenta su disponibilidad en el suelo (Ríos y Peñuela, 2020).

7. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se evidenció un impacto de la mina en la vegetación, mostrando mayor afectación en la parte media de la misma, dado que, se encuentra menor cantidad de individuos, debido a los depósitos de los residuos estériles del carbón y la deforestación para el establecimiento de la bocamina.

Por otra parte, se observó exceso y deficiencia en el suelo de algunos elementos importantes para el desarrollo de la vegetación, observándose deficiencia de ellos en el tejido foliar, reducción de la floración, fructificación y desarrollo de las plantas, además, se pierde la resistencia de las plantas a enfermedades, a la sequía y al frío, volviéndose más vulnerables, clorosis general y retraso en los procesos fotosintéticos.

En conclusión, se encontró que la MO presento bajos contenidos en la parte alta indicando baja disponibilidad de N, P y S, encargados del crecimiento de la vegetación, así mismo la MO presentó una relaciona inversamente proporcional con la densidad de individuos, debido a que los suelos de los bs-T, su formación es más lenta que en ecosistemas húmedos, ya que estos se erosionan fácilmente debido a la pendiente, baja humedad, precipitaciones y menor infiltración del agua. Estos procesos edafoclimáticos en suelos con altas pendientes no permiten una estabilidad de este y a su vez la cantidad de MO es baja, por menores procesos de meteorización, dado que, habrá mayor MO en zonas de acumulación de sedimentos.

Finalmente, los metales pesados influyen de manera directa en el grado de afectación de la vegetación y la población aledaña a las minas de carbón, dado que el exceso de dichos metales en este caso del Cd y su acumulación en la capa superficial de los suelos hace que esta tienda a entrar en las cadenas alimentarias, ya que son absorbidos por las raíces de las plantas (directamente), transferidos por los animales (indirectamente) y lixiviados a las aguas subterráneas, afectando así a las poblaciones humanas, animales y vegetales en una forma negativa, igualmente, en la vegetación la toxicidad por Cd reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, el contenido de clorofilas y provoca clorosis principalmente en hojas jóvenes, también, interfiere en la entrada y transporte de nutrientes y ocasiona estrés oxidativo y afectaciones en las actividades enzimáticas.

8. Recomendaciones

Para realizar este tipo de estudios es recomendable hacer repeticiones de las muestras de suelos, con el fin de disminuir errores estadísticos y así mismo, obtener resultados más verídicos. También, es importante recolectar muestras de suelo en cada zona de estudio.

Es importante realizar estudios similares a fondo, relacionados con la minería de carbón y su impacto en las plantas, la fauna, el aire, el agua y la población. Esto con el fin de agrupar la información y tener una visión general del comportamiento de estos factores en dicho ambiente y adquirir mayores conocimientos para plantear planes de mejoramiento ambiental que ayuden a mitigar o revertir dichas complicaciones.

Es importante realizar una evaluación de la relación, suelo-planta, mediante análisis químicos de suelos y estudios bromatológicos de la vegetación, para saber con exactitud las

concentraciones de nutrientes absorbidos por las plantas del suelo y la incidencia de los metales pesados en su desarrollo.

Promover la participación de los actores involucrados directa e indirectamente tales como: habitantes de la zona, propietario de la mina, administración municipal y autoridad ambiental. Esto con el fin de ejercer un óptimo manejo y preservación de los recursos para reducir sus posibles deterioros.

Referencias bibliográficas

- Andrade, G. I., Rodríguez, M., & Wills, E. (2012). Dilemas ambientales de la gran minería en Colombia. *Revista Javeriana*, 148(785), 17-23.
- Arranz, J. C. (2006). Caracterización geo ambiental de lugares alterados por minería de carbón en la provincia de León (España). *Boletín geológico y minero*, 117(2), 317-330.
- Arranz-González, J. C. (2007). Caracterización edafológica de lugares alterados por minería de carbón en la provincia de Teruel (España). *Doc. Ing*, 5, 19-30.
- Arranz-González, J. C. (2011). Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. *Bol. Geol. Miner*, 122, 171-180.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2).
- Barceló, J., & Poschenrieder, C. (1992). Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y planta*, 2(2), 345-361.
- Barrón, G. S. (2016). Ecotoxicología del Cadmio. *GS Barron, Ecotoxicología del Cadmio, riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en Cadmio*.
- Benítez, A., Blanco-Torres, A., Cabrera, M., Calderón-Acevedo, C., Castaño-Naranjo, A., Castro-Lima, F.,... & Vergara-Valera, H. (2016). El bosque seco tropical en Colombia.
- Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2011). Numerical ecology with R (Vol. 2, p. 688). New York: Springer.
- Camacho-Tamayo, J. H. (2013). Spatial relation between electrical conductivity and some chemical soil properties. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401-408.

- Casanoves, F., Pla, L., & Di Rienzo, J. A. (2011). Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. *Serie técnica, Informe técnico*, 384.
- Cayola, L., Fuentes, A., & Jørgensen, P. M. (2005). Estructura y composición florística de un bosque seco subandino yungueño en el valle del Tuichi, Área Natural de Manejo Integrado Madidi, La Paz (Bolivia). *Ecología en Bolivia*, 40(3), 396-417.
- Cheng, S., Liu, G., Zhou, C., & Sun, R. (2018). Chemical speciation and risk assessment of cadmium in soils around a typical coal mining area of China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 160, 67-74.
- Chojnacka, K., Chojnacki, A., Gorecka, H., & Górecki, H. (2005). Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants. *Science of the total Environment*, 337(1-3), 175-182.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista ecosistemas*, 13(2).
- Cruz-Macías, WO, Rodríguez-Larramendi, LA, Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, RA, Chávez-Hernández, MH, & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico sobre la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38 (3), 475-480.
- Delgado, E. F. L. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 9(18), 91-97.

- Díaz Muegue, L. C. (2017). Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biochar procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar.
- Elizalde, G. (2009). El suelo en la fase superficial del ciclo geológico. *Geoenseñanza*, 14(2), 265-292.
- Farreras, J. A., & Aymard, G. (2011). Estructura, composición florística y diversidad en bosques secos, situados al sureste del estado barinas, Venezuela. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 29, 12-22.
- Fernández, N., Camacho, L. A., McIntyre, N., Huguet, C., & Pearse, J. (2018). Propuesta metodológica para modelación del impacto de la minería de carbón en los recursos hídricos de cuencas de montaña. In *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Trabajos completo*.
- Fried, M., & Dean, L. A. (1952). A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Science*, 73(4), 263-272.
- Fuentes Velarde, E. M. (2019). Diversidad y composición florística de un área de bosque seco de la comunidad campesina de San Gregorio, San Miguel, Cajamarca.
- Galunin, E., Ferreti, J., Zapelini, I., Vieira, I., Tarley, C. R. T., Abrão, T., & Santos, M. J. (2014). Cadmium mobility in sediments and soils from a coal mining area on Tibagi River watershed: Environmental risk assessment. *Journal of hazardous materials*, 265, 280-287.

- García, C., Moreno, J. L., Hernández Fernández, M. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo.
- García, F. O. (2014). *Fertilidad de suelo y fertilización de cultivos*. INTA.
- González, S. M. & Devia, W. (1994). Caracterización fisionómica de la flora de un bosque seco secundario en el corregimiento de Mateguadua, Tuluá Valle. *Cespedesia*, 20(66), 35-65.
- Halfpter, G., & Ezcurra, E. (1992). *La diversidad biológica de Iberoamérica* (Vol. 1). CYTED-D, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Instituto de Ecología, AC, secretaria de Desarrollo Social.
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y., & Cartaya-Rubio, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos tropicales*, 40(3).
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida* (No. 83). Agro américa.
- IDEAM. (2010). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- IGAC. (s.f.). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de Guía de muestreo: <https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/guiademuestreo.pdf>
- Jiménez Ballesteros, L. M. (2015). Evaluación del aprovechamiento de estériles de carbón mediante integración de materiales orgánicos en suelos de zonas afectadas por la minería en el municipio de Guachetá.
- John, R., Dalling, J. W., Harms, K. E., Yavitt, J. B., Stallard, R. F., Mirabello, M.,... & Foster, R. B. (2007). Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(3), 864-869.

- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.
- Lemos, V. L., & González, A. M. T. (2015). Estructura y composición vegetal de un bosque seco tropical en regeneración en Bataclán (Cali, Colombia). *Colombia forestal*, 18(1), 71-85.
- Londoño Lemos, V., & Torres González, A. M. (2014). Estructura y composición vegetal de un bosque seco tropical en regeneración en Bataclán (Cali, Colombia). *Colombia forestal*, 18(1), 71-85.
- Lora Silva, R. (2001). *Factores que afectan la disponibilidad de nutrimentos para las plantas* (No. Doc. 20674) CO-BAC, Bogotá).
- Ma, J., Quan, Z., Sun, Y., Du, J., & Liu, B. (2020). Excess sulfur and Fe elements drive changes in soil and vegetation at abandoned coal gangues, Guizhou China. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, New Jersey, 179 pp.
- Mamurekli, D. (2010). Environmental impacts of coal mining and coal utilization in the UK. *Acta Montanistica Slovaca*, 15(2), 134.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Manrique Torres, F. I., & Vega Laverde, L. G. (2020). *Diagnóstico de la sostenibilidad ambiental en los proyectos de explotación de mineral de carbón en el municipio de Guachetá Cundinamarca* (Master's thesis, Universidad EAN).

- Mason, N. W., de Bello, F., Mouillot, D., Pavoine, S., & Dray, S. (2013). A guida for using functional diversity indices to reveal changes in assembly processes along ecological gradients. *Journal of Vegetation Science*, 24(5), 794-806.
- McRoberts, R. E., Tomppo, E. O., & Czaplewski, R. L. (1992). Diseños de muestreo de las evaluaciones forestales nacionales. *Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales*. FAO. Roma, Italia.
- Medina, E., & Aldana, O. (2019). Análisis comparativo de las zonificaciones climáticas de Caldas-Lang y Holdridge, con la zonificación del clima edáfico del estudio semidetallado de suelos, en la cuenca del río Cauca, departamento del Valle del Cauca.
- Melo, O. R., & Lizarazo, I. (2017). Estimación del volumen de madera en árboles mediante polinomio único de ahusamiento. *Colombia forestal*, 20(1), 55-62.
- Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Mendieta, M.M. (2011). *Impact of coal mining on the physical and chemical properties of the soils of the Rodrigatos River hydrographic basin (El Bierzo, León)* (Doctoral dissertation, Complutense University of Madrid).
- Mendoza, Z. A. (2013). Guía de métodos para medir la biodiversidad. Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador, 37(6), 82.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal.
- Miransari, M. (2013). Soil microbes and the availability of soil nutrients. *Acta physiologiae plantarum*, 35(11), 3075-3084.

- Molina, E., & Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Mimeo.
- Moncada Prieto, V. M., & López Cortés, O. A. (2021). Justicia ambiental y jurisprudencia constitucional: El caso de las desigualdades ambientales en el Páramo de Pisba. *Estudios constitucionales*, 19(2), 228-259.
- Monte, L. M., Castellanos, M. G., Sánchez, S. T., & Vasco, J. N. (2014). Bárbaros hoscós. Historia de resistencia y conflicto en la explotación del carbón en La Guajira, Colombia. *Revista Opera*, (14), 3.
- Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M & T-Manuales y Tesis SEA, vol.1. Zaragoza, 84 pp.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., & Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4), 1249-1261.
- Muegue, L. C. D., González, J. C. A., & Mesa, G. P. (2013). Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar, Colombia. *Interciencia*, 38(1), 42-47.
- Naseem, S., Bashir, E., Shireen, K., & Shafiq, S. (2009). Soil-plant relationship of *Pteropyrum olivieri*, a serpentine flora of Wadh, Balochistan, Pakistan and its use in mineral prospecting. *Studia UBB Geologia*, 54(2), 33-39.
- Niwattanakul, S., Singthongchai, J., Naenudorn, E. y Wanapu, S. (2013, marzo). Uso del coeficiente de Jaccard para la similitud de palabras clave. En *Actas del multiconferencia internacional de ingenieros e informáticos* (Vol. 1, No. 6, pp. 380-384).

- Olascuaga-Vargas, D., Mercado-Gómez, J., & Sanchez-Montaño, L. R. (2016). Análisis de la vegetación sucesional en un fragmento de bosque seco tropical en Toluviejo-Sucre (Colombia). *Colombia forestal*, 19(1), 23-40,
- Oliveros, D., Molina, I., Rodríguez, K., & Díaz, L. (2017). Caracterización y restauración ecológica de suelos en minería de carbón a cielo abierto: antecedentes, técnicas actuales y búsqueda de nuevas técnicas para su tratamiento. *Revista Agunkuyâa*, 7(1), 36-49.
- Ortega, Á. J. A., Gómez, L. E. P., & Castellón, J. M. R. (2019). Impacto de la apertura económica en el sector minero en Colombia en el periodo comprendido entre 1991-2017. *Liderazgo Estratégico*, 9(1), 167-176.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4.
- Otiniano-Julca, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.
- Pérez, M. M., & Betancur, A. (2016). Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia. *Sociedad y ambiente*, (10), 95-112.
- Pérez-Hernández, C. X., & Zaragoza-Caballero, S. (2015). Diversidad alfa y beta de Cantharidae (Coleoptera) en el bosque tropical caducifolio de la vertiente del Pacífico mexicano. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(3), 771-781.
- Pérez-López, E. (2013). Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. *InterSedes*, 14(29), 06-18.

- Pizano, C., & García, H. (2014). El bosque seco tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá (Colombia) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá (Colombia).
- Plaster, E. J. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo* (No. 631.4 P715c). Madrid, ES: Edit. Paraninfo.
- Reyes Cordero, D. (2012). Análisis de los procesos de restauración pasiva para un bosque seco tropical en la estación experimental forestal horizontes. Guanacaste, costa rica (Doctoral dissertation).
- Ríos-Montesa, K. A., Pino, N. J., & Peñuela, G. (2020). Efecto del biochar en las propiedades de un suelo antrópico de extracción carbonífera durante su proceso de rehabilitación y su correlación con las comunidades bacterianas.
- Ronderos, M. T. (2011). La fiebre minera se apoderó de Colombia. *Revista semana*, 6, 246055-3.
- Sanmartín-Sierra, D. R., Angarita-Hernández, D. F., & Mercado-Gómez, J. D. (2016). Estructura y composición florística del bosque seco tropical de Sanguaré-Sucre (Colombia). *Ciencia en desarrollo*, 7(2), 43-56.
- Silva Orozco, P. A. Análisis comparativo de los niveles de cadmio en suelo aquic dystropepts, fluventic dystropepts y una pradera con pastura en reposo en la vereda rincón de pompeya, Villavicencio, Meta.
- Simón, M., Peralta, N. R., & Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes.
- Soler, E., Berroterán, P., Gil, J., & Acosta, R. (2012). Índice valor de importancia, diversidad y similitud florística de especies leñosas en tres ecosistemas de los llanos centrales de Venezuela. *Agronomía tropical*, 62(1-4), 025-038.

- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Mendonça Filho, J. G., & Hackley, P. C. (2012). Review and update of the applications of organic petrology: Part 2, geological and multidisciplinary applications. *International Journal of Coal Geology*, 98, 73-94.
- Useda, M. E. G., & Acevedo, V. P. (2016). Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá Bajo (Tausa). Modelo conceptual. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 57-74.
- Uslar, Y. V., Mostacedo, B., & Saldias, M. (2004). Composición, estructura y dinámica de un bosque seco semideciduo en Santa Cruz, Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 39(1), 25-43.
- Verbel, J. O. (2010). Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana. *Minería de carbón*. [En línea] SF [http://www1. Upme. Gov. Co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana. Pdf](http://www1.Upme.Gov.Co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.Pdf).
- Viloria-de-la-Hoz, J. (1998). La economía del carbón en el Caribe colombiano. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 4.
- Vitola, F. Y. H., Gómez, J. M., & Cifuentes, H. M. (2017). Estructura y composición florística del bosque seco tropical en los montes de maría (sucre-Colombia) /Structure and floristic composition of tropical dry forest in the Montes de María (Sucre-Colombia). *Ciencia en desarrollo*, 8(1), 71-82.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21(2-3), 213-251.

Apéndice

Apéndice A. Bosque seco tropical (bs-T).





Apéndice B. Establecimiento de parcelas.





Apéndice C. Formato de inventario forestal.

 		<p>Observaciones en la diversidad y estructura vegetal y la química del suelo, en sitios de extracción de carbón en Enciso Santander.</p>					
Formato de Inventario Forestal							
Parcela:		Cobertura:		Fecha:		Coordenada	
						E:	N:
Descripción de la parcela:						Altitud:	
N	Especie	CAP	Altura	L	F	Observaciones	

Apéndice D. Trabajo de herbario y recolección de muestras vegetales.





Apéndice E. Toma de la muestra.





Apéndice F. Conservación y almacenamiento de la muestra.

