

EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE ESTÉRILES DE CARBÓN
MEDIANTE INTEGRACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS EN SUELOS DE
ZONAS AFECTADAS POR LA MINERA EN EL MUNICIPIO DE GUACHETÁ.

LAURA MERCEDES JIMENEZ BALLESTEROS

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ

2015

Prevención y control de la contaminación del suelo

EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE ESTÉRILES DE CARBÓN
MEDIANTE INTEGRACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS EN SUELOS DE
ZONAS AFECTADAS POR LA MINERA EN EL MUNICIPIO DE GUACHETÁ.

LAURA MERCEDES JIMENEZ BALLESTEROS

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

DIRECTORA: INGRID ALEXANDRA RIVERA DIAZ

ING. Agrícola, M.Sc. Ciencias Agrarias

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ

2015

Declaratoria de originalidad:

“La presente propuesta de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental de la Universidad Libre no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente o adicional al actual. La propuesta de proyecto de grado es resultado de las investigaciones del autor (es), excepto donde se indican las fuentes de Información consultadas”.

LAURA MERCEDES JIMENÉZ BALLESTEROS

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Laura Mercedes Jiménez Ballesteros', with stylized, overlapping letters.

Código:

64102007

NOTA DE ACEPTACIÓN

.....
.....
.....
.....

.....

Firma Directora de la Tesis

.....

Firma Jurado

.....

Firma Jurado

Bogotá, 2015

A Dios por sus bendiciones
A mi Papa por ser mi modelo a seguir
A mi Mamá quien es mi polo a tierra
A mi Hermano, mi complemento

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de proyecto de grado la profesora Ingrid Rivera Díaz, por su acompañamiento en este trabajo, sus valiosas enseñanzas tanto profesionales como personales.

A la Profesora Alejandra Catacolí, por su motivación y gran apoyo para lograr finalizar esta etapa.

Al Ingeniero Oscar Leonardo Ortiz, por su buena labor y por tener la solución a muchos de los problemas que se presentaron.

A los profesores Ricardo Vega, Nicolay Agudelo, Pablo Bonilla, Humberto Llerena, Francisco Fonseca, por sus asesorías en temas relacionados con la actual investigación.

A mis compañeros y amigos Zulay y Juan David, por su infinita paciencia y colaboración a lo largo de la carrera.

A toda mi familia, por ser mí soporte en momentos difíciles, especialmente a Vanessa Landaeta por alegrar mis días y confiar siempre en mí.

GLOSARIO

Acopio de estéril: son centros de acumulación planificada de los materiales considerados como un residuo rocoso en el proceso de la extracción de carbón.

Análisis de varianza: es una técnica estadística para el análisis de datos experimentales, que consiste en separar la variación total de todas las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento.

Carbón: es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos principalmente azufre, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno, este mineral es utilizado como combustible fósil.

Estéril de carbón: es un material que se encuentra recubriendo el manto de carbón en el interior del yacimiento y sus propiedades químicas y físicas no son suficientes para darle un uso productivo.

Licencia ambiental: es un documento otorgado por la autoridad competente a solicitud del proponente de un proyecto que certifica que desde el punto de vista de protección ambiental la actividad se puede ejecutar bajo el acondicionamiento de cumplir las medidas establecidas.

Materiales orgánicos: son compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos y sus productos de residuo en el ambiente natural.

Micorrizas: son la unión de hongos especializados que trabajan en asocio con las plantas permitiéndoles una mayor absorción de nutrientes en el suelo.

Mina: es el conjunto de labores necesarias para explotar un yacimiento de un mineral, por encima o por debajo de la superficie.

Paisajismo: es la actividad destinada a planificar, diseñar y modificar las características visibles, físicas y anímicas de un espacio.

Revegetalización: es una tecnología de restauración basada en el restablecimiento de cobertura vegetal y el manejo de factores bióticos y abióticos determinantes para la regeneración de la vegetación.

Suelo: es la parte superficial de la corteza terrestre, conformada por minerales y partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, las bacterias, el agua y otros procesos de desintegración orgánica.

Sustrato: es la base, materia o sustancia, que sirve de sostén a una especie vegetal, en el cual se sustentan para extender sus hojas en el aire y le suministran minerales como: carbono, nitrógeno y oxígeno a la planta. El sustrato dominante en el ambiente es el suelo.

Título Minero: es un documento en el cual podrá constituir, declarar y probar el derecho a Explorar y explotar minas de propiedad del Estado colombiano, mediante el Contrato de Concesión minera, debidamente otorgado e inscrito en el Registro Minero

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el aprovechamiento del material estéril de carbón en la recuperación de suelos. Mediante su caracterización fisicoquímica, se obtuvo que este material contenía muy pocos nutrientes que permitieran el desarrollo vegetal, así que para mejorar estas condiciones de baja disponibilidad de nutrientes se le incorporaron materiales orgánicos. En la investigación se realizaron nueve mezclas con diferentes porcentajes entre estéril, estiércol bovino y micorrizas, en las que se sembró pasto rye grass perenne combinado con trébol blanco, y se evaluaron dos variables que fueron: el crecimiento de pasto y la producción de biomasa. En el experimento se obtuvo que las especies sembradas crecieron en todas las mezclas que se conformaron, incluso en el tratamiento T1, que contenía un 100% de estéril.

El enfoque de aprovechamiento del material se hizo mediante el planteamiento de dos estrategias de revegetalización: la primera el uso de pasto para la producción ganadera y la segunda el uso de pasto para la recuperación paisajística, cualquiera de las dos para ser implementadas en una zona de botadero de estéril de carbón.

Palabras claves: revegetalización, estéril, estiércol, biomasa

INTRODUCCION

El presente estudio es de gran importancia pues se realizó para brindar solución a uno de los mayores impactos generados por la extracción subterránea de carbón en el municipio de Guachetá, que es la disposición de un residuo denominado estéril de carbón, que para la industria minera no representa ningún tipo de beneficio económico, por el contrario genera costos adicionales de transporte y adquisición de grandes terrenos para su disposición final.

Las principales razones por las cuales surgió el tema de investigación fueron las de proporcionar nuevas alternativas a los empresarios mineros, para darle un uso diferente al material y las de plantear estrategias para recuperar los terrenos de acopio del estéril que ya estaban siendo intervenidos en la zona del estudio.

Se recopilaron antecedentes sobre los usos alternativos que se le podían dar a este material y se encontró que sus características como un material inerte, se mejoraban con la incorporación de materiales orgánicos y otros materiales de residuos de la minería como: lodos y cal, en las que se sembraban especies vegetales y se obtenían resultados positivos en la germinación y crecimiento de plantas.

La investigación se formuló con la idea de mezclar el material estéril con: estiércol bovino y micorrizas y evaluar siembras de pasto, teniendo en cuenta las variables de crecimiento y producción de biomasa, con los resultados obtenidos en el experimento se lograron plantear estrategias para generar alternativas de uso en terrenos de acopio del material que son zonas que han sido afectadas por la minería en el municipio de Guachetá.

TABLA DE CONTENIDO

1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	1
2. JUSTIFICACION	3
3. OBJETIVOS	5
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	5
4. MARCO REFERENCIAL	6
4.1 ANTECEDENTES.....	6
4.2 MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL	7
4.2.1 El carbón en el mundo.....	7
4.2.2 El carbón en Colombia	9
4.2.3 El carbón en el departamento de Cundinamarca	9
4.2.4 Composición y formación del carbón.....	10
4.2.5 Clasificación del carbón.....	12
4.2.6 Usos del carbón	13
4.2.7 La hulla bituminosa.....	14
4.2.8 Técnicas de minería de carbón	14

4.2.9 Residuos de minería de carbón.....	17
4.2.10 Estéril de carbón	17
4.3 MARCO GEOGRAFICO	19
4.4 MARCO LEGAL.....	23
5. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ESTÉRIL	24
5.1 METODOLOGÍA	24
5.2 RESULTADOS	26
5.3 ANALISIS DE RESULTADOS	29
5.3.1 Humedad y granulometría	29
5.3.2 pH.....	30
5.3.3 Capacidad de cambio catiónico, bases totales y saturación	31
5.3.4 Materia Orgánica	32
5.3.5 Elementos menores.....	33
5.3.6 Fertilidad.....	33
6. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE INTEGRACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS AL MATERIAL ESTÉRIL.....	35
6.1 METODOLOGÍA	35
6.1.1 Materiales del experimento	36
6.1.2 Proporciones de mezclas	38

6.1.3 Selección de forraje para la siembra	39
6.2 RESULTADOS	41
6.2.1 Crecimiento de rye grass.....	41
6.2.2 Biomasa	46
6.2.3 Análisis in-situ a los tratamientos conformados en el experimento	48
6.3 ANALISIS ESTADISTICO.....	49
6.3.1 Variable de crecimiento de pasto rye grass.....	50
6.3.2 Producción de biomasa	54
7. PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS PARA REVEGETALIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE ESTÉRILES DE CARBÓN EN SUELOS DE ZONAS AFECTADAS POR LA MINERA EN EL MUNICIPIO DE GUACHETÁ	58
7.1 ESTRATEGIA DE REVEGETALIZACIÓN CON PASTOS PARA USO GANADERO EN UN BOTADERO DE MATERIAL ESTÉRIL	58
7.2 ESTRATEGIA DE REVEGETALIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE PASTO PARA RESTAURACIÓN PAISAJÍSTICA DE UN BOTADERO DE MATERIAL ESTÉRIL.....	62
8. CONCLUSIONES	66
9. RECOMENDACIONES.....	68
10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. Clasificación del carbón	12
Tabla 3. Usos del carbón	13
Tabla 4. Legislación Minera en Colombia	23
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del estéril de carbón	27
Tabla 6. Rangos de determinación de materia orgánica.....	32
Tabla 7. Fertilidad de suelos	34
Tabla 8 , Producción de biomasa por área en cada tratamiento.....	48
Tabla 9. Análisis de elementos esenciales	48
Tabla 10. Datos de variable de crecimiento (cm).....	50
Tabla 11. Tabla resumen ANOVA variable de crecimiento	51
Tabla 12. ANOVA del crecimiento de las plantas	51
Tabla 13. Subconjuntos homogéneos de la variable de crecimiento (cm)	53
Tabla 14. Datos de la variable de biomasa (g).....	54
Tabla 15. Resumen del análisis ANOVA de los datos de biomasa.....	55
Tabla 16. ANOVA producción biomasa	55
Tabla 17. Subconjuntos homogéneos de la variable de producción de biomasa ..	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reservas mundiales de carbón por continentes	8
Figura 2. Proceso de carbonificación adoptado de Vásquez, 2010	11
Figura 3. Mapa Guachetá en el departamento de Cundinamarca	20
Figura 4. Mapa geográfico municipio de Guachetá.....	21
Figura 5. Mapa geográfico municipio de Guachetá.....	22
Figura 6. Toma de muestra de estéril de carbón	25
Figura 7. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo.....	30
Figura 8. Adecuación del vivero.....	36
Figura 9. Composición de los tratamientos del experimento	39
Figura 10. Conformación de los tratamientos y siembra	40
Figura 11. Crecimiento de pasto en el primer mes	41
Figura 12. Crecimiento de pasto al segundo mes.....	42
Figura 13. Crecimiento de pasto al tercer mes	42
Figura 14. Crecimiento de pasto en el cuarto mes.....	43
Figura 15. Crecimiento de rye grass semanalmente.....	44
Figura 16. Crecimiento rye grass semana 16	45
Figura 17. Proceso de corte y pesaje producción de biomasa	46
Figura 18. Producción de Biomasa base húmeda	47

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Comparaciones múltiples datos de crecimiento.....	74
Anexo 2. Comparaciones múltiples datos de biomasa	77

1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

La principal fuente económica del municipio de Guachetá está basada en la explotación, almacenamiento y transformación del carbón, lo cual ha permitido el desarrollo de la industria en los últimos años pero a su vez ha generado una gran problemática en el tejido ambiental y social del municipio (Alcaldía., Universidad Distrital Fransisco Jose de Caldas, 2012-2023). La explotación del carbón es un problema que afecta el agua, la degradación estética del paisaje, por contaminación del suelo y la vegetación, la atmósfera e incluso atenta con la salud de los seres humanos (Marbello & Torres, 2011), uno de los principales causantes de estos impactos es el material de desecho llamado estéril que se genera en las etapas de extracción y almacenamiento del mineral, este material está constituido por suelo, sedimentos y rocas que cubren los afloramientos del carbón o separan los mantos del mineral, poseen propiedades químicas de suelos inorgánicos (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA & MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 1998) y sus propiedades físicas no son suficientes para darles un uso productivo, sus características de dureza son especiales, pero una vez extraído pierde toda dureza tanto así, que fácilmente se transforma de roca a polvo (Rivera & Rodriguez, 2010).

Se ha reportado en informes técnicos que los residuos de material estéril corresponden aproximadamente a un 10% de la producción de carbón (CENTRO

DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS, 2011). También estudios en el departamento de Boyacá, señalan que en la explotación subterránea de minas de carbón en ese departamento produce por promedio 823,5 toneladas de estéril al año (Ávila & Soto, 2012), en el mismo estudio se analiza el uso del material en la producción de concreto, sin embargo a este material no se le otorga ninguna clase de utilidad en las minas del municipio de Guachetá, el residuo solo se depositan en escombreras que ocupan grandes espacios los cuales deberían ser utilizados para la producción agrícola y ganadera.

Según la actual Guía Ambiental de Minería Subterránea de Carbón, los estériles generados en la actividad minera deben disponerse en patios de acopio y escombreras, la recuperación vegetal en el terreno de acopio se realiza cuando ha colmatado la zona y altura establecida para el acopio cubriendo con una capa de cinco centímetros de suelo orgánico y seguidamente con tapetes de gramíneas (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA & MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 1998).

2. JUSTIFICACION

La formación de suelos derivados de residuos es una importante alternativa que ha demostrado su eficacia cuando se conocen adecuadamente tanto las condiciones del medio inicial como las características de los materiales residuales utilizados y su evolución en el tiempo, los estériles de explotaciones mineras, pueden ser adecuadamente gestionados construyendo a partir de ellos mezclas, más o menos complejas, que pueden corregir procesos contaminantes por medio de sus características, al tiempo que originan un medio adecuado para el desarrollo de la actividad biológica, que conduce a la formación de un nuevo suelo (Macias, 2004).

Actualmente son muy pocos los estudios sobre la utilización de estériles de carbón en recuperación de suelos, lo cual abre un campo interesante para el aprovechamiento de este abundante recurso, por tal razón se propone desarrollar este tema de estudio generando usos alternativos, en donde, el estéril de carbón considerado como un residuo en el actual proceso de explotación del mineral, sea usado como materia prima para la conformación de suelos nutritivos que han sido afectados por la minería, esta investigación beneficiaría a las actuales y futuras empresas en el municipio de Guachetá que se dedican a la extracción de carbón.

El desarrollo del proyecto además contribuiría a disminuir los costos de transporte y almacenamiento del material estéril en centros de acopio, generando mayores utilidades a los empresarios mineros del Municipio de Guachetá y a su vez, se

reduciría hasta en un 80% el uso del suelo natural en la adecuación de terrenos de disposición de estériles, siendo económicamente viable realizar restauraciones con diferentes mezclas entre los materiales orgánicos y el estéril (Rivera, & Rodríguez, 2010).

El proyecto se desarrolla en el marco de un acuerdo de cooperación entre la empresa PROMINCARG S.A.S., titular del contrato de concesión minero 867T con área de aprobación PMA 273 Ha. y el Consultorio Ambiental de la Universidad Libre.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el aprovechamiento de estériles de carbón mediante integración de materiales orgánicos en suelos de zonas afectadas por la minera en el municipio de Guachetá.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar las propiedades químicas y físicas del material estéril de carbón.
- Evaluar modelos de integración de materiales orgánicos al material estéril.
- Plantear estrategias para revegetalización mediante el uso de estériles de carbón en suelos de zonas afectadas por la explotación minera en el Municipio de Guachetá.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

En el desarrollo de la actual investigación se encontraron estudios realizados en China, India y Estados Unidos que han evaluado el uso de los hongos Micorrícicos realizando diferentes mezclas con algunos residuos generados en minería como: estéril de carbón, cenizas y lodos. Se han obtenido buenos resultados que aseguran que los Hongos Micorrícicos pueden mejorar eficazmente la tolerancia de las plantas a la acidificación y mejorar la estructura del suelo de mina (Li-ping, 2009).

Actualmente en Colombia la empresa Cerrejón es considerada como un ejemplo de minería ambientalmente sostenible, mediante su Programa de Rehabilitación de Tierras intervenidas por la actividad minera, al 2011 la extensión de tierras rehabilitadas alcanzaba las 2.800 hectáreas en áreas que una vez fueron tajos o botaderos de material estéril. En la actualidad los botaderos se encuentran revestidos con una diversa cobertura de bosque seco tropical y exhiben dinámicas ecológicas que establecen conectividad con las áreas naturales vecinas (CERREJON, 2011).

Para el sector minero del municipio de Guachetá solo se conoce que el tratamiento que se le ha venido dado a los estériles, es el que se encuentra reglamentado en la Guía Minero Ambiental de Explotación Subterránea de Carbón

(1998), que propone una disposición final del material estéril en sitios especiales, debidamente protegidos de la dispersión y el arrastre y a los cuales se le debe incorporar una capa de cinco centímetros de suelo orgánico y finalmente la adecuación de cespedones. No se tienen estudios en la zona en donde al material estéril se le haya dado un aprovechamiento o tratamiento diferente al que se encuentra reglamentado. Sin embargo en 2009 en la revista Avances de la Universidad Libre, se publicó el artículo titulado “Incorporación de sustratos orgánicos a estériles producidos en minas de carbón, para la revegetalización en zonas de páramo” (Rivera & Rodríguez, 2010), cuyos resultados arrojaron una adaptación promedio del 75% de tres especies nativas sembradas en las diferentes mezclas entre estéril, suelo natural y compostaje, para revegetalización en la zona del páramo de Guerrero en el departamento de Cundinamarca.

4.2 MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL

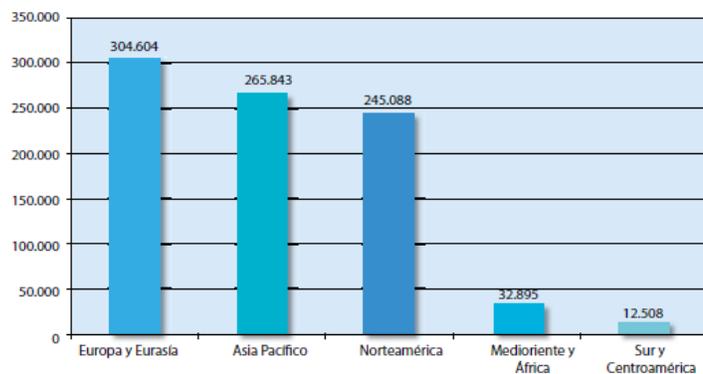
Para el actual estudio se emplea un fundamento teórico y conceptual basado en investigaciones ya realizadas brindando un soporte a los temas relacionados.

4.2.1 El carbón en el mundo

Durante siglos el Carbón ha representado un papel muy importante gracias a que es una de las fuentes de energía más abundantes del mundo, con la que se produce casi el 40% de la electricidad mundial y además es el principal

combustible utilizado en la producción de acero y cemento, así como en otras actividades industriales (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005). Las reservas mundiales de carbón por región medidas en Millones de Toneladas se muestran a continuación en la Figura 1, y se puede notar que la mayor concentración se encuentra en Europa y Euro Asia, seguido de Asia Pacifico, Norte América, África y Sur y Centro América (BRITISH PETROLEUM COMPANY, 2011).

Figura 1. Reservas mundiales de carbón por continentes



Fuente: Revision Estadística de la Energia Mundial (BRITISH PETROLEUM COMPANY, 2011).

Los datos anteriores no coinciden con otros estudios más recientes de las estimaciones de las reservas mundiales, se tiene que las mayores reservas por país las posee Estados Unidos con el 27.6%, seguido de la Federación Rusa 18.2%, China 13.3%, Australia 8.9% e India con el 7.0% (Ministerio de Minas y Energia, Unidad de Planeacion Minero Energética, 2005).

4.2.2 El carbón en Colombia

En el país las reservas de carbón se ubican principalmente en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca (Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, 2005). En el 2010 el país poseía una excelente calidad del mineral, suficiente para participar en el mercado mundial por largo tiempo, en ese año se tenía una reserva aproximada de 6.593,4 Millones de Toneladas que equivalen al 0,8%.de las reservas mundiales (WORLD ENERGY COUNCIL, 2010).

En cuanto a producción de carbón en el año 2008, Colombia hacia parte de los diez mayores productores de carbón en el mundo con aproximadamente 79 millones de toneladas al año, según el reporte de 2009 que publicó la Asociación Mundial de Carbón, sin embargo en el último reporte de la asociación publicado en 2014, Colombia ya no hacia parte de ese mismo listado, así que se evidenció que la producción del país ha bajado considerablemente durante los últimos años (WORLD COAL ASSOCIATION, 2015).

4.2.3 El carbón en el departamento de Cundinamarca

La formación carbonífera en esta región va desde el municipio de Zipaquirá hasta los límites con el departamento de Boyacá, en la zona se extrae carbón de tipo bituminoso con una técnica de explotación subterránea poco tecnificada y de

subsistencia, la zona minera que extrae la mayor cantidad del mineral es Checua-Lenguazaque con 127.38 Mt, de la cual hace parte el Municipio de Guachetá (Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, 2005), la minería de esta región está pasando de ser poco tecnificada y de subsistencia a una minería más técnica y sostenible.

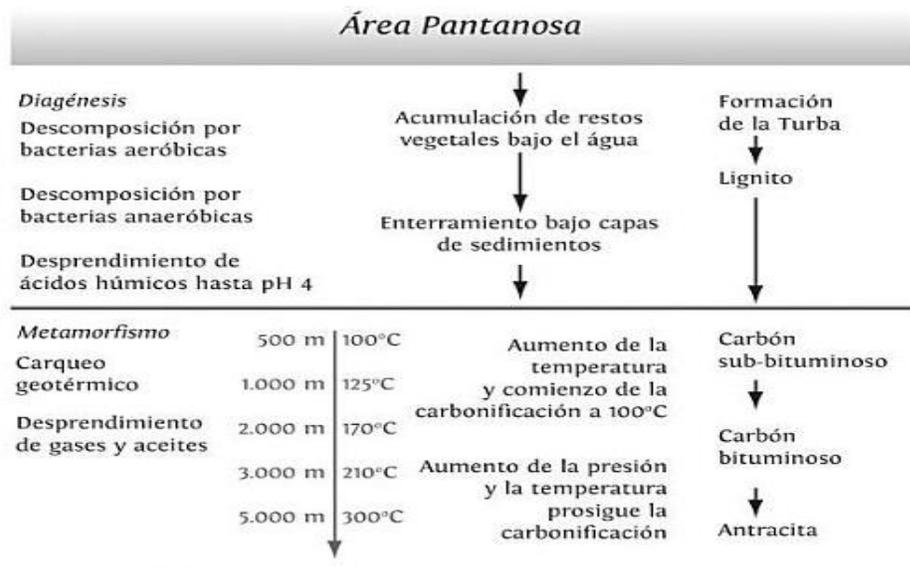
4.2.4 Composición y formación del carbón

Como medida de contextualización para el actual estudio es importante el conocimiento del origen del carbón, su composición, su proceso de formación y clasificación, ya que la investigación surge y gira en torno al proceso de explotación de este mineral.

El carbón es una roca combustible sedimentaria y de origen orgánico, compuesta por minerales y principalmente por los siguientes elementos: carbono, azufre, nitrógeno, hidrógeno, y oxígeno (UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA, 2005), localizada generalmente bajo una capa de arena, pizarra o arcilla y que es utilizada como combustible fósil gracias a su alto contenido de carbono, surge como producto de la descomposición de los restos de la vegetación prehistórica en pantanos y ciénagas, en estos ambientes sin oxígeno y con presencia de bacterias anaerobias (Vásquez, 2010). “Durante años los movimientos en la corteza terrestre enterraron estos pantanos y ciénagas a grandes profundidades, esto fueron sometidos a altas temperaturas y presiones provocando cambios físicos y químicos en la vegetación transformándola en turba y después en carbón” (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005).

La formación del mineral se realiza mediante el proceso de carbonificación en el cual los restos vegetales se transforman en carbón durante dos etapas, la primera llamada diagénesis o carbonificación bioquímica, donde los restos orgánicos se descomponen primero como consecuencia de la acción de hongos y bacterias aeróbicas y luego por bacterias anaeróbicas (Llorente, 2000), el resultado de la primera etapa es el paso de turba a lignito y la segunda que es el metamorfismo o carbonificación geoquímica, procedimiento en el cual los sedimentos sueltos se consolidan gracias a diferentes presiones y altas temperaturas (Vásquez, 2010) dando paso a la formación de carbón: sub-bituminoso, bituminoso y antracita.

Figura 2. Proceso de carbonificación



Fuente: Vásquez, 2010

4.2.5 Clasificación del carbón

Para la clasificación del carbón la UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA (2005), cita a la American Society for Testing and Materials, que propone la clasificación más aceptada para el carbón actualmente, que se muestra a continuación en la Tabla 2, dividiéndolo en cuatro clases según las propiedades de composición de los vegetales y variables como: la presión y temperatura a la que estos fueron sometidos en la etapa de metamorfismo.

Tabla 1. Clasificación del carbón

Tipo	Carbono Fijo (%)	Material Volátil (%)	Contenido Humedad (%)	Poder Calorifico (Btu/lb)	Poder Calorifico (MJ/Kg)	Poder Calorifico Kcal/Kg
Antracita	86 - 98	1	< 15	>14.000	>32.6	>7.780
Bituminoso	45 - 86	32	15 - 20	10.500-14.000	24.5 - 32.6	5.800-7.780
Subbituminoso	35 - 45	50	20 - 30	7.800 - 10.500	18.2 - 24.5	4.300-7.780
Lignito y Turba	25 - 35	96	> 30	4.000 - 7.800	9.3 - 18.2	2.200 - 4.300

Fuente: (UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA, 2005)

4.2.6 Usos del carbón

De manera más específica la (UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA, 2005), muestra los posibles usos que se le da a cada una de las clases de carbón: antracita, hulla Bituminosa, hulla sub-bituminosa lignito y turba, según sus propiedades características mencionadas en la clasificación.

Tabla 2. Usos del carbón

CLASE	USO
Antracita (carbón duro)	<ul style="list-style-type: none">✓ Combustible para la generación de vapor o calor en las industrias siderúrgicas y térmicas.✓ Fabricación de colorantes y goma sintética.✓ Filtros para purificación de agua consumo humano.
Hulla bituminosa (carbones coquizable).	<ul style="list-style-type: none">✓ Procesos de obtención del acero.✓ Producción de vapor para generación de energía.
Hulla Sub-bituminosa (material volátil)	<ul style="list-style-type: none">✓ Generación de energía eléctrica✓ Procesos industriales.

CLASE	USO
<p align="center">Lignito y Turba (alta humedad, ceniza, material volátil)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Generación de calórica (calefacción). ✓ Energía eléctrica ✓ Fabricación de briquetas de turba y lignito para quemarlas en hornos.

Fuente: (UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA, 2005),
modificada por el autor.

4.2.7 La hulla bituminosa

Algunos carbones al someterse a un proceso de calentamiento pasan a través de un estado plástico, durante el cual se ablandan, hinchan y se solidifican generando un producto sólido con una masa porosa, dura y muy fuerte, los carbones que presentan este comportamiento se denominan carbones aglomerantes o coquizables, que generalmente son carbones de tipo Bituminosos (Alarcón, 2011).

4.2.8 Técnicas de minería de carbón

A lo largo de la historia el hombre ha extraído carbón desde que descubrió su uso como fuente de calor y aprendió a usarlo y controlarlo, está totalmente vinculada a la revolución industrial: la producción de acero, el ferrocarril y los barcos a vapor

(WORLD COAL ASSOCIATION, 2005). El primer método de la minería de Carbón fue el del raspado del afloramiento rocoso para extraer la roca negra y quemarla (Glenn, 2011).

Para la elección del método de extracción del carbón de una mina se tienen en cuenta factores como: la topografía, la forma del filón, la geología de las rocas de las capas superiores y los requisitos o limitaciones ambientales (Hermann, 1998).

Actualmente en Colombia se aplican dos métodos para realizar el proceso de extracción del carbón que son: de superficie o también llamado a cielo abierto y extracción subterránea o de profundidad, que están especificadas hace varios años por la Asociación Mundial de Carbón (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005).

A continuación se describen los procesos.

4.2.8.1 Minería a cielo abierto

Esta técnica de extracción del carbón se realiza cuando el mineral se encuentra próximo a la superficie y se presenta en vetas relativamente planas o tabulares el proceso de extracción requiere de zonas extensas donde se utilizan piezas de maquinaria muy grandes, tales como: dragas excavadoras, excavadoras, camiones de gran tonelaje (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005).

El proceso de explotación consta de cuatro fases discontinuo llamadas: perforación y voladura, fases de carga y acarreo (Stellman, 1998). Inicialmente la

roca y el material superior del suelo se rompen con explosivos en la fase de voladura, después se retira con dragas excavadoras, una vez expuesta la veta de carbón esta se perfora, fractura y extrae de forma sistemática en tiras finalmente el carbón se carga para su transporte (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005).

Las operaciones de explotación de carbón a cielo abierto demandan inmensas escombreras para almacenar los productos de la capa de cobertura, se debe proceder mediante controles estrictos para evitar fallos en el escombrado y proteger tanto a los trabajadores como a la población en general y el medio ambiente (Stellman, 1998).

4.2.8.2 Minería subterránea

La minería subterránea representa actualmente alrededor el 60% de la producción mundial de carbón, existen dos métodos principales de extracción subterránea que son: extracción mediante pilares y la extracción por tajos largos (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005). En el sector de la minería subterránea de carbón del municipio de Guachetá, el método que más se emplea es la extracción mediante pilares, en el cual los depósitos de carbón se extraen cortando una red de salas en la veta de carbón y dejando pilares de carbón para sujetar el techo de la mina (WORLD COAL ASSOCIATION, 2005). Los mineros pican, arrancan y barrenan para poder acceder y extraer el mineral que finalmente se transporta a la superficie para su comercialización (Stellman, 1998).

4.2.9 Residuos de minería de carbón

En el apartado anterior se describieron brevemente los tipos de explotaciones mineras pero detrás del proceso principal que es la obtención del mineral también se generan grandes cantidades de residuos a lo largo del proceso.

Al extraer el carbón suelen hallarse residuos que no son combustibles como arcilla y rocas mientras que en la combustión del carbón se produce un residuo conocido como ceniza, cuya cantidad depende principalmente de la proporción de materiales no combustibles que posee el carbón en su estado natural (Guadina, 1999)

La roca estéril es un residuo de minería ya que es considerado como un material inerte, cuya principal problemática es el gran volumen generado, que requiere de grandes terrenos de escombreras para su disposición final y preferiblemente cercanas al yacimiento (Romero, 2006).

4.2.10 Estéril de carbón

La Ficha técnica sobre estériles de carbón elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España, (2011), cita al Instituto Tecnológico y Geominero de España, (1995), que contempla que el estéril de carbón es el residuo procedente de la separación entre el carbón y el estéril, el cual se origina de la explotación de los pozos de minas de hulla, antracita y también en los procesos del lavado del carbón, generalmente es almacenado en escombreras o centros de acopio.

Existen tres tipos de residuos de roca estéril, el primero se les denomina estériles de mina, constituidos por rocas encajantes de las capas de carbón, fundamentalmente pizarras y areniscas, el segundo tipo recibe el nombre de estéril de lavadero y por último el estéril de escombrera (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO Y CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS, 2002).

4.2.10.1 Propiedades físicas

Los estériles de carbón están compuestos generalmente por fragmentos de diversas rocas, con una granulometría 0-200mm, la plasticidad del material es de tipo media-baja, los estériles de mina se caracterizan por tener una granulometría irregular además no estar degradados y no poseer carbón (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO Y CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS, 2002).

4.2.10.2 Propiedades Químicas

Los estériles poseen un elevado porcentaje de SiO_2 y alúmina (Al_2O_3), el contenido de azufre es variable, además contienen carbono fijo en porcentajes que una vez descontado las cenizas y los volátiles, pueden llegar al 16% en los estériles de hulla y el 27% en los de antracita (MINISTERIO DE MEDIO

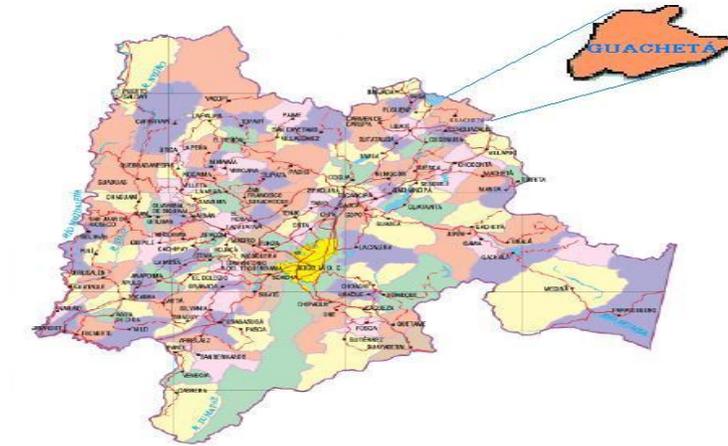
AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO Y CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS, 2002).

El material estéril suele ser neutro o ligeramente alcalino, pero en contacto con agua y en presencia de piratas, pueden dar lugar a lixiviados ácidos que pueden ser neutralizados rápidamente por reacción con los elementos alcalinos presentes en los estériles (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO Y CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS, 2002)

4.3 MARCO GEOGRAFICO

Está ubicado en la República de Colombia, a 118 Km. al norte de Bogotá D.C., en el sector nororiental del departamento de Cundinamarca, su área total es de 177.45 Km², con una altura entre 2.500 a 3.500 m.s.n.m, se encuentra entre los pisos térmicos frío y páramo cuya temperatura oscila entre los 12° C y 13° C, la Cabecera Municipal se localiza a los 5°23'15" latitud Norte y a los 73°41'20" de longitud al Oeste del Meridiano Greenwich (Flórez, 2000).

Figura 3. Mapa Guachetá en el departamento de Cundinamarca

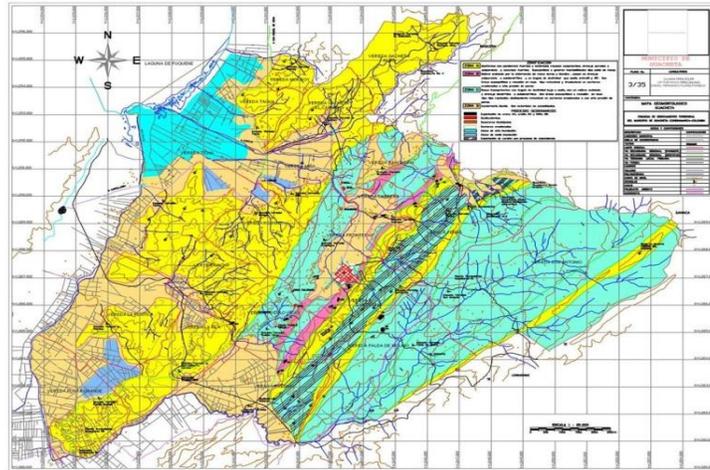


Fuente: (ALCALDIA DE GUACHETÁ, 2011)

El municipio se encuentra localizado en la cordillera oriental, en la cuenca hidrográfica de la Laguna de Fúquene y cuenta con los ríos: Ubaté y Quebrada Honda y las Quebradas: Miña, Chital, Barranquilla, Mojica, Salitre, Tagua, Farfán, Cabrera, Sutachin, Monroy. Está ubicado sobre 8 unidades geológicas que son: Cuaternario aluvial, Regadera, Bogotá, Areniscas del Cacho, Guaduas, Grupo Guadalupe, Grupo Chipaque, Areniscas de Chiquinquirá, de las formaciones geológicas resulta importante destacar la Formación Guaduas, caracterizada por la presencia de mantos de carbón, denominados específicamente TKg2, dentro de esta en el Bloque I, afloran 17 capas de carbón, con espesores promedios de 300 m, (Alcaldia., Universidad Distrital Fransisco Jose de Caldas, 2012-2023), que permiten la actividad económica de minería, además posee una topografía variada, muy quebrada pasando por laderas, colinas y abanicos hasta planicies y

terrazas, la explotación de las tierras está regida por la minería, la ganadería y agricultura (Flórez, 2000).

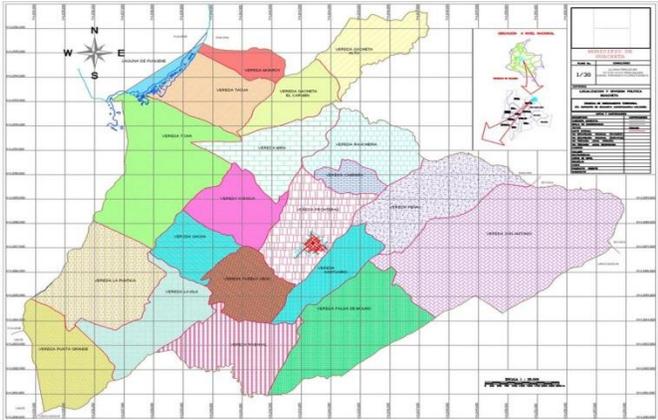
Figura 4. Mapa geográfico municipio de Guachetá



Fuente: (ALCALDIA DE GUACHETÁ, 2011)

El municipio presenta las divisiones administrativas tradicionales: el sector urbano con 4 barrios y 59 manzanas y el sector rural conformado por 20 veredas (Flórez, 2000).

Figura 5. Mapa geográfico municipio de Guachetá



Fuente: (ALCALDIA DE GUACHETÁ, 2011)

4.4 MARCO LEGAL

El marco legal específico en materia minería en Colombia, se encuentra definido por las siguientes leyes:

Tabla 3. Legislación Minera en Colombia

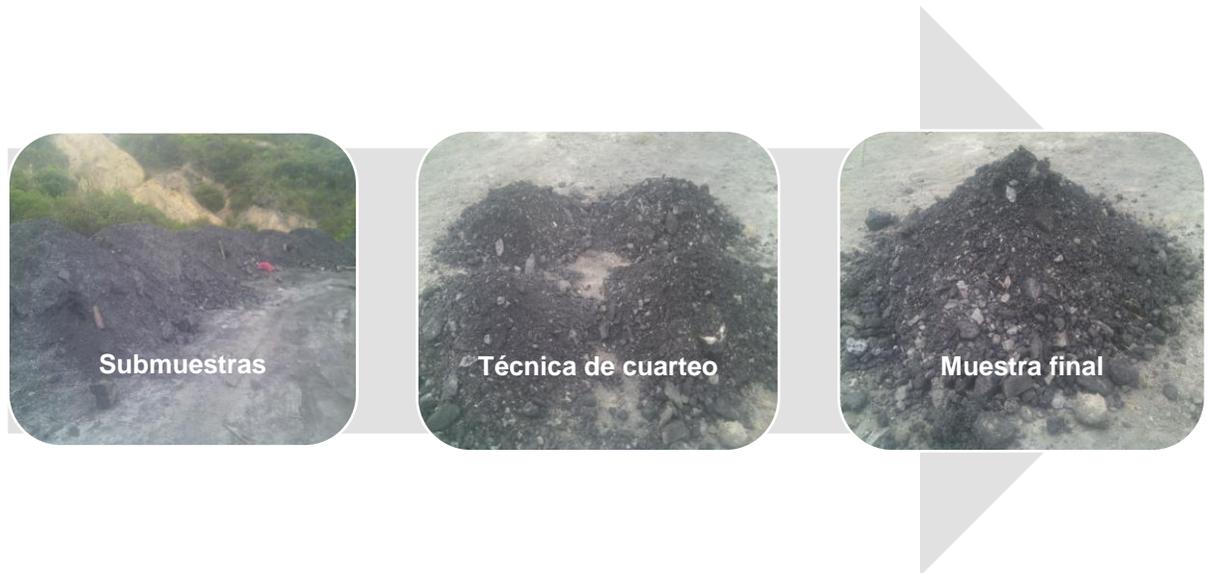
NORMA	Especificaciones
Ley 685/01, modificada por la Ley 1382/10	Código de Minas
Dec. 1335/87	Reglamento de Seguridad en las Labores Subterráneas
Dec. 2222/93	Reglamento de Higiene y Seguridad en las Labores Mineras a Cielo Abierto
Dec. 035 de 1994	Seguridad Minera
Dec 2656/88	Fondo de Fomento de Carbón
Ley 141/94	Creación de Fondo Nacional de Regalías
Dec. 2636/94	Explotaciones de Pequeña Minería
Dec. 501/95	Inscripción de Títulos Mineros en Registro Minero
Art. 8 del Dec. 2820/10	Licencias Ambientales otorgadas por Corporaciones Autónomas Regionales, Desarrollo Sostenible y los Grandes Centros Urbanos
Art. 20 del Dec. 1220/05	Estudio de Impacto Ambiental como instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos que requieren Licencia Ambiental

5. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ESTÉRIL

5.1 METODOLOGÍA

La muestra del material estéril fue tomada del botadero de la empresa PROMINCARG S.A.S, de la siguiente manera, primero se recolectaron submuestras de distintos montos del material que se habían dispuesto en el botadero y que eran provenientes de cuatro minas de carbón de la empresa, segundo las submuestras se mezclaron mediante la técnica de cuarteo y por último se recolecto la muestra final como se puede observar en la figura 6. En el laboratorio se analizaron las siguientes propiedades químicas y físicas del material estéril como si fuese un suelo: humedad, textura, pH, capacidad de cambio catiónico, Ca, Mg, K, Na, Al, bases totales, % saturación total (Sat. Ca, Sat. Mg, Sat. K, Sat. Na), materia orgánica (%C, %N), fósforo, elementos menores (B, Zn, Mn, Fe, Cu), este análisis se realiza con el fin de evaluar si este material que para la industria minera de carbón ha sido considerado como un residuo, contiene o no características que se asimilen a la de un suelo para así poderle dar otro tipo de uso.

Figura 6. Toma de muestra de estéril de carbón



Para el análisis físico-químico del material, se utilizaron como referencia los Métodos Analíticos de Laboratorio de Suelos (Instituto Geografico Agustin Codazzi, 2006), a continuación se especifican cada uno de los métodos y equipos que fueron requeridos para los análisis:

- Contenido de la humedad del suelo por método gravimétrico, para determinar la masa se utilizó una balanza electrónica, marca: Precisa, modelo: series XT120A y para el secado de la muestra un horno marca: Barnstead Thermolyne, modelo: Furnace 1300FB1315M.
- Textura del suelo por método de diagrama triangular de USDA
- Determinación del pH con peachímetro digital, marca: Hanna Instruments, modelo: pHep 3 tamaño bolsillo, relación 1:1 a 18°C.

- Capacidad de intercambio catiónico por método de acetato de amonio 1N, pH 7.0, (Ca, Mg) por método de complexometría y potasio sodio y aluminio, por el método de espectrofotometría de absorción atómica.
- Bases totales por método de desplazamiento con NH₄ Acético (acetato de amonio).
- Análisis de elementos menores (Fe, Mn, Cu, Zn, B) por el método de espectrofotometría de absorción atómica, equipo absorción atómica, marca: Perkin Elmer 303.
- Para el análisis de materia orgánica (% C) por método de Walkley-Black, (%N) por método Kjeldahl y fósforo admisible por Bray II

5.2 RESULTADOS

En la tabla 5, se evidencian los resultados de las propiedades físico-químicas del material que se analizaron en el laboratorio, suponiendo que presentara características de un suelo mineral se analizaron las siguientes propiedades.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del estéril de carbón

PROPIEDAD	RESULTADO	MÉTODO	UNIDAD
Humedad	3,89	Gravimetría	%
Textura	Franco Arenoso	Diagrama Triangular del USDA	
pH	5,5	pH metro	
Capacidad cambio catiónico	20.12	NH ₄ Acético	meq/100g
Calcio (Ca)	0,21	Complexometría	meq/100g
Magnesio (Mg)	0,19	Complexometría	meq/100g
Potasio (K)	0,22	Espectrofotometría de absorción atómica	meq/100g
Sodio (Na)	0,23	Espectrofotometría de absorción atómica	meq/100g
Aluminio (Al)	0,05	Espectrofotometría de absorción atómica	meq/100g
Bases totales	0,85	Desplazamiento con NH ₄ Acético	meq/100g
Saturación			
Saturación total	4.21	SUMATORÍA DE BASES * $\frac{100}{CCC}$	%
Saturación Ca	1.04	Calcio * $\frac{100}{CCC}$	%

Saturación Mg	0,94	Magnesio * $\frac{100}{CCC}$	%
Saturación K	1,09	Potasio * $\frac{100}{CCC}$	%
Saturación Na	1,14	Sodio * $\frac{100}{CCC}$	%
Materia orgánica			
Carbono (C)	0,10	Walkley - Black	%
Nitrógeno (N)	0,005	Kjeldahl	%
Fosforo admisible como (F ₂ O ₅)	50	Bray II	Kg/Hectárea
Elementos menores			
Boro (B)	0,31	Espectrofotometría de absorción atómica	ppm
Zinc (Zn)	0,40	Espectrofotometría de absorción atómica	ppm
Manganeso (Mn)	0,90	Espectrofotometría de absorción atómica	ppm
Hierro (Fe)	1,11	Espectrofotometría de absorción atómica	ppm
Cobre (Cu)	0,16	Espectrofotometría de absorción atómica	ppm

(meq/100g): miliequivalentes del catión por cada 100g de suelo seco.

(CCC): Capacidad Cambio Catiónico.

5.3 ANALISIS DE RESULTADOS

5.3.1 Humedad y granulometría

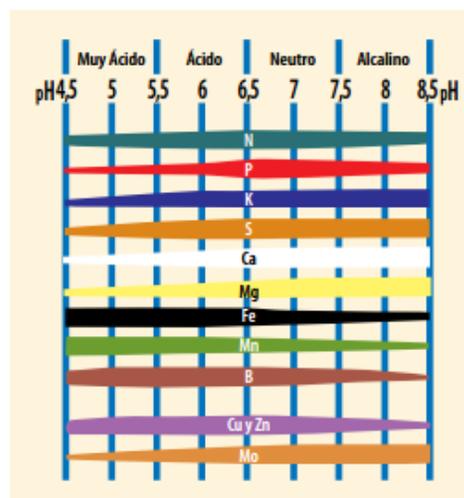
El contenido de humedad y la granulometría del suelo están directamente relacionadas, para el caso del estéril de carbón el valor del porcentaje de humedad fue de 3,9 % y presentó una composición característica de un sustrato de tipo franco arenoso. El resultado de la capacidad de retención de agua en la muestra es bajo y esto corresponde a que según la equivalencia granulométrica del estéril tiene un contenido de arena del 70%, que hace que sea un material más permeable y en el cual predominan partículas mayores de 0,02 mm de diámetro con presencia de macroporos que hacen que se retenga menos agua.

Como se mencionó anteriormente el contenido de arena del material estéril analizado fue del 70%, que incluye arenas finas con diámetro de 0,05mm a 0,5mm, y arenas gruesas con diámetro de 0,5mm a 2,0mm, el contenido de limo en el estéril fue del 10% con partículas de 0,002mm a 0,05mm y de arcilla un 20% con partículas de diámetros menores a 0,002mm, su alto contenido de arena, se debe a que es un material de desecho de la extracción del carbón en donde se retiran fracciones gruesas, arenas y gravas del subsuelo, esta composición le facilita el drenaje de agua y mayor flujo de aire.

5.3.2 pH

El valor del pH de la muestra de estéril que se analizó fue de 5,5 el cual se comporta como un sustrato ácido, según la figura 7, se observa que la disponibilidad de nutrientes está relacionada con el valor de pH, se puede indicar que para suelos ácidos el contenido de bases intercambiables (calcio, magnesio y potasio), es muy bajo y provoca que las actividades de los microorganismos se reduzca y el fósforo disponible en el suelo disminuya, sin embargo elementos como nitrógeno, molibdeno, azufre, hierro, cobre, zinc y boro se absorben mejor en este tipo de suelos, así que el material estéril tiene características de un suelo con deficiencia para absorber las bases intercambiables pero es capaz de absorber otros elementos.

Figura 7. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo



5.3.3 Capacidad de cambio catiónico, bases totales y saturación

Los sustratos con alto contenido de arena tienen un valor muy bajo de retención de cationes por parte de los iones de Ca, Mg, Na y K, lo cual indica deficiencia para absorber nutrientes. Para el estéril el resultado fue de 20,12 meq/100g, que corresponde a un suelo con alta cantidad de iones presentes en su superficie y con una alta capacidad de absorción de elementos catiónicos y por ende de nutrientes, lo que indica que en este material su alto contenido de arena no está relacionada con la presencia de los iones de Ca, Mg, Na y K.

Un suelo se considera nutritivo para el desarrollo de las plantas cuando contiene altas cantidades de iones de calcio, magnesio, sodio y potasio los cuales ejercen atracción sobre compuestos con cargas contrarias presentes en el suelo, los resultados de la cantidad de bases totales y saturación total en la muestra fueron: para bases 0,86 meq/100g y 4,2 %, para la saturación, ambos resultados indican 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.

La alta capacidad de intercambio catiónico en la muestra, puede deberse a que uno de los elementos que predomina en la composición del carbón mineral es el azufre y se puede contemplar que para el estéril también predomine. Una posible razón por la cual en la caracterización de la muestra esta propiedad tuvo un valor elevado, es porque en el análisis de dicha propiedad, se contemplan todos los

iones que contenga la muestra, incluyendo los iones de azufre que serían los que generaron que se incrementara ese resultado. El azufre también es considerado como uno de los elementos esenciales para la vida de las plantas, este resultado aportaría a que el material estéril se comportara como un suelo con mejor contenido nutricional.

5.3.4 Materia Orgánica

Esta propiedad tiene una influencia directa en la composición física y química del suelo, ya que mejora su estructura, contribuye a la retención del agua y a la capacidad de cambio catiónico de la superficie. El resultado del análisis de la muestra fue de 0,10%, que según la tabla 6, nos determina que el material tiene un bajo porcentaje de materia orgánica y que posee características de un suelo pobre para el desarrollo de las plantas cuyas propiedades químicas y físicas no son las adecuadas para usos agrícolas.

Tabla 5. Rangos de determinación de materia orgánica.

MATERIA ORGANICA EN SUELOS	
PORCENTAJE	DETERMINACION
<0,9	Muy Bajo
1,0 – 1,9	Bajo
2,0 – 2,5	Normal
2,6 – 3,5	Alto
>3,6	Muy alto

5.3.5 Elementos menores

Los microelementos que son considerados esenciales en los suelos son: B, Zn, Mn, Fe y Cu, estos elementos son importantes debido a que fortalecen el desarrollo vegetal, pero también porque su alto contenido genera problemas ambientales y limitaciones en el uso de los suelos para agricultura o ganadería. El resultado de las cantidades de microelementos de la muestra fueron los siguientes: Boro 0,31ppm (mg/L), Zinc 0,40ppm (mg/L), Manganeso 0,90ppm (mg/L), Hierro 1,11ppm (mg/L), Cobre 0,15ppm (mg/L), estas cantidades facilitan el crecimiento de pastos y forrajes y además no se encuentran dentro de los niveles críticos en los que se puedan presentar problemas de toxicidad para los seres vivos.

5.3.6 Fertilidad

Este análisis se hizo basado en la tabla de fertilidad del laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, a continuación se encuentran destacados en azul los resultados de cada una de las propiedades analizadas para la muestra, según el puntaje que se obtenga de cada una de estas propiedades, se calcula el puntaje final de fertilidad del material analizado.

Tabla 6. Fertilidad de suelos

pH	Determinación Apreciación Puntos	4.0 – 5.0 Muy ácido -5 a 1	5 – 5.5 Ácido 1 a 5	5.5 – 6.5 Lig. Ácido 5 a 15	6.5 – 7.5 Casi neutro 15	+7.5 Alcalino 15 a -5
Capacidad de Cambio Catiónico meq/100g	Determinación Apreciación Puntos	0 – 5 Muy baja -5 a 1	5 – 10 Baja 1 a 5	10 – 20 Mediana 5 a 10	20 – 30 Alta 10 a 20	+30 Muy alta 20
Bases totales me/100gr	Determinación Apreciación Puntos	0 – 1 Muy pobre -5 a 1	1 – 5 Pobre 1 a 5	5 – 10 Regular 5 a 10	10 – 30 Alta 10 a 20	+30 Muy alta 20
Saturación de Bases %	Determinación Apreciación Puntos	0 – 5 Muy baja -5 a 1	5 – 10 Baja 1 a 5	10 – 30 Mediana 5 a 10	30 – 60 Alta 10 a 20	+60 Muy alta 20
Carbono orgánico %	Determinación Apreciación Puntos	0 – 0.10 Muy pobre -3 a 1	0.10 – 0.15 Pobre 1 a 3	0.15 – 0.25 Normal 3 a 5	0.25 – 0.30 Alto 5	+0.30 Muy alto 5 a 1
Nitrógeno total %	Determinación Apreciación Puntos	0 – 0.10 Muy pobre -3 a 1	0.10 0.15 Pobre 1 a 3	0.15 – 0.25 Normal 3 a 5	0.25 – 0.30 Alto 5	+4.0 Muy alto 5 a 3
Fósforo Bray II P ₂ O ₅ kg/hect.	Determinación Apreciación Puntos	0 – 45 Muy pobre -5 a 1	45 – 90 Pobre 1 a 5	90 – 185 Regular 5 a 15	+185 Alto 15	+ 185 Alto 15
Fertilidad	Puntaje $\frac{S.puntos}{10}$ Apreciación	-5 a 2 Muy baja	3 a 5 baja	6 a 8 moderada	9 Moderadamente alta	10 alta

Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Según la asignación de puntos a cada una de las propiedades se calculó el valor de la fertilidad, que fue de 1.8 lo que corresponde a que el estéril tenga características de un suelo con muy bajo contenido de bases totales, carbono, nitrógeno, fósforo, un pH ácido y su alta capacidad de cambio catiónico no le es suficiente para alcanzar un buen rango de fertilidad.

6. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE INTEGRACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS AL MATERIAL ESTÉRIL

6.1 METODOLOGÍA

Se adecuó un vivero a una altura de 2.921 m.s.n.m, en el botadero de estéril propiedad de la empresa PROMINCARG LTDA, en el lugar se prepararon diferentes mezclas entre estéril y los materiales orgánicos que fueron estiércol bovino y micorrizas.

El tiempo del experimento fue de cuatro meses en los que se evaluaron dos variables: la primera fue el crecimiento semanal del pasto Ryegrass y la segunda el peso final de la biomasa foliar en base húmeda que se produjo en cada uno de los tratamientos.

Al finalizar con la etapa experimental en campo, se analizaron las propiedades de macronutrientes esenciales del suelo que son: potasio, fosforo y nitrógeno, la conductividad y el pH en cada uno de los tratamientos, este análisis se realizó in-situ por método colorimétrico.

6.1.1 Materiales del experimento

Para el experimento en campo la empresa proporcionó un vivero con un área de 72 m² y tres (3) camas de madera con un área aproximada de 2.07 m² cada una, los insumos que se utilizaron en la conformación de las mezclas fueron el material estéril de carbón (E), que fue recolectado del patio de acopio de la empresa PROMINCARG S.A.S, con coordenadas planas 1.045.809 E y 1.088.291 N, los materiales orgánicos fueron el estiércol bovino (Est), proveniente de una finca ganadera a 2 Km de distancia y las micorrizas (M), de la marca Micorrizar (registro de venta ICA No.3474) de la empresa El Semillero, las semillas utilizadas en el estudio fueron de trébol blanco (*Trifolium repens*) y Ryegrass perenne (*Lolium perenne*).

Figura 8. Adecuación del vivero



La incorporación de los hongos micorrizicos en la conformación de las mezclas del experimento, se incluyó debido a que estos tienen como principales funciones incrementar el desarrollo radicular de la planta y así aumentar la absorción de agua y nutrientes, una planta micorrizada puede explorar hasta 20 veces más volumen de suelo, que una planta sin micorrizas y mejorar la absorción de nutrientes como: P, Zn, S, Ca, Mo, B, su selección también se basó en los antecedentes encontrados acerca de su uso en la conformación de sustratos para fertilización de suelos de minería de carbón, los cuales se mencionan en el actual documento.

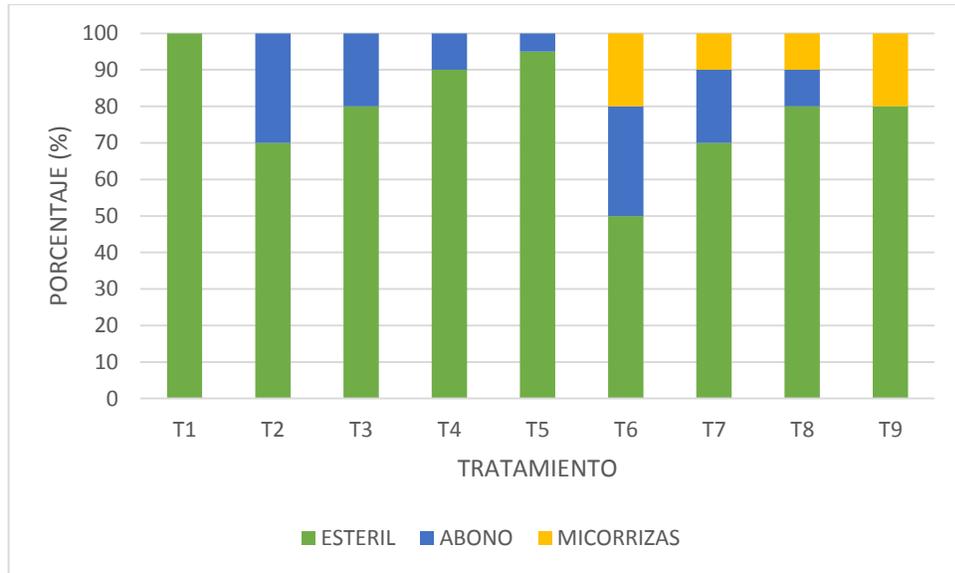
La incorporación de estiércol bovino a las mezclas se hizo con el fin de aportar materia orgánica y nutrientes como nitrógeno, fosforo y potasio, también se seleccionó porque es un insumo al que se puede tener un fácil acceso en la zona donde se llevó a cabo el experimento. El estiércol es considerado como un fertilizante inocuo y efectivo si se trata debidamente, es posible que contenga microorganismos patógenos que puedan contaminar los cultivos, la Administración de Alimentos y Drogas de Estados Unidos, recomienda “adoptar buenas prácticas agrícolas para reducir el riesgo microbiológico de contenido de (*Escherichia coli*), entre estas prácticas están los tratamientos pasivos y activos, los primeros se basan principalmente en el paso del tiempo y en factores ambientales, y los segundos implican mayor grado de gestión e inversión de recursos, entre estos la pasteurización, el secado por calor, la digestión anaeróbica, la estabilización con

álcalis, la digestión aeróbica, o una combinación de estos” (Food and Drug Administration, 1998).

6.1.2 Proporciones de mezclas

La adecuación del vivero se hizo con el fin de mantener las mismas condiciones ambientales para todos los tratamientos, en el experimento se conformaron nueve tratamientos con diferentes porcentajes de material estéril, estiércol y micorrizas, uno de estos compuesto en su totalidad por material estéril para ser evaluado como un blanco del proceso y los demás compuestos con altos porcentajes de material estéril, a cada tratamiento se le realizaron tres (3) repeticiones para un total de veintisiete combinaciones.

Figura 9. Composición de los tratamientos del experimento



6.1.3 Selección de forraje para la siembra

La selección de pasto rye grass perenne (*Lolium perenne*), se realizó teniendo en cuenta su adaptabilidad en zonas entre los 1800 y 3400 msnm, suelos con pH mayor de 5.5 y fertilidad media, además esta especie es una gramínea que posee un alto nivel nutricional para ser usada en la ganadería. La siembra de las semillas de trébol blanco (*Trifolium repens*), se escogió por sus características de establecimiento lento y progresivo con alto nivel nutricional ideal para pastoreo y adaptación en terrenos entre los 2.200 a 3200 msnm.

En el experimento las semillas de pasto rye grass y trébol blanco se sembraron combinadas para rye grass se usaron 17.962 g y trébol blanco 1.8072 g en cada una de las nueve combinaciones por triplicado, durante los cuatro meses de

duración de los ensayos se mantuvo un riego constante cada tercer día y se regó con 1L de agua al área de cada cajón de 0,23 m², el agua usada fue agua lluvia que se recolectaba en un tanque cercano.

Figura 10. Conformación de los tratamientos y siembra



6.2 RESULTADOS

6.2.1 Crecimiento de rye grass

A continuación se muestra evidencia fotográfica del progreso mensual de crecimiento de pasto rye grass en cada uno de los tratamientos, la siembra de las semillas de pasto y trébol fue realizada el 18 de Octubre de 2014.

Figura 11. Crecimiento de pasto en el primer mes



Figura 12. Crecimiento de pasto al segundo mes

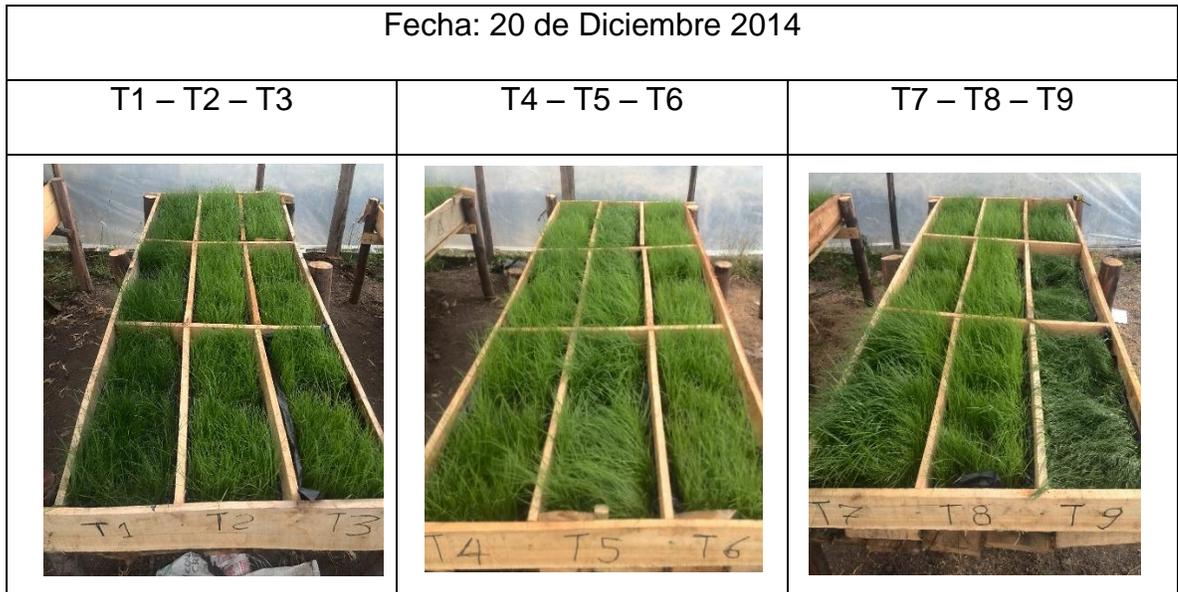


Figura 13. Crecimiento de pasto al tercer mes

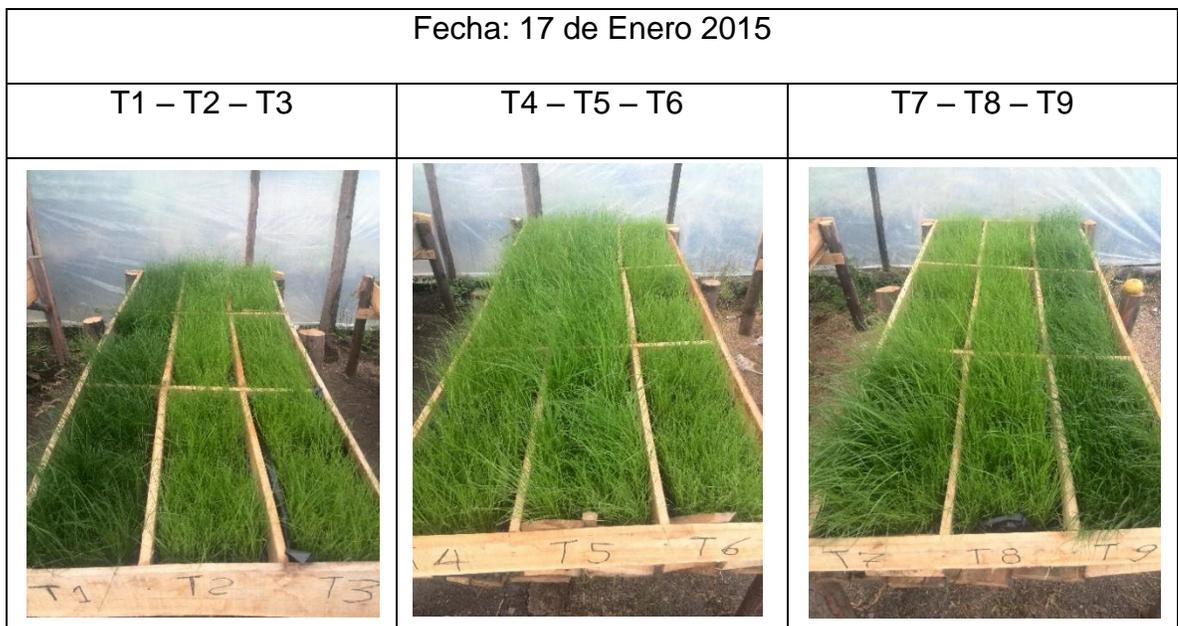
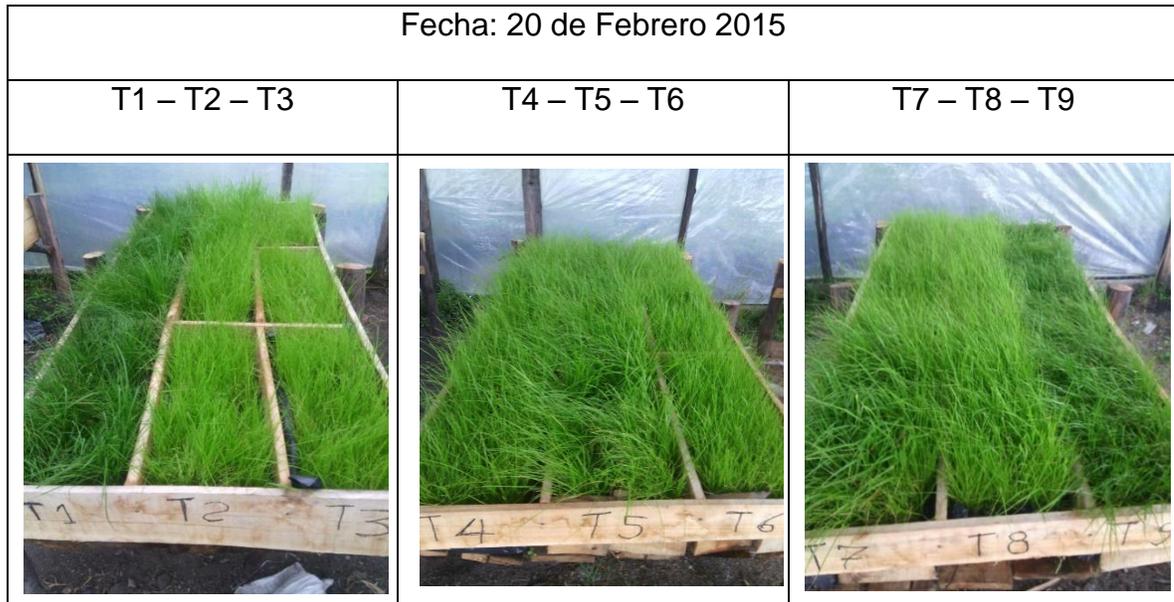


Figura 14. Crecimiento de pasto en el cuarto mes



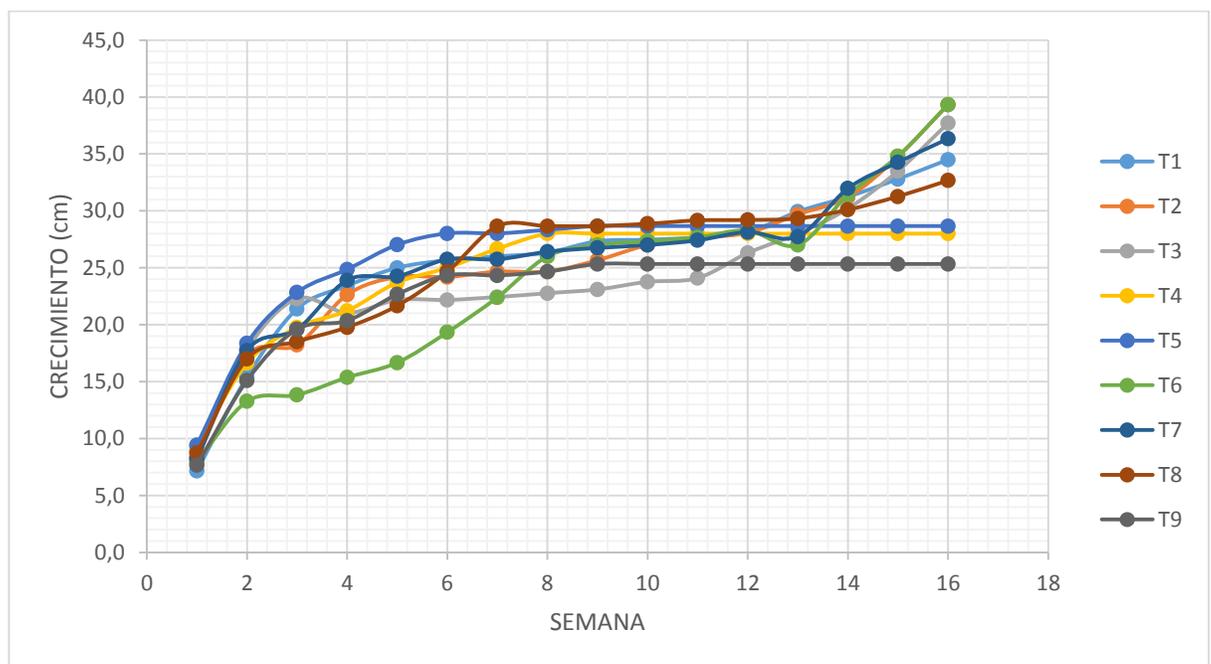
En las imágenes se evidencia cualitativamente el comportamiento de la variable de crecimiento del pasto rye grass durante los cuatro meses del experimento, se puede evidenciar que la germinación de las semillas de pasto fue efectiva en todos los tratamientos, independientemente de los porcentajes de mezcla de cada uno de estos.

En la figura 11, se observa que después del primer mes de la siembra de pasto, ya se había generado una cobertura vegetal homogénea en todos los sustratos que se conformaron y durante su progreso de crecimiento el pasto mantuvo una coloración verde como indicador de que las plantas estaban recibiendo los nutrientes necesarios para su producción.

En la figura 14, se puede observar que los tratamientos que lograron un mayor crecimiento fueron T7 y T8, en los cuales se combinaron los tres materiales estéril, estiércol y micorrizas, el primero con una composición porcentual de (70:30:20) y el segundo con (80:10:10).

A continuación se muestra gráficamente el crecimiento semanal de pasto en los nueve tratamientos durante las 16 semanas que duro el experimento. Los valores que se usaron para construir la gráfica fueron los datos del valor promedio de las 3 repeticiones de cada uno de los tratamientos.

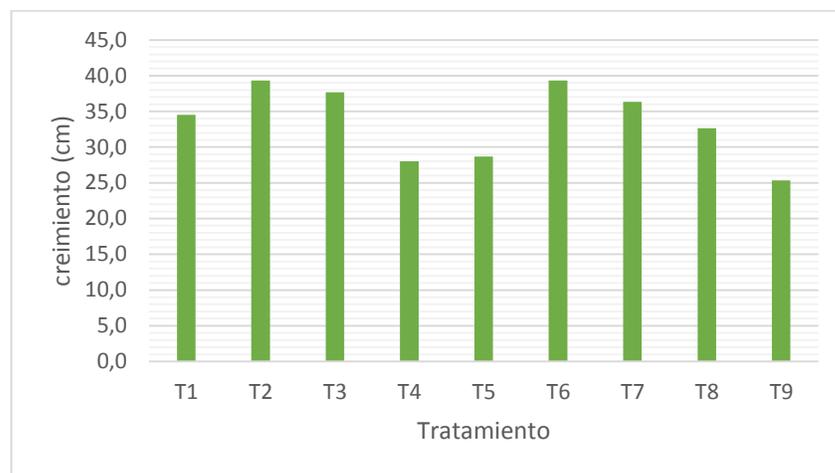
Figura 15. Crecimiento de rye grass semanalmente



En la figura 15, se observa que el comportamiento de la variable de crecimiento de las plantas fue incrementando con respecto al tiempo de duración del experimento, sin embargo se puede evidenciar que los tratamientos T9, T4 y T5

sufrieron un estancamiento en el crecimiento de las plantas desde el segundo mes. Los tratamientos T4 y T5 contenían los menores porcentajes de incorporación de materia orgánica, el primero con una mezcla de (90:10) y el segundo de (95:5) entre estéril y estiércol, con respecto a T9 fue la única mezcla que se hizo entre estéril y micorriza su relación fue de (80:20).

Figura 16. Crecimiento rye grass semana 16



El resultado de los tratamientos en los que se logró un mayor crecimiento final de la especie vegetal, según la figura 16, fueron T6, T2 y T3 con alturas promedio de 38,7 cm. El tratamiento T6 contenía el menor porcentaje de estéril usado en el experimento, su combinación fue de (50:30:20), sin embargo con T2 y T3 también se obtuvieron altos rendimientos de crecimiento vegetal y sus relaciones de mezcla contenían en su mayoría estéril al cual se le incorporo estiércol solamente.

La gráfica también demuestra que el crecimiento del pasto rye gras en el T1 estuvo por encima del crecimiento promedio de los nueve tratamientos 33,5 cm, ya que los pastos que se sembraron en el blanco del proceso alcanzaron los 34,5 cm

de altura, cabe resaltar que a este sustrato no se le incorporo ninguna cantidad de materiales orgánicos.

6.2.2 Biomasa

Las imágenes evidencian el proceso de corte y pesaje del material foliar el proceso se realizó a cada uno de los tratamientos para obtener los resultados de biomasa en base húmeda.

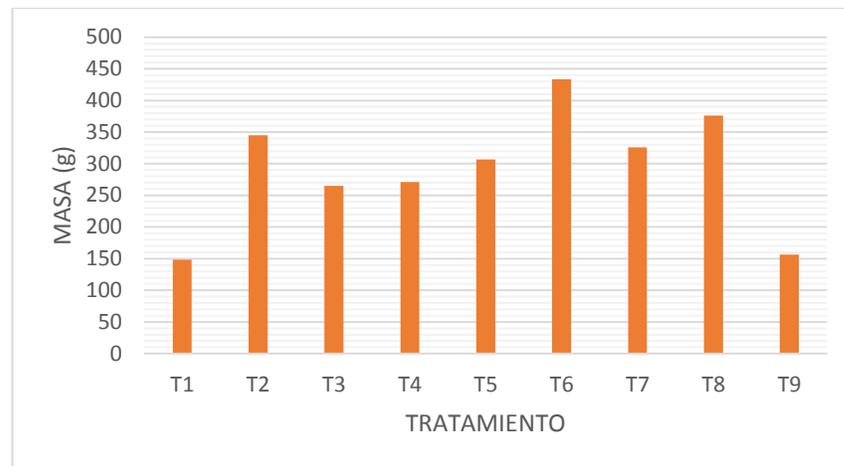
Figura 17. Proceso de corte y pesaje producción de biomasa



En la figura 17, se muestran los resultados promedio de la cantidad de biomasa que se produjo en cada uno de los tratamientos, según el gráfico, T2, T6 y T8 fueron los tratamientos en los cuales se produjo una mayor cantidad de biomasa, de estos resultados cabe resaltar que T8, era el que contenía un mayor porcentaje de material estéril (80%) y a aun así su producción de masa foliar fue muy alta con respecto a los demás tratamientos.

Los valores más bajos de producción de biomasa lo tuvieron los tratamientos T1 y T9, el primero compuesto por un 100% de estéril de carbón y el segundo con una relación de (80:20) entre estéril y micorrizas. Las mezclas con mayor producción de biomasa fueron T6, T2 y T8, que enriquecen notablemente a el material estéril haciendo que las plantas sembradas aprovechen la mayor cantidad de nutrientes disponibles y generen una masa foliar abundante.

Figura 18. Producción de Biomasa base húmeda



En la figura 18, se calculó la producción de biomasa de pasto por área, los valores de producción de biomasa son bastante altos por lo cual es importante tener en cuenta que en los cuatro meses que duro el experimento no se le realizo ningún corte y la toma del valor de biomasa se hizo al final, así que es difícil compararlo con los datos de producción de biomasa del rye grass establecidos por el proveedor del pasto , que en este caso es Impulsemillas, que establece que la producción normal de este tipo de pasto es de 100lbs/Ha con intervalos de corte de 40 a 45 días.

Tabla 7 , Producción de biomasa por área en cada tratamiento.

Tratamiento	Masa (gr)	Área (m ²)	Producción de biomasa (g/ m ²)
T1	148	0,70	212,2
T2	345	0,76	526,6
T3	265	0,64	411,6
T4	271	0,72	378,4
T5	307	0,77	458,3
T6	433	0,79	624,8
T7	326	0,70	489,5
T8	376	0,64	621,7
T9	157	0,64	245,7

El resultado de la cantidad de producción de biomasa por área es de gran utilidad, ya que sirve como una referencia para futuras recuperaciones de terrenos con el uso de cualquiera de los tratamientos que se evaluaron en la investigación.

6.2.3 Análisis in-situ a los tratamientos conformados en el experimento

Tabla 8. Análisis de elementos esenciales

Tratamiento	pH	T (°C)	Elementos		
			Potasio (K)	Fósforo (P)	Nitrógeno (N)
T1	5,4	17,6	Bajo	Np	Np
T2	7,06	18,6	Bajo	Medio	Medio
T3	7,91	18	Alto	Medio	Np
T4	7,04	17,2	Alto	Medio	Np
T5	6,59	18,4	Alto	Alto	Np
T6	7,24	17,9	Alto	Alto	Np
T7	6,88	17,8	Alto	Alto	Np
T8	6,52	18,1	Alto	Medio	Np
T9	5,19	17	Medio	Bajo	Np

Con el fin de evaluar el aporte nutricional que se logró con los modelos de incorporación de materiales orgánicos al material estéril, se realizó un análisis cuantitativo in-situ para medir la presencia de elementos esenciales en cada uno de los tratamientos. El pH del estéril mejoró notablemente gracias a las mezclas realizadas para la conformación de los sustratos, en la tabla 9, se observa que en la mayoría de los tratamientos esta propiedad tiene características de un sustrato con pH neutro, los cuales contienen una mayor disponibilidad de nutrientes. Con respecto a fosforo y potasio, se mejoró a una alta disponibilidad en la mayoría de tratamientos que contenían estiércol.

6.3 ANALISIS ESTADISTICO

El diseño experimental que se utilizó para comparar todos los tratamientos, fue de tipo completamente al azar balanceado, en el cual solo se consideran dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio. El objetivo del análisis es evaluar estadísticamente si existe o no diferencias significativas entre la composición de los nueve tratamientos y el resultado de las variables de crecimiento y biomasa.

El análisis de varianza o también conocido como ANOVA, se realizó con la herramienta Excel y las comparaciones o pruebas múltiples se obtuvieron mediante el uso de un software llamado IBM – SPSS STATISTICS.

6.3.1 Variable de crecimiento de pasto rye grass

Se investigó el efecto de la composición de los tratamientos sobre el crecimiento del pasto, para el análisis se supuso que además de la composición de los tratamientos no existe ningún otro factor que influya de manera significativa sobre la variable de respuesta (crecimiento de pasto).

Tabla 9. Datos de variable de crecimiento (cm)

Composición de tratamientos								
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
34,3	38,0	37,0	29,0	29,0	40,0	34,0	28,0	26,0
34,0	40,0	38,0	28,0	29,0	40,0	43,0	35,0	25,0
35,2	40,0	38,0	27,0	28,0	38,0	32,0	35,0	25,0

El interrogante que se planteó en el problema de comparación de los nueve tratamientos fue: ¿existen diferencias significativas entre los tratamientos y el promedio de crecimiento de pasto?, la respuesta a esta pregunta es el resultado de contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0 = T1 = T2 = T3 = T4 = T5 = T6 = T7 = T8 = T9$$

$$H_A = T1 \neq T2 \neq T3 \neq T4 \neq T5 \neq T6 \neq T7 \neq T8 \neq T9$$

Tabla 10. Tabla resumen ANOVA variable de crecimiento

ANALISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T1	3	103,5	34,50	0,390
T2	3	118	39,33	1,333
T3	3	113	37,67	0,333
T4	3	84	28,00	1,000
T5	3	86	28,67	0,333
T6	3	118	39,33	1,333
T7	3	109	36,33	34,333
T8	3	98	32,67	16,333
T9	3	76	25,33	0,333

Tabla 11. ANOVA del crecimiento de las plantas

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	646,296	8	80,787	13,048	4,63065E-06	2,510
Dentro de los grupos	111,447	18	6,191			
Total	757,743	26				

Con el ANOVA se identificó que si hay diferencias significativas del promedio crecimiento de las plantas dependiendo del tratamiento en el que sea sembrado, como el valor crítico para F (2,510) es menor que el F (13,048), se rechaza el Ho y

se acepta que los tratamientos tienen un crecimiento promedio diferente en cada uno de estos. El resultado anterior nos indicó que al menos en un tratamiento el crecimiento de pasto es diferente de otro.

Para evaluar las diferencias entre los tratamientos se utilizaron los métodos de comparaciones o prueba de rangos múltiples. A continuación se muestran los resultados de los subgrupos homogéneos entre tratamientos que arrojaron las pruebas duncan y tukey, la importancia de estas pruebas es que permiten identificar cual fue el mejor tratamiento en el comportamiento de la variable. El resultado de los subgrupos se forman a partir del análisis previo de comparaciones múltiples en donde cada tratamiento se compara con todos los tratamientos, véase en el Anexo 1.

Tabla 12. Subconjuntos homogéneos de la variable de crecimiento (cm)

Tratamiento	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
9,00	3	25,3333				
4,00	3	28,0000				
5,00	3	28,6667	28,6667			
8,00	3		32,6667	32,6667		
1,00	3			34,5000	34,5000	
7,00	3			36,3333	36,3333	36,3333
3,00	3				37,6667	37,6667
2,00	3					39,3333
6,00	3					39,3333

En los resultados de la tabla 13, se indicó el comportamiento de los valores de crecimiento de todos los tratamientos, gracias a la formación de los subgrupos se puede definir que en las dos pruebas: tukey y duncan, se coincide que los tratamientos en los que se generó un mayor de crecimiento de pasto fueron T6, T2, T3 y T7 ubicados en los últimos subgrupos de cada una de las pruebas, cabe resaltar que T1, se ubicó en uno de los subgrupos de alto valor de crecimiento.

6.3.2 Producción de biomasa

Para el análisis estadístico de esta propiedad se tuvo en cuenta la composición de las mezclas de todos los tratamientos y su efecto en la producción de biomasa.

Tabla 13. Datos de la variable de biomasa (g)

Composición de los tratamientos									
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	
145	345	260	278	320	420	328	376	150	
150	350	260	275	300	430	324	377	160	
150	340	275	260	300	450	325	375	160	

La pregunta que se planteó en el problema de comparación de los nueve tratamientos fue: ¿existen diferencias significativas entre los tratamientos y la producción de biomasa?, la respuesta a esta pregunta es el resultado de contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0 = T1 = T2 = T3 = T4 = T5 = T6 = T7 = T8 = T9$$

$$H_A = T1 \neq T2 \neq T3 \neq T4 \neq T5 \neq T6 \neq T7 \neq T8 \neq T9$$

Tabla 14. Resumen del análisis ANOVA de los datos de biomasa

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T1	3	445	148,3	8,3
T2	3	1035	345,0	25,0
T3	3	795	265,0	75,0
T4	3	813	271,0	93,0
T5	3	920	306,7	133,3
T6	3	1300	433,3	233,3
T7	3	977	325,7	4,3
T8	3	1128	376,0	1,0
T9	3	470	156,7	33,3

Tabla 15. ANOVA producción biomasa

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	213941,6	8	26742,7	396,7	1,24983E-18	2,51
Dentro de los grupos	1213,3	18	67,4			
Total	215155,0	26				

Con el análisis de varianza se identificó que si existen diferencias significativas de la producción de biomasa de las plantas según cada uno de los tratamientos, como el valor crítico para F (2,51) es menor que el F (396,7), la hipótesis H_A , se acepta y se confirma que la producción de biomasa tuvo un comportamiento

diferente según el tratamiento en el que la planta fue sembrada. El resultado anterior nos indica que al menos en un tratamiento el crecimiento de pasto es diferente de otro,

Para evaluar las diferencias significativas de la variable de producción de biomasa, entre los tratamientos se utilizaron los prueba de rangos múltiples. A continuación se muestran los resultados de los subgrupos homogéneos de tratamientos que arrojaron las pruebas duncan y tukey, el resultado de los subgrupos se forman a partir del análisis previo de comparaciones múltiples en donde cada uno de los tratamientos se compara con todos los tratamientos, véase en el Anexo

Tabla 16. Subconjuntos homogéneos de la variable de producción de biomasa

Biomasa						
Tratamientos	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
T1	3	148,3333				
T9	3	156,6667				
T3	3		265,0000			
T4	3		271,0000			
T5	3			306,6667		
T7	3			325,6667	325,6667	
T2	3				345,0000	
T8	3					376,0000
T6	3					

Tratamientos	Subconjunto
	6
DHS de Tukey ^{a,b}	T1
	T9
	T3
	T4
	T5
	T7
	T2
	T8
	T6
	433,3333

La evidencia que las diferencias entre tratamientos con respecto a la producción de biomasa fue muy alta, ya que por los nueve tratamientos a los que se hizo la prueba se formaron siete subconjuntos. El tratamiento T6 es el que presentó un mayor rendimiento en la producción de biomasa en el experimento de la investigación actual, además T8 y T2 también se ubicaron en los subgrupos de mayor producción de biomasa. El tratamiento que tuvo el menor valor de producción de biomasa fue T1.

**7. PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS PARA REVEGETALIZACIÓN
MEDIANTE EL USO DE ESTÉRILES DE CARBÓN EN SUELOS DE ZONAS
AFECTADAS POR LA MINERA EN EL MUNICIPIO DE GUACHETÁ**

Finalmente, se plantean dos estrategias para la revegetalización en suelos de zonas afectadas por la minería, mediante la integración de materiales orgánicos al material estéril de carbón, la primera para uso ganadero y la segunda recuperación paisajística.

**7.1 ESTRATEGIA DE REVEGETALIZACIÓN CON PASTOS PARA USO
GANADERO EN UN BOTADERO DE MATERIAL ESTÉRIL**

OBJETIVO

Garantizar la recuperación del acopio de estéril de carbón mediante revegetalización con siembra de pastos para el consumo de ganado.

LOCALIZACIÓN

El botadero se encuentra localizado en la vereda Peñas del municipio de Guachetá en las coordenadas E 1.046.281,00 y N 1.088.626,00, el terreno hace parte del título minero 887T, cuyo titular es la empresa PROMINCARG S.A.S.

INDICADOR DE EFICIENCIA DE LA RECUPERACION

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\text{area total recuperada}}{\text{area total de acopio}}$$

RESULTADOS ESPERADOS

Proporcionar de cobertura vegetal, preferiblemente especies de pasto que generen una alternativa de uso ganadero en los terrenos de acopio de material estéril, aprovechando la estabilidad geotécnica de los botaderos, cuando lleguen a su diseño final según (Geocivil Ingeniería S.A.S, 2011).

SELECCIÓN DE LA MEZCLA Y APLICACIÓN EN EL TERRENO

Los tratamientos recomendados para la realización de la estrategia son: T6, T8 y T2, que fueron los que presentaron mayores rendimientos en las dos variables que se evaluaron en la actual investigación, crecimiento y biomasa.

La aplicación de la mezcla seleccionada, se realizará en los últimos 20 cm, de la capa de nivelación de la conformación de los taludes.

CONDICIONES PARA IMPLEMENTACION

A continuación se presentan los pasos a seguir para el cumplimiento del objetivo contenido en la presente estrategia:

1. El acopio de materiales deberá llegar a su etapa final de diseño, para garantizar que en este sector no se volverán a realizar actividades de acopio de estéril de carbón. Adicional a lo anterior, el acopio deberá tener construidas y terminadas todas las obras de conformación de taludes, estructuras para manejo de aguas de escorrentías, bermas y/o vías de acceso a la zona.
2. Para las actividades de siembra de pastos, se contempla que esta sea realizada en periodos de lluvia, para así garantizar la disponibilidad de agua para el riego del suelo objeto de recuperación y una vez terminada la siembra del pasto, se debe garantizar la humectación del área total intervenida, para asegurar el crecimiento de pastos en la totalidad del acopio, así que será necesario el diseño de un sistema de riego constante.
3. Delimitar y/o identificar el área total para la realización de actividades de siembras de pastos. Lo anterior es indispensable para calcular el porcentaje de eficiencia de la estrategia evaluada.
4. La secuencia de siembra de pastos deberá realizarse desde la base de los acopios hasta la cota superior de este sitio. El tipo de pasto a ser

sembrado es el rye grass perenne combinado con trébol blanco que fue el que se evaluó en la investigación. Cabe aclarar, que los tipos de pastos y mezclas a ser utilizados en este tipo de actividades, fueron seleccionados para aportar con las medidas de estabilización de los taludes del acopio.

5. Realizar el seguimiento y medición mensual del área intervenida para la identificación de zonas con brotes de pasto y/o de sectores inertes.

RECOMENDACIONES

Para obtener el cumplimiento del indicador de eficiencia es pertinente considerar los siguientes factores técnicos relacionados con las condiciones del acopio y suelo objeto de la estrategia evaluada.

- Garantizar que el área a ser recuperada no va a ser utilizada para actividades de acopio de materiales.
- Una vez se identifiquen los sectores donde no brotó pasto, se deberá realizar de nuevo el procedimiento relacionado con la aplicación de la mezcla y siembra del pasto.
- Si en dado caso se evidencian sectores del acopio con problemas de estabilidad ya sea en taludes o bermas. Se recomienda restringir el tránsito de semovientes hasta que se realicen las actividades pertinentes de estabilización de la zona.

7.2 ESTRATEGIA DE REVEGETALIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE PASTO PARA RESTAURACIÓN PAISAJÍSTICA DE UN BOTADERO DE MATERIAL ESTÉRIL

OBJETIVO

Garantizar la restauración paisajística del acopio de estéril de carbón mediante la siembra de pasto y trébol.

LOCALIZACIÓN

El botadero se encuentra localizado en la vereda Peñas del municipio de Guachetá en las coordenadas E 1.046.281,00 y N 1.088.626,00, el terreno hace parte del título minero 887T, cuyo titular es la empresa PROMINCARG S.A.S.

INDICADOR DE EFICIENCIA DE LA RECUPERACIÓN

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\text{area total recuperada}}{\text{area total de acopio}}$$

RESULTADOS ESPERADOS

Proporcionar de cobertura vegetal, preferiblemente especies de pasto, que generen una recuperación paisajística en los terrenos de acopio de material estéril.

SELECCIÓN DE LA MEZCLA Y APLICACIÓN EN EL TERRENO

Para la aplicación de esta estrategia se puede dar uso a cualquiera de los tratamientos evaluados en el experimento, sin embargo no se recomiendan T9, T4 y T5, que fueron los que presentaron menores rendimientos en las dos variables que se evaluaron en la actual investigación, crecimiento y biomasa, la empresa podrá evaluar el costo de materiales de las mezclas para seleccionar el que más le convenga económicamente.

La aplicación de la mezcla seleccionada, se realizara en los últimos 20 cm, de la capa de nivelación de la conformación de los taludes. Si el tratamiento que se selecciona es T1, la siembra de pasto se hará directamente en la capa de nivelación del talud.

CONDICIONES PARA IMPLEMENTACIÓN

A continuación se presentan los pasos a seguir para el cumplimiento del objetivo

contenido en la presente estrategia:

1. El acopio de materiales deberá llegar a su etapa final de diseño, para garantizar que en este sector no se volverán a realizar actividades de acopio de estéril de carbón. Adicional a lo anterior, el acopio deberá tener construidas y terminadas todas las obras de conformación de taludes, estructuras para manejo de aguas de escorrentías, bermas y/o vías de acceso a la zona.
2. Para las actividades de siembra de pastos, se contempla que esta sea realizada en periodos de lluvia, para así garantizar la disponibilidad de agua para el riego del suelo objeto de recuperación y una vez terminada la siembra del pasto, se debe garantizar la humectación del área total intervenida, para asegurar el crecimiento de pastos en la totalidad del acopio, así que será necesario el diseño de un sistema de riego constante.
3. Delimitar y/o identificar el área total para la realización de actividades de siembras de pastos. Lo anterior es indispensable para calcular el porcentaje de eficiencia de la estrategia evaluada.
4. La secuencia de siembra de pastos deberá realizarse desde la base de los acopios hasta la cota superior de este sitio. El tipo de pasto a ser sembrado es el rye grass perenne combinado con trébol blanco que fue el que se evaluó en la investigación. Cabe aclarar, que los tipos de pastos y mezclas a ser utilizados en este tipo de actividades, fueron

seleccionados para aportar con las medidas de estabilización de los taludes del acopio.

5. Realizar el seguimiento y medición mensual del área intervenida para la identificación de zonas con brotes de pasto y/o de sectores inertes.

RECOMENDACIONES

Para obtener el cumplimiento del indicador de eficiencia es pertinente considerar los siguientes factores técnicos relacionados con las condiciones del acopio y suelo objeto de la estrategia evaluada.

- Garantizar que el área a ser recuperada no va a ser utilizada para actividades de acopio de materiales.
- Una vez se identifiquen los sectores donde no brotó pasto, se deberá realizar de nuevo el procedimiento relacionado con la aplicación de la mezcla y siembra del pasto.
- Si en dado caso se evidencian sectores del acopio con problemas de estabilidad ya sea en taludes o bermas. Se recomienda restringir el tránsito de semovientes hasta que se realicen las actividades pertinentes de estabilización de la zona.

8. CONCLUSIONES

- Según la caracterización fisicoquímica del material estéril, este contenía una deficiencia de nutrientes necesarios para el crecimiento de cualquier planta, sin embargo con el diseño experimental en el vivero, se evidenció que con el T1, compuesto de 100% estéril, se obtuvieron valores de crecimiento de pasto Ryegrass, por encima del promedio de todos los tratamientos, lo que puede deberse a su composición arenosa que permite la absorción de nutrientes.
- Si se puede realizar la revegetalización con cualquiera de los tratamientos, ya que en todas las mezclas se evidenció crecimiento y producción de biomasa de pasto Ryegrass.
- El tratamiento que tuvo los mayores rendimientos en las dos variables evaluadas: crecimiento y producción de biomasa, fue T6, que fue el tratamiento con menor porcentaje de estéril en la mezcla, con un 50%, que sigue siendo un valor representativo para generar las alternativas de uso del material.

- La implementación de cualquiera de las dos estrategias garantiza el aprovechamiento del estéril, como un material útil para la conformación de sustratos nutritivos en agricultura y ganadería.

9. RECOMENDACIONES

- El experimento demostró que en todas las mezclas que se conformaron y se sembró pasto y trébol, hubo germinación de las semillas, así que se puede recomendar cualquier tratamiento si lo que se quiere es obtener cobertura vegetal en algún terreno.
- Se espera que el actual estudio genere nuevos temas de investigación y se siga buscando una mejora en las prácticas de minería en el municipio de Guachetá y en el resto de país.
- Se recomienda evaluar el crecimiento de otras especies en los mismos tratamientos del actual estudio o que se innove tanto en generar nuevas composiciones de mezcla como en la siembra de nuevas especies vegetales.
- Se recomienda solarizar el estiércol para eliminar el riesgo de contaminación por microorganismos patógenos que puedan llegar a afectar la salud, para el proceso se necesita un plástico que no tenga albedo y que la pila de estiércol se caliente hasta los 60 grados.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALARCÓN, G. (2011). Efecto de los Parámetros Reológicos y Petrográficos del Carbón en la Calidad del Coque Metalúrgico . Bogotá D.C.

ALCALDIA DE GUACHETÁ. (13 de Julio de 2011). Sitio oficial de Guachetá en Cundinamarca, Colombia. Recuperado el 2 de Mayo de 2014, de http://www.guacheta-cundinamarca.gov.co/mapas_municipio.shtml?apc=bcxx-1-&x=2330701

ALCALDIA., UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS. (2012-2023). Documento Técnico de Soporte del Ajuste al Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Guachetá. Guachetá.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (1996 - 2014). ASTM International. Recuperado el 19 de Junio de 2014, de <http://www.astm.org/>

ÁVILA, E., & SOTO, A. (2012). Diseño de mezclas de concreto hidráulico con adición de estériles del carbón. L'esprit Ingénieur, 10-13.

BRITISH PETROLEUM COMPANY. (2011). Statistical Review of World Energy.

CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS. (Diciembre de 2011). Cedex Materiales. Recuperado el 17 de Febrero de 2014, de <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/281.pdf>

- CERREJON. (2011). Hacia la Rehabilitación de las Tierras Intervenidas por la Minería a Cielo Abierto. Cerrejon.
- FLÓREZ, D. P. (2000). Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Guachetá. Guachetá.
- FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. (26 de Octubre de 1998). Food and Drug Administration. (<http://www.fda.gov> consultado por última vez el 9 de septiembre 2015).
- GEOCIVIL INGENIERÍA S.A.S. (2011). Análisis de estabilidad geotécnica, evaluación de amenaza por procesos de remoción en masa y planteamiento de propuesta para solucionar las condiciones de inestabilidad en el botadero de la mina La Joya (Cisquera1105-P) Promincarg Ltda. Guachetá.
- GLENN, B. P. (2011). Coal and Peat: A Global Perspective. Amsterdam: Elsevier.
- GUADINA, M. (1999). Sistema Productivo del Carbon Mineral y sus Residuos. 71.
- HERMANN, F. W. (1998). Industrias Basadas en Recursos Naturales. En J. R. Armstrong, Enciclopedia de la Salud y del Trabajo, Vol III (pág. 102). España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Recuperado el 28 de Abril de 2014, de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/74.pdf>

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. (2006). Métodos Analíticos de laboratorios de Suelos. Bogota, D.C.: IGAC.

LI-PING, W. E. (2009). Fertilizing Reclamation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Coal Mine Complex Substrate. Science Direct, 1101-1106.

LLORENTE, M. (2000). Geología del carbon y del petroleo. Recuperado el 20 de 03 de 2014, de geologia del carbon y del petroleo: <http://www.ingenieroambiental.com/4017/geologia%20del%20petroleo.pdf>

MACIAS, F. (2004). Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de carbono. Una alternativa integral de mejora de la calidad ambiental. Recursos Rurais, 59-66.

MARBELLO, M., & TORRES, T. (2011). Impacto Ambiental del Carbon. Formando Investigadores, 42-46.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO Y CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS. (2002). Recuperado el 2 de Mayo de 2014, de <http://www.cepcos.es/Uploads/docs/Actualizacion%20del%20catalogo%20de%20residuos%20utilizables%20en%20construccion.pdf>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. (Agosto de 1998). Guia Ambiental de Minería Subterránea de Carbon. Recuperado el 16 de Febrero de 2014, de

http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_sub/indic_e.htm

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA. (2005). La Cadena del Carbón. Bogotá D.C: Oliver Díaz Iglesias.

PROMINCARG LTDA. (2012). Estudio de Impacto Ambiental. Guchetá.

PROYECTO DE ACUERDO GUACHETÁ. (27 de Noviembre de 2000). Esquema de Ordenamiento Territorial Guachetá. Recuperado el 17 de Febrero de 2014, de https://http://www.guacheta-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/64356366333630623438643939666133/ACUERDO_026_DE__2000.pdf

RIVERA, A., & RODRIGUEZ, O. (2010). Incorporacion de Sustratos Orgánicos a estériles producidos en minas de carbón, para la revegetalización en zonas de páramo. Avances, 63-68.

ROMERO, E. (2006). Recuperado el 02 de Mayo de 2014, de <http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Mineros.pdf>

STELLMAN, J. M. (1998). Enciclopedia de la Salud y Seguridad en el Trabajo, Vol 3. España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

TAHERI, W. B. (2010). Adaptation of Plants and Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Coal Tailings in Indiana. Elsevier, 138-143.

UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA. (2005). La Cadena del Carbón. Bogotá D.C: UPME.

UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA. (2006). Mercado Nacional e Internacional del Carbon Colombiano. Bogotá.

VÁSQUEZ, H. D. (2010). Carbón protagonista presente, pasado y futuro. Santiago: RIL editores.

WORLD COAL ASSOCIATION. (2005). The Coal Resource A Comprehensive Overview of Coal. Putney, London UK: Cambridge House.

WORLD ENERGY COUNCIL. (2010). Survey of Energy Resources. Londres: World Energy Council.

Anexo 1. Comparaciones múltiples datos de crecimiento

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Altura

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
					Límite inferior	Límite superior
DMS	2,00	-4,8333	2,03166	,029	-9,1017	-,5650
	3,00	-3,1667	2,03166	,136	-7,4350	1,1017
	4,00	6,5000	2,03166	,005	2,2316	10,7684
	5,00	5,8333	2,03166	,010	1,5650	10,1017
	6,00	-4,8333	2,03166	,029	-9,1017	-,5650
	7,00	-1,8333	2,03166	,379	-6,1017	2,4350
	8,00	1,8333	2,03166	,379	-2,4350	6,1017
	9,00	9,1667	2,03166	,000	4,8983	13,4350
	1,00	4,8333	2,03166	,029	,5650	9,1017
	3,00	1,6667	2,03166	,423	-2,6017	5,9350
	4,00	11,3333	2,03166	,000	7,0650	15,6017
	5,00	10,6667	2,03166	,000	6,3983	14,9350
	6,00	,0000	2,03166	1,000	-4,2684	4,2684
	7,00	3,0000	2,03166	,157	-1,2684	7,2684
	8,00	6,6667	2,03166	,004	2,3983	10,9350
	9,00	14,0000	2,03166	,000	9,7316	18,2684
	1,00	3,1667	2,03166	,136	-1,1017	7,4350
	2,00	-1,6667	2,03166	,423	-5,9350	2,6017
	4,00	9,6667	2,03166	,000	5,3983	13,9350
	5,00	9,0000	2,03166	,000	4,7316	13,2684
	6,00	-1,6667	2,03166	,423	-5,9350	2,6017
	7,00	1,3333	2,03166	,520	-2,9350	5,6017
	8,00	5,0000	2,03166	,024	,7316	9,2684
	9,00	12,3333	2,03166	,000	8,0650	16,6017

4,00	1,00	-6,5000	2,03166	,005	-10,7684	-2,2316
	2,00	-11,3333	2,03166	,000	-15,6017	-7,0650
	3,00	-9,6667	2,03166	,000	-13,9350	-5,3983
	5,00	-,6667	2,03166	,747	-4,9350	3,6017
	6,00	-11,3333	2,03166	,000	-15,6017	-7,0650
	7,00	-8,3333	2,03166	,001	-12,6017	-4,0650
	8,00	-4,6667	2,03166	,034	-8,9350	-,3983
	9,00	2,6667	2,03166	,206	-1,6017	6,9350
	5,00	1,00	-5,8333	2,03166	,010	-10,1017
2,00		-10,6667	2,03166	,000	-14,9350	-6,3983
3,00		-9,0000	2,03166	,000	-13,2684	-4,7316
4,00		,6667	2,03166	,747	-3,6017	4,9350
6,00		-10,6667	2,03166	,000	-14,9350	-6,3983
7,00		-7,6667	2,03166	,001	-11,9350	-3,3983
8,00		-4,0000	2,03166	,065	-8,2684	,2684
9,00		3,3333	2,03166	,118	-,9350	7,6017
6,00		1,00	4,8333	2,03166	,029	,5650
	2,00	,0000	2,03166	1,000	-4,2684	4,2684
	3,00	1,6667	2,03166	,423	-2,6017	5,9350
	4,00	11,3333	2,03166	,000	7,0650	15,6017
	5,00	10,6667	2,03166	,000	6,3983	14,9350
	7,00	3,0000	2,03166	,157	-1,2684	7,2684
	8,00	6,6667	2,03166	,004	2,3983	10,9350
	9,00	14,0000	2,03166	,000	9,7316	18,2684
	7,00	1,00	1,8333	2,03166	,379	-2,4350
2,00		-3,0000	2,03166	,157	-7,2684	1,2684
3,00		-1,3333	2,03166	,520	-5,6017	2,9350
4,00		8,3333	2,03166	,001	4,0650	12,6017
5,00		7,6667	2,03166	,001	3,3983	11,9350
6,00		-3,0000	2,03166	,157	-7,2684	1,2684

	8,00	3,6667	2,03166	,088	-,6017	7,9350
	9,00	11,0000	2,03166	,000	6,7316	15,2684
	1,00	-1,8333	2,03166	,379	-6,1017	2,4350
	2,00	-6,6667	2,03166	,004	-10,9350	-2,3983
	3,00	-5,0000	2,03166	,024	-9,2684	-,7316
8,00	4,00	4,6667	2,03166	,034	,3983	8,9350
	5,00	4,0000	2,03166	,065	-,2684	8,2684
	6,00	-6,6667	2,03166	,004	-10,9350	-2,3983
	7,00	-3,6667	2,03166	,088	-7,9350	,6017
	9,00	7,3333	2,03166	,002	3,0650	11,6017
	1,00	-9,1667	2,03166	,000	-13,4350	-4,8983
	2,00	-14,0000	2,03166	,000	-18,2684	-9,7316
	3,00	-12,3333	2,03166	,000	-16,6017	-8,0650
9,00	4,00	-2,6667	2,03166	,206	-6,9350	1,6017
	5,00	-3,3333	2,03166	,118	-7,6017	,9350
	6,00	-14,0000	2,03166	,000	-18,2684	-9,7316
	7,00	-11,0000	2,03166	,000	-15,2684	-6,7316
	8,00	-7,3333	2,03166	,002	-11,6017	-3,0650

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 6,191.

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

Anexo 2. Comparaciones múltiples datos de biomasa

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Biomasa

	(I)Tratamientos	(J)Tratamientos	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%		
						Límite inferior	Límite superior	
DHS de Tukey	T1	T2	-196,6667 [*]	6,70360	,000	-220,1552	-173,1782	
		T3	-116,6667 [*]	6,70360	,000	-140,1552	-93,1782	
		T4	-122,6667 [*]	6,70360	,000	-146,1552	-99,1782	
		T5	-158,3333 [*]	6,70360	,000	-181,8218	-134,8448	
		T6	-285,0000 [*]	6,70360	,000	-308,4885	-261,5115	
		T7	-177,3333 [*]	6,70360	,000	-200,8218	-153,8448	
		T8	-227,6667 [*]	6,70360	,000	-251,1552	-204,1782	
		T9	-8,33333	6,70360	,935	-31,8218	15,1552	
		T1	196,6667 [*]	6,70360	,000	173,1782	220,1552	
	T2	T3	80,0000 [*]	6,70360	,000	56,5115	103,4885	
		T4	74,0000 [*]	6,70360	,000	50,5115	97,4885	
		T5	38,3333 [*]	6,70360	,001	14,8448	61,8218	
		T6	-88,3333 [*]	6,70360	,000	-111,8218	-64,8448	
		T7	19,33333	6,70360	,158	-4,1552	42,8218	
		T8	-31,0000 [*]	6,70360	,005	-54,4885	-7,5115	
		T9	188,3333 [*]	6,70360	,000	164,8448	211,8218	
		T3	T1	116,6667 [*]	6,70360	,000	93,1782	140,1552
			T2	-80,0000 [*]	6,70360	,000	-103,4885	-56,5115
	T4		-6,0000	6,70360	,990	-29,4885	17,4885	
	T5		-41,6667 [*]	6,70360	,000	-65,1552	-18,1782	
	T6		-168,3333 [*]	6,70360	,000	-191,8218	-144,8448	
	T7		-60,6667 [*]	6,70360	,000	-84,1552	-37,1782	
			T8	-111,0000 [*]	6,70360	,000	-134,4885	-87,5115

	T9	108,3333	6,70360	,000	84,8448	131,8218
	T1	122,6667	6,70360	,000	99,1782	146,1552
	T2	-74,0000	6,70360	,000	-97,4885	-50,5115
	T3	6,0000	6,70360	,990	-17,4885	29,4885
T4	T5	-35,6667	6,70360	,001	-59,1552	-12,1782
	T6	-162,3333	6,70360	,000	-185,8218	-138,8448
	T7	-54,6667	6,70360	,000	-78,1552	-31,1782
	T8	-105,0000	6,70360	,000	-128,4885	-81,5115
	T9	114,3333	6,70360	,000	90,8448	137,8218
	T1	158,3333	6,70360	,000	134,8448	181,8218
	T2	-38,3333	6,70360	,001	-61,8218	-14,8448
	T3	41,6667	6,70360	,000	18,1782	65,1552
T5	T4	35,6667	6,70360	,001	12,1782	59,1552
	T6	-126,6667	6,70360	,000	-150,1552	-103,1782
	T7	-19,0000	6,70360	,172	-42,4885	4,4885
	T8	-69,3333	6,70360	,000	-92,8218	-45,8448
	T9	150,0000	6,70360	,000	126,5115	173,4885
	T1	285,0000	6,70360	,000	261,5115	308,4885
	T2	88,3333	6,70360	,000	64,8448	111,8218
	T3	168,3333	6,70360	,000	144,8448	191,8218
T6	T4	162,3333	6,70360	,000	138,8448	185,8218
	T5	126,6667	6,70360	,000	103,1782	150,1552
	T7	107,6667	6,70360	,000	84,1782	131,1552
	T8	57,3333	6,70360	,000	33,8448	80,8218
	T9	276,6667	6,70360	,000	253,1782	300,1552
	T1	177,3333	6,70360	,000	153,8448	200,8218
	T2	-19,3333	6,70360	,158	-42,8218	4,1552
T7	T3	60,6667	6,70360	,000	37,1782	84,1552
	T4	54,6667	6,70360	,000	31,1782	78,1552
	T5	19,0000	6,70360	,172	-4,4885	42,4885

T8	T6	-107,6667	6,70360	,000	-131,1552	-84,1782
	T8	-50,3333	6,70360	,000	-73,8218	-26,8448
	T9	169,0000	6,70360	,000	145,5115	192,4885
	T1	227,6667	6,70360	,000	204,1782	251,1552
	T2	31,0000	6,70360	,005	7,5115	54,4885
	T3	111,0000	6,70360	,000	87,5115	134,4885
	T4	105,0000	6,70360	,000	81,5115	128,4885
	T5	69,3333	6,70360	,000	45,8448	92,8218
	T6	-57,3333	6,70360	,000	-80,8218	-33,8448
T9	T7	50,3333	6,70360	,000	26,8448	73,8218
	T9	219,3333	6,70360	,000	195,8448	242,8218
	T1	8,3333	6,70360	,935	-15,1552	31,8218
	T2	-188,3333	6,70360	,000	-211,8218	-164,8448
	T3	-108,3333	6,70360	,000	-131,8218	-84,8448
	T4	-114,3333	6,70360	,000	-137,8218	-90,8448
	T5	-150,0000	6,70360	,000	-173,4885	-126,5115
	T6	-276,6667	6,70360	,000	-300,1552	-253,1782
	T7	-169,0000	6,70360	,000	-192,4885	-145,5115
	T8	-219,3333	6,70360	,000	-242,8218	-195,8448

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 67,407.

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

