



EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN
GRUPOS FUNCIONALES FÚNGICOS DE SUELO DE EXPLOTACIÓN
LADRILLERA DE ARCILLA (COGUA, CUNDINAMARCA)

UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ D.C., 2024-1



EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN
GRUPOS FUNCIONALES FÚNGICOS DE SUELO DE EXPLOTACIÓN
LADRILLERA DE ARCILLA (COGUA, CUNDINAMARCA)

ESTUDIANTE

JANIS NICOLLE PINILLA BLANCO

ASESOR EXTERNO

AMANDA VARELA RAMIREZ, Ph.D.

ASESOR INTERNO

JOHANNA MARCELA MOSCOSO GAMA, M.Sc.

UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ D.C., 2024-1

DEDICATORIA

A su amistad que hizo de toda esta travesía algo inolvidable.

A la doctora Amanda Varela, por su conocimiento, orientación y apoyo constante.

A las Universidades que permitieron que este proyecto se hiciera realidad, junto a las personas maravillosas con quienes compartimos el camino.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a la vida por permitirme llegar hasta aquí, por obsequiarme tanto conocimiento a lo largo de estos años y sobre todo por cruzarme con personas tan sabias, dedicadas y bondadosas en el trayecto.

A mi mamá por regalarme la oportunidad de estudiar, por ser un gran ejemplo y por recordarme que no hay sueños imposibles. También a mi familia por ofrecerme su apoyo incondicional, por ser mi mayor motivación y por impulsarme a cumplir mis metas. A mis abuelas por su inmenso amor, a Marcela y Sara por brindarme un hogar, por ayudarme en este proceso y por hacerme una mejor persona.

Le agradezco especialmente a Paula, Andrés, Alejandra y Juliana por ser una luz en mi vida, nada de esto sería posible sin su apoyo constante, su grata compañía, su inmensa paciencia y su amor. Hicieron mi experiencia universitaria algo memorable, les llevaré siempre conmigo.

Le debo una gratitud incalculable a los docentes que me brindaron de su conocimiento a lo largo de la carrera. En especial a la doctora Amanda Varela por guiarnos, enseñarnos, comprendernos en cada paso de este proyecto y a maestra Johanna Moscoso por creer en nosotros desde el principio y acompañarnos en cada altibajo del camino.

A la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca por permitirme la entrada a sus aulas y laboratorios para formarme como profesional, a la Pontificia Universidad Javeriana por abrirnos las puertas del Laboratorio de Ecología de Suelos y Hongos Tropicales y permitirnos participar en esta investigación.

Tabla de Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	0
Palabras clave	0
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS	4
2.1. GENERAL	4
2.2. ESPECÍFICOS	4
3. ANTECEDENTES	5
4. MARCO REFERENCIAL	8
4.1. Grupos funcionales microbianos	8
4.2. Hongos proteolíticos	9
4.3. Hongos ligninolíticos	9
4.4. Hongos solubilizadores de potasio	10
4.5. Ciclos biogeoquímicos	10
4.5.1. Ciclo del nitrógeno	10
4.5.2. Ciclo del carbono	10
4.5.3. Ciclo del fósforo	11
4.5.4. Ciclo del potasio	11
4.6. Grupos funcionales y ciclos biogeoquímicos	11
4.7. Enmiendas orgánicas	12
4.7.1. Biochar	13
4.7.2. Compost	13
4.7.3. Microorganismos eficientes	14
4.8. Explotación ladrillera	14
4.9. Recuperación, restauración y rehabilitación.	15
5. DISEÑO METODOLÓGICO	16
5.1. UNIVERSO	16
5.2. POBLACIÓN	16
5.3. MUESTRA	16
5.4. TAMAÑO DE LA MUESTRA	16
5.5. HIPÓTESIS	16
5.6. VARIABLES	17
5.7. INDICADORES	17
5.8. ZONA DE ESTUDIO	17
5.8.1. Montaje experimental	18
5.8.2. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS	20
5.8.2.1. pH	20
5.8.2.2. Humedad	20

5.8.2.3. Materia orgánica	21
5.8.2.4. Densidad aparente	21
5.8.2.5. Densidad real	22
5.8.2.6. Tamaño de agregados	22
5.8.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE GRUPOS FUNCIONALES	23
5.8.4. Análisis estadísticos	25
6. RESULTADOS	25
6.1. Resultados experimentales	25
6.2. Análisis fisicoquímicos	26
6.2.1. pH	26
6.2.2. Humedad	27
6.2.3. Materia orgánica	27
6.2.4. Densidad real y aparente del suelo	30
6.2.5. Distribución de tamaño de agregados	30
6.3. Densidad grupos funcionales microbianos	31
6.3.1. Hongos proteolíticos	32
6.3.2. Hongos ligninolíticos	32
6.3.3. Hongos solubilizadores de potasio	32
6.4. Pruebas de correlación	35
7. DISCUSIÓN	36
CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación y ubicación de las parcelas

Figura 2. Metodología realizada para determinación densidad microbiana

Figura 3. Resultados variables fisicoquímicas

Figura 4. Resultados textura

Figura 5. Hongos aislados

Figura 6. Resultados Densidad de tamaño de agregados

Figura 7. Resultados densidad grupos funcionales evaluados

Figura 8. Resultados de las pruebas de correlación entre pH y los grupos funcionales.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Organización de las parcelas con los tratamientos aplicados.

Tabla 2. Pruebas de correlación entre parámetros fisicoquímicos y densidad microbiana de los tres grupos funcionales.

RESUMEN

La producción ladrillera en Colombia representa un ingreso fundamental a la economía; no obstante, esta actividad genera una serie de cambios en la estructura del suelo, vida útil y destrucción de los horizontes superficiales. Creando la necesidad de documentar procesos de recuperación con la aplicación de compuestos orgánicos poco utilizados de forma individual y en mezcla, suplementados con microorganismos eficientes enfocados a la mejora de las propiedades del suelo. Por medio de esta investigación se busca evaluar el efecto de enmiendas orgánicas: biochar, compost, mezcla (50% biochar, 50% compost) y microorganismos eficientes (EM), mediante la determinación de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los grupos funcionales de hongos proteolíticos, ligninolíticos y solubilizadores de potasio en poco tiempo. El montaje experimental constó de 20 parcelas ubicadas aleatoriamente, de tal manera que cada enmienda se aplicó en cinco parcelas. La recolección de las muestras se realizó en el primer, segundo, cuarto y séptimo mes después de su aplicación. Estas muestras se analizaron en el Laboratorio de Ecología de Suelos y Hongos Tropicales de la Pontificia Universidad Javeriana. Se encontró que la densidad de hongos ligninolíticos mostró diferencias significativas en la recuperación ($p > 0,05$), sugiriendo que pueden ser considerados como un indicador temprano de cambios en los tratamientos aplicados sobre el suelo. Por su parte, las características del suelo no mostraron recuperación con los tratamientos aplicados en ese lapso, indicando que posiblemente con un tiempo mayor de siete meses se podría mejorar la interacción benéfica entre los tratamientos aplicados y el suelo destinado a la explotación ladrillera.

Palabras clave

Enmiendas orgánicas, explotación ladrillera, grupos funcionales, microorganismos eficientes, recuperación.

ABSTRACT

Brick production in Colombia represents a fundamental income to the economy; However, this activity generates a series of changes in the soil structure, useful life and destruction of the surface horizons. Creating the need to document recovery processes with the application of little-used organic compounds individually and in mixtures, supplemented with efficient microorganisms focused on improving soil properties. Through this research, we seek to evaluate the effect of organic amendments: biochar, compost, mixture (50% biochar, 50% compost) and efficient microorganisms (EM), by determining the physicochemical and microbiological properties of the functional groups of proteolytic fungi, ligninolytic and potassium solubilizers in a short time. The experimental setup consisted of 20 randomly located plots, such that each amendment was applied to five plots. Samples were collected in the first, second, fourth and seventh months after application. These samples were analyzed at the Laboratory of Soil Ecology and Tropical Fungi of the Pontificia Universidad Javeriana. It was found that the density of ligninolytic fungi showed significant differences in recovery ($p > 0,05$), suggesting that they can be considered as an early indicator of changes in the treatments applied to the soil. For its part, the characteristics of the soil did not show recovery with the treatments applied in that period, indicating that possibly with a time longer than seven months the beneficial interaction between the treatments applied and the soil destined for brick exploitation could be improved.

Keywords

Organic amendments, brick exploitation, functional groups, efficient microorganisms, recovery.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural finito y no renovable que presta diversos servicios ecosistémicos o ambientales. Su composición es bastante diversa, está formado por: minerales, materia orgánica, microorganismos, aire, agua, entre otros ¹. Está directamente relacionado con ciclos biogeoquímicos esenciales para la vida y a su vez es el asiento natural para la producción de alimentos y materias primas de los cuales depende la sociedad ². De modo que cualquier cambio o actividad que se realice en él, conlleva implicaciones ambientales y microbiológicas a largo plazo.

Dentro de las principales actividades que se realizan en el suelo se encuentra la minería ladrillera, que a su vez representa una parte fundamental de la economía en el municipio de Cogua, Cundinamarca ³. De hecho, la extracción de arcilla para la manufactura de ladrillos genera un considerable costo-beneficio a corto plazo. Sin embargo, provoca afectaciones ambientales a gran escala, que a largo plazo disminuirían la calidad en la producción y a su vez pérdidas económicas ⁴. El ciclo productivo de arcilla que se realiza en Colombia inicia por la preparación del terreno y extracción de ésta, generando efectos nocivos para el medio ambiente, impactando la calidad del aire, suelo y fuentes hídricas cercanas al lugar de explotación. Asimismo, los horizontes superficiales del suelo quedan eliminados, reduciendo así la oferta de bienes y servicios ecosistémicos que nos brindan ⁵.

Las comunidades microbianas y fúngicas presentes en el suelo ofrecen una variedad de servicios ecosistémicos como, por ejemplo: la degradación de la materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la interacción entre raíces, plantas y microorganismos ⁶. De esta manera los grupos funcionales microbianos conformados principalmente por bacterias y hongos resultan importantes al momento de evaluar la calidad del suelo debido a que responden de manera sensible a las alteraciones causadas ⁷. Igualmente, el uso del suelo puede influir en las características fisicoquímicas relacionadas con la textura, humedad, pH, materia orgánica y nutrientes tales como C, N, P y K, que también pueden provocar modificaciones en la estructura y función tanto de las bacterias como de los hongos ⁸.

Existen ciclos biológicos que se producen en el suelo, principalmente la dinámica del

carbono y del nitrógeno que están orientadas a procesos de fijación, mineralización o inmovilización que entre otras cosas dependen de la cantidad y actividad de los microorganismos que componen la microbiota del suelo⁹. Es decir que la estructura de las comunidades microbianas es un factor clave que controla la velocidad de la mineralización de cada sustrato¹⁰.

En este sentido se pueden utilizar grupos funcionales de microorganismos como bioindicadores para evaluar disturbios en el suelo y su posible recuperación. Los grupos funcionales considerados en este estudio son aquellos que participan directa o indirectamente en los ciclos de los nutrientes y en la recirculación de la materia orgánica, los cuales corresponden a microorganismos celulolíticos, amilolíticos, ligninolíticos, fijadores de nitrógeno, proteolíticos, solubilizadores de potasio, nitrificantes y desnitrificantes evaluados a través de la degradación de sustratos específicos¹¹.

Por otro lado, los estudios microbiológicos que se han realizado en suelos de explotación ladrillera apuntan a la restauración ecológica por medio de tratamientos orgánicos como estrategia para contrarrestar el deterioro del suelo¹². Sin embargo, no se ha optado por estudiar la combinación de varias enmiendas tanto individualmente como mezcladas. De modo que, al evaluar las comunidades microbianas relacionadas con los ciclos de nutrientes en suelos tratados con biochar, compostaje y microorganismos eficientes (EM), lo ideal será tener un impacto positivo al medio ambiente disminuyendo las afectaciones que se crean como producto de extracción de arcilla, por medio de la proliferación de microorganismos que favorecen las propiedades del suelo^{13,14}.

El propósito de esta investigación es evaluar los efectos de diversas enmiendas orgánicas, como el biochar, el compost y los microorganismos eficientes, en la recuperación de grupos funcionales fúngicos y en la mejora de las variables fisicoquímicas en muestras de suelo con explotación de ladrillera recuperadas en la empresa Arcillas La Futuro, ubicada en el municipio de Cogua (Cundinamarca), mediante un montaje experimental de 20 ubicadas aleatoriamente, de tal manera que cada enmienda se aplicó en cinco parcelas. Se encontró que la densidad de hongos ligninolíticos fue el único con cambios significativos, sugiriendo ser considerados como

un indicador temprano de cambios en los tratamientos aplicados sobre el suelo. Por su parte, el compost mejoró significativamente ($p>0,05$) el promedio del pH frente a los demás tratamientos. Las demás propiedades no mostraron recuperación con las enmiendas aplicadas, indicando que posiblemente con un tiempo mayor de siete meses se podría mejorar la interacción benéfica entre lo aplicado y el suelo destinado a la explotación ladrillera es contribuir al análisis de estrategias de restauración ecológica destinadas a atenuar el impacto de la actividad minera en la zona.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Evaluar el efecto de biochar, compost, mezcla y microorganismos eficientes en la recuperación de suelo mediante la determinación de grupos funcionales fúngicos y variables fisicoquímicas en suelo con extracción de arcilla.

2.2. ESPECÍFICOS

- Determinar la densidad de grupos funcionales edáficos en función de los tratamientos aplicados en las parcelas.
- Analizar los parámetros fisicoquímicos del suelo posterior a la aplicación de los tratamientos.
- Relacionar los grupos funcionales con las propiedades fisicoquímicas del suelo.

3. ANTECEDENTES

La industria ladrillera ha generado desarrollo en cuanto a construcción de estructuras como viviendas, puentes, edificios, entre otros alrededor del mundo, por ello, día a día se fortalece y se buscan estrategias de producción más eficientes y eficaces ¹⁵. En este sentido, se han llevado a cabo varios estudios que evidencian las problemáticas que provoca la explotación de arcilla, así como diferentes mecanismos para restaurar el suelo y recuperar grupos funcionales microbianos y fúngicos que se encuentran presentes ¹⁶.

La minería provoca fuertes alteraciones en el ambiente, puesto que ocasiona residuos tóxicos que afectan la calidad del suelo ¹⁷. Un estudio enfocado en indicadores microbiológicos en suelos impactados por la minería de oro, realizado en el Tolima (2017), se determinó que existe disminución significativa en las densidades de todos los microorganismos en suelos de explotación minera, debido a que los depósitos de esta actividad influyen negativamente en la biomasa microbiana ¹⁸. De modo que afectan el desarrollo de la vida en el suelo, así como la dinámica, transformación y progreso de este. En este se identificaron hongos como *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium verticillioides* y *Beauveria bassiana*, que podrían ser utilizados en procesos de bioaumentación en zonas afectadas por la minería ¹⁹.

En cuanto a la microbiota en suelos impactados y no impactados por la minería metálica (Méndez, 2016), por medio de cuantificación de microorganismos determinó existen diferencias significativas en la cantidad de organismos, puesto que la actividad minera a cielo abierto muestra menor cantidad de microorganismos, independientemente del material de extracción. Aunque *Aspergillus* sp. se presentó en las mismas proporciones, hongos como *Geotrichum* sp. y *Mucor* sp. se evidenciaron únicamente en suelos no impactados, por lo que pueden ser utilizados en procesos de bioaumentación en zonas afectadas por la minería ²⁰.

En recopilación general, hay una variedad de hongos que son más frecuentemente estudiados para la recuperación de este tipo de suelos, principalmente *Penicillium*

sp, que es considerado uno de los grupos claves en la microbiota del suelo, ya que está involucrado en el ciclaje del fósforo, actúa como controlador biológico, produce metabolitos secundarios y promueve el crecimiento vegetal ²¹. Asimismo, se encuentra *Aspergillus* sp, que es caracterizado por capacidad para reducir los metales pesados y promover la vegetación, sin embargo, es considerado un productor de micotoxinas que son liberadas durante la descomposición de la materia orgánica ²². Por su parte, *Fusarium* sp ha sido distinguido por solubilizar el fosfato y su capacidad de biorremediación, aunque también produce micotoxinas conocidas como tricotecenos y varias de sus especies afectan procesos agrícolas ²³.

Al enfocarse en la restauración ecológica, una investigación se encargó de evaluar la densidad microbiana presente en suelos con y sin revegetalización (2017), en donde se demostró que los grupos funcionales celulolíticos y amilolíticos hacen parte de la microbiota normal del suelo, sin embargo se obtuvo una correlación estadísticamente significativa entre poblaciones bacterianas proteolíticas, solubilizadoras de fosfato, entre otras, que podrían indicar procesos de cometabolismo y competencia entre las mismas, los cuales favorecen el equilibrio ecológico del mismo ^{24,25}.

En estudios más recientes se ha optado por hacer uso de enmiendas orgánicas, especialmente del biochar, debido a sus características. Estas le confieren la capacidad potencial de mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, contribuyendo además la captación de CO₂, lo que lo convierte en una herramienta para luchar contra el cambio climático ²⁶. Esto ha permitido evaluar su capacidad para restaurar el suelo, como en el caso de la investigación acerca diagnóstico ambiental de suelos contaminados por actividades mineras (2019), en donde se demostró un aumento de la capacidad de retención hídrica del suelo, reducción de su densidad aparente y compactación, aumento del pH y la conductividad eléctrica, así como también cambios en la disponibilidad de los nutrientes que estuvieron directamente relacionados con efectos positivos sobre la raíz por medio las enmiendas orgánicas ²⁷.

El uso de biochar ha obtenido un potencial significativo en diversas investigaciones gracias a su proceso de rehabilitación de suelos mineros, en una de ellas se evalúa su

efecto al mezclarlo con hongos formadores de micorrizas (2016), en este se evidencia una mejora en las propiedades del suelo ²⁸. Al mismo tiempo que se promueve la actividad enzimática, micorrización y producción de la glomalina, mejorando así las condiciones edáficas. No obstante, no se ha optado por combinarlo con más tratamientos o se instauró su uso por medio de diferentes alternativas, más bien se ha utilizado de manera muy convencional ²⁹.

Teniendo en cuenta lo anterior en la actualidad se han requerido estrategias combinadas para minimizar el impacto ambiental de actividades antrópicas, por lo que se prefiere mezclarlo con otras enmiendas. Una opción muy viable es el compost, que según el análisis de los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros (2022), presenta una mayor capacidad para la regulación del pH en suelos mineros y a su vez una alta eficiencia en términos de reducción de las emisiones de CO₂ ³⁰. Lo cual sería de gran utilidad, debido a que se pueden obtener los beneficios que se destacan de este medio, al mismo tiempo que se incorporan otros productos y se esperaría que sus efectos sean potenciados al trabajar en conjunto ³¹.

Por su parte, los denominados microorganismos eficientes han demostrado ser de excelente productividad en procesos de biorremediación de suelos ³². Al evaluar su efecto de manera individual en análisis de métodos para recuperación de suelos mineros, se ha concluido que su actividad era muy baja, mientras que al mezclarse con enmiendas orgánicas e inorgánicas su porcentaje de remoción era mucho más alto, siendo uno de los métodos más eficientes para la recuperación de suelos ³³. Por lo que sería ideal combinar varios tratamientos con el fin de obtener una mayor efectividad en cada uno de los procesos de biorremediación del suelo.

Según estudios de aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo (2017), se encontró que el porcentaje de materia orgánica de los residuos sólidos urbanos en abono es alto y su adición al suelo produjo una mejora en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Además proporcionó una forma estabilizada de la materia orgánica, la cual mejoró las propiedades físicas de los suelos por el aumento de nutrientes y capacidad de retención de agua, el espacio total de poros, la estabilidad de agregados,

resistencia a la erosión, aislamiento de temperatura y disminución de la densidad aparente del suelo ³⁴.

Por último, según un estudio acerca de la influencia de algunas características edáficas sobre la respiración y la biomasa microbiana, utilizando suelos bajo condiciones ambientales semejantes, se precisó que la respiración y la biomasa son mayores en los suelos con mayor contenido de materia orgánica, también encontraron que la falta de correlación entre la textura y las propiedades biológicas, asimismo la elevada relación entre las mismas, el carbono y el nitrógeno, lo cual pone de manifiesto la importancia de la materia orgánica como fuente de nutrientes y energía para los microorganismos ³⁵.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. Grupos funcionales microbianos

Consisten en diversas comunidades de microorganismos que se encuentran en el suelo, los cuales, por sus propiedades metabólicas, realizan ciertas funciones específicas que contribuyen a la estabilidad del ecosistema en el que se encuentran ³⁶. La cantidad y diversidad encontrada varía según las necesidades y condiciones del suelo. Además, se forman por la descomposición de la materia orgánica y la interacción con las raíces de las plantas ³⁷.

Los microorganismos presentes en los ciclos de nutrientes del carbono y nitrógeno se conocen como grupos funcionales microbianos: celulolíticos, amilolíticos, ligninolíticos, fijadores de nitrógeno, proteolíticos, amonizantes, nitrificantes, y desnitrificantes evaluados a través de la degradación de sustratos específicos ³⁸.

Al estar inmersos en los procesos que se realizan en el suelo son sensibles a actividades antrópicas como la minería, agricultura, erosión o incendios

forestales. Es por eso por lo que se consideran indicadores de calidad y permiten obtener un diagnóstico sobre su relación abundancia/diversidad, funcionalidad y de aproximación a la degradación de los contaminantes por actividad microbiana, además de posibilitar el monitoreo de disturbios ambientales ³⁹.

4.2. Hongos proteolíticos

Conjunto de hongos que cuentan con la batería enzimática necesaria para degradar proteínas; enzimas proteolíticas que juegan un papel importante en la fisiología y el desarrollo de los hongos ⁴⁰. La digestión externa de sustratos proteicos por proteasas secretadas es necesaria para la supervivencia y el crecimiento de especies saprofitas y patógenas. Se han descrito especies como *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Mucor* sp. y *Rhizopus* sp ^{41, 42}.

4.3. Hongos ligninolíticos

La lignina es muy importante en la naturaleza porque es una de las principales estructuras que forman las paredes celulares de las plantas y realiza diversas funciones, incluida la rigidez estructural. Es un polímero compuesto por tres fenilpropanos (p-hidroxifenilo, guayaco y siringilo) unidos por ésteres y enlaces carbono-carbono; y su heterogeneidad química dificulta su digestibilidad, previniendo la celulosa y el ataque microbiano a la hemicelulosa. ⁴³.

Al ser un hetero polímero muy recalcitrante, solamente es transformado hasta dióxido de carbono y agua en forma limitada por algunos tipos de microorganismos. Los principales capaces de la degradación y modificación son los hongos que en su mayoría pertenecen al Phylum Basidiomycota, más conocidos como los hongos de la pudrición blanca ^{44, 45}.

4.4. Hongos solubilizadores de potasio

Dentro de los nutrientes vegetales más importantes para cualquier tipo de planta se encuentra el potasio, esencial para su desarrollo cumpliendo funciones en la fotosíntesis y síntesis proteica ⁴⁶. El potasio se puede encontrar en diversas

formas en el suelo, por lo que los microorganismos que interactúan con éste y son capaces de solubilizar aquellas formas no disponibles. Se ha reportado que los hongos más importantes pertenecientes a este grupo son *Rhizobium* sp., *Aspergillus* sp. y recientemente descrito *Trichoderma* sp., que tiene el potencial de solubilizar y movilizar potasio ⁴⁷.

4.5. Ciclos biogeoquímicos

Son procesos naturales que describen cómo los elementos químicos esenciales C, N, F, H₂O y K se mueven y son reciclados en los sistemas terrestres y acuáticos de la Tierra. Estos ciclos son fundamentales para la vida en el planeta, ya que los elementos químicos son necesarios para la formación de biomoléculas, la energía y el funcionamiento de los ecosistemas ⁴⁸.

4.5.1. Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un componente clave de las proteínas y los ácidos nucleicos, este ciclo involucra procesos como la fijación, la nitrificación, la desnitrificación y la asimilación. Los microorganismos desempeñan un papel crucial en la transformación del nitrógeno en sus diferentes formas a través del ambiente ⁴⁹.

4.5.2. Ciclo del carbono

Este ciclo describe cómo el carbono se mueve y se recicla entre la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera y la biosfera en la Tierra incluyendo procesos como la fotosíntesis, la respiración, la descomposición y la combustión de combustibles fósiles. El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases de efecto invernadero que afectan al clima ⁵⁰.

4.5.3. Ciclo del fósforo

Describe cómo el fósforo se mueve y se recicla en los ecosistemas terrestres y acuáticos de la Tierra. Es un elemento esencial para la vida

y es un componente crítico de muchas biomoléculas, como el ADN, el ARN y los ATP. El proceso involucra la erosión de rocas fosfatadas, la absorción por las plantas, la transferencia a través de la cadena alimentaria y la liberación a través de procesos de descomposición ⁵¹.

4.5.4. Ciclo del potasio

Describe el movimiento y la recirculación del potasio a través de los distintos compartimentos de la Tierra; litósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biosfera, desempeñando un papel fundamental en la salud de los suelos y la nutrición de las plantas. Comienza con la liberación de potasio a partir de minerales en la litosfera y continúa a medida que las plantas absorben el potasio del suelo para su crecimiento. A medida que las hojas y otros materiales orgánicos caen al suelo y se descomponen, el potasio se recicla y está disponible nuevamente para las plantas ⁵².

4.6. Grupos funcionales y ciclos biogeoquímicos

Desempeñan un papel importante en la dinámica de los elementos químicos; desde la entrada, salida y transformación en los ciclos biológicos que ocurren en los compartimientos de la Tierra. Los hongos están involucrados en la degradación de la materia orgánica y liberación de nutrientes en el medio para uso de los demás organismos vivos ⁵³.

Los hongos proteolíticos participan en la segregación de enzimas proteolíticas que descomponen proteínas orgánicas a compuestos simples que serán utilizados por organismos, microorganismos y plantas contribuyendo al ciclo del nitrógeno liberando nitrógeno orgánico en forma de amoníaco, que puede ser transformado posteriormente en formas más oxidadas de nitrógeno, como nitratos y nitritos ⁴⁵.

Los hongos ligninolíticos por medio de enzimas degradan la lignina, secretan carbono y otros nutrientes en el proceso que va a contribuir a la liberación de

carbono orgánico en forma de CO₂ que podrá ser utilizado nuevamente por las plantas en la fotosíntesis ⁵⁴.

Finalmente, los hongos solubilizadores de potasio, convierten el potasio presente en minerales insolubles en una forma soluble que las plantas pueden absorber. La abundancia de cada comunidad microbiana es un factor clave que controla la velocidad de la mineralización de cada sustrato ⁵⁵.

4.7. Enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas se conocen como el producto proveniente de material vegetal y animal como alternativa a los fertilizantes para la recuperación de la materia orgánica en suelos degradados. Su uso se remonta a los inicios de la agricultura donde utilizaban el estiércol de animales y residuos orgánicos como fuente de nutrientes para el suelo ⁵⁶.

Su aplicación genera gran variedad de beneficios; aumenta la temperatura del suelo favoreciendo la absorción de nutrientes, participa en la mejora de la estructura y textura de suelos haciendo más ligeros los suelos arcillosos y más compactos a los arenosos, mejora la permeabilidad por influencia en el drenaje y aireación, lo que permite una mayor retención de agua, disminuyendo la erosión y estimulando el desarrollo radicular. Además, mediante su aplicación, se incorporan poblaciones microbianas ausentes que pueden estar implicadas en el ciclo de diferentes nutrientes ⁵⁷.

4.7.1. Biochar

También conocido como biocarbón, es el resultado de procesos de combustión térmica de materia orgánica con distintos orígenes, en condiciones de oxígeno limitado. La materia orgánica usada puede ser abono, madera, caña, residuos forestales, agroindustriales, estiércol, entre otros, por lo que lo convierte en un material rico en carbono ⁵⁸. Al ser una sustancia altamente recalcitrante y benéfica para el suelo, su

aplicación favorece el intercambio catiónico aumentando el pH del suelo en procesos de remediación, secuestro de carbono y tratamiento de aguas ⁵⁹.

Es conocido por favorecer ciertas poblaciones de microorganismos, en cuanto a la relación de bacterias/hongos, causa un incremento de las poblaciones fúngicas principalmente asociadas a la exploración y colonización de los poros del material pirolizado ⁶⁰. Sin embargo, aún se desconoce cuál puede ser su impacto ambiental debido a la posible liberación de hidrocarburos aromáticos policíclicos e iones metálicos, pero esto se debe investigar de manera más rigurosa ⁶¹.

4.7.2. Compost

Es el resultado biológico que se obtiene del proceso de descomposición bajo condiciones aerobias donde los sustratos más lábiles (azúcares, aminoácidos, lípidos y celulosa) son descompuestos en menor tiempo por bacterias, hongos y actinomicetos mesófilos tolerantes a temperaturas medias, hasta la transformación de compuestos orgánicos en un producto estable y rico en sustancias húmicas, superando las cinco fases previas a la maduración ⁶². Se inicia con la fase mesofílica que por actividad de los microorganismos aumentan la temperatura hasta los 45° para dar paso a los que soportan hasta los 100°, fase termofílica contribuyendo a la higienización de la mezcla y destruyendo cualquier tipo de contaminante biológico por meses hasta que la temperatura empieza a descender y los microorganismos mesófilos aparecen para continuar la descomposición y finalmente, llegar a la última fase con el compost maduro con nuevas poblaciones microbianas ⁶³.

Aseguran la fertilidad de sus campos mediante materiales orgánicos descompuestos, aporta estructura al suelo por estimulación a la materia orgánica, mejora la distribución de nutrientes y aumenta la retención de agua en el suelo. Aun siendo una sustancia de alto interés para el

desarrollo del conocimiento en el área, hay pocos estudios sobre su aplicación en suelos con actividad minera ^{64, 65}.

4.7.3. Microorganismos eficientes

Consisten en productos líquidos formulados que contienen más de 80 especies de microorganismos. Algunas especies son aeróbicas, otras anaeróbicas e incluso pueden llegar a tener especies fotosintéticas, cuyo logro principal es que pueden coexistir como comunidades microbianas e incluso pueden llegar a complementarse ⁶⁶.

Los microorganismos (EM) han mostrado efectos beneficiosos para el tratamiento de aguas negras, reducción de malos olores, producción de alimentos libres de agroquímicos, manejo de desechos sólidos y líquidos generados por la producción agropecuaria, la industria de procesamiento de alimentos, fábricas de papel, mataderos y municipalidades, entre otros ⁶⁷. Por lo general, están compuestos de diversos grupos de microorganismos, como lo son: bacterias ácido-lácticas, bacterias fotosintéticas, levaduras, actinomicetos, hongos filamentosos con capacidad fermentativa ⁶⁸.

4.8. Explotación ladrillera

Es un proceso que se lleva a cabo para la obtención de arcilla que se realiza en determinadas minas de manera reglamentada y responsable, basándose en estudios de laboratorio que garantizan la calidad del suelo para su respectivo uso ⁶⁹. Posteriormente se lleva a cabo la fabricación del ladrillo por medio de la molienda de arcilla, moldeo, secado y cocción, sin dejar de lado por supuesto, el correspondiente control de calidad ⁷⁰.

El ladrillo es de bastante utilidad, sin embargo, perjudica seriamente al ambiente, causando daños irreversibles para el aire con la producción de

monóxido y dióxido de carbono, también en el agua con la disposición inadecuada de residuos y grandes cantidades para la industria ladrillera ⁷¹.

Al suelo por todos los procesos de erosión y a la vegetación por la eliminación de horizontes superficiales, dejándolo sin fuente de nutrientes. Por esto, se han estipulado leyes que regulen la explotación de suelos con el fin de proteger y controlar los recursos naturales, en especial en el sector minero en cuanto a la explotación y la extracción de materiales ⁷².

El principal tipo de suelo para su obtención son los suelos arcillosos distribuidos en la geografía Nacional, principalmente en la Cordillera Oriental zona centro se encuentran los mayores yacimientos de arcilla para la fabricación de ladrillo y cerámica ⁷³.

4.9. Recuperación, restauración y rehabilitación.

Son procesos que buscan mejorar el estado y funcionalidad de suelos degradados debido a actividades humanas o eventos naturales ⁷⁴. Cada uno de estos procesos tiene enfoques ligeramente diferentes, pero comparten el objetivo de mejorar la calidad en sus condiciones y restaurar la capacidad para mantener la vida vegetal y la biodiversidad microbiana ⁷⁵.

La recuperación del suelo se enfoca en revertir o detener la degradación del suelo y restaurar sus propiedades físicas, químicas y biológicas ⁷⁶. A diferencia de la restauración, que implica la reconstrucción activa de ecosistemas degradados o dañados, incluyendo la recuperación de la diversidad biológica y la funcionalidad del suelo ⁷⁴. Por su parte, la rehabilitación de suelos se centra en la recuperación de áreas degradadas para un uso productivo, la agricultura, la silvicultura o la minería, mientras se minimiza el impacto ambiental negativo ⁷⁷.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. UNIVERSO

El suelo explotado para obtención de arcilla de la ladrillera La Futuro.

5.2. POBLACIÓN

Parcelas con los tratamientos aplicados.

5.3. MUESTRA

Muestra compuesta de suelo de las parcelas, aproximadamente 500 g.

5.4. TAMAÑO DE LA MUESTRA

76 muestras.

5.5. HIPÓTESIS

Alternativa: Las enmiendas orgánicas tales como biochar, compost y microorganismos eficientes generan impactos positivos en los parámetros fisicoquímicos y densidad microbiana en un suelo de explotación ladrillera.

Nula: Las enmiendas orgánicas tales como biochar, compost y microorganismos eficientes no generan impactos positivos en los parámetros fisicoquímicos y densidad microbiana en un suelo de explotación ladrillera.

5.6. VARIABLES

Dependiente: La recuperación de las propiedades:

Fisicoquímicas: pH, humedad, materia orgánica, densidad relativa, densidad real, tamaño de agregados.

Microbiológicas: Hongos proteolíticos, hongos ligninolíticos y hongos solubilizadores de potasio.

Independiente: El tipo de enmienda orgánica aplicada al suelo de la explotación ladrillera de arcilla, ya sea compost, biochar o microorganismos eficientes.

5.7. INDICADORES

La representación cuantitativa de los cambios presentados en las variables en función con la aplicación de los tratamientos en el suelo con explotación ladrillera.

5.8. ZONA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en Arcillas La Futuro, ladrillera ubicada del municipio de Cogua – Cundinamarca, la cual se encuentra establecida hace 30 años y donde se procesan aproximadamente 3500 toneladas de material cada tres meses. En Cogua, la temperatura anual varía entre los 6 °C y 19 °C, presenta en las épocas de lluvia (mayo – abril, octubre – diciembre) cifras que van desde los 46 hasta los 192 mm de lluvia, con un rango de temperatura de 9-20 °C y variaciones de temperatura diarias de 15°C, posee una humedad relativa promedio de 80,15%. En Cogua el suelo posee un desarrollo pedogenético y estructural moderado, un origen de acumulación de sedimentos fluviales y lacustres que se compone principalmente por arcillas de origen lacustre, junto a la presencia de gravas y gravillas con arenas muy finas, y arenas orgánicas provenientes de depósitos torrenciales presentes en el área. Las partículas finas propician una baja permeabilidad del suelo que facilita procesos de acumulación de agua. Esto se refleja en condiciones permanentes de humedad que afectan horizontes del suelo, fácilmente erosionable en épocas de precipitación, con consistencias húmedas y que pueden ser ácidos ⁷⁸.

5.8.1. Montaje experimental

Se realizó un experimento en una zona remanente de actividad en una ladrillera ubicada en el municipio de Cogua, Cundinamarca. En este sitio, se establecieron un total de 20 parcelas, cada una con una superficie de alrededor de 2,25 m². La disposición de estas parcelas se llevó a cabo de manera aleatoria y se les asignó un respectivo número. En

la en la tabla uno (1) se presenta la asignación al azar de las parcelas para los tratamientos. Las parcelas se ubicaron de tal manera que cada repetición del tratamiento estuviera en uno de los cuatro bloques de muestreo representados en la figura (1). Adicionalmente se muestran las parcelas que fueron cubiertas por un alud de barro provocado por las precipitaciones durante la época de lluvia, lo que dificultó realizar la toma de muestra en el séptimo mes.

En la parte superior del talud, se agruparon las parcelas en cuatro zonas distintas. Con las parcelas numeradas, se procedió a labrar el suelo a una profundidad aproximada de 10 centímetros. Luego, a través de una asignación aleatoria, se asignó uno de los cuatro tratamientos disponibles a cada parcela, la distribución de estos tratamientos se detalla en la Tabla 1. Además, se dispuso las parcelas de manera que cada repetición de tratamiento estuviera representada en uno de los cuatro bloques de muestreo que se muestran en la Figura 1.

Tabla 1. Organización de las parcelas con los tratamientos aplicados.

Tratamiento	Compost	Biochar	Mezcla	Control	Pérdidas
Parcelas	2, 6, 13, 15, 17	4 ,5, 10, 11, 19	1, 8, 14, 16, 18	3, 7, 9, 12, 20	Séptimo mes 9,10,11,12

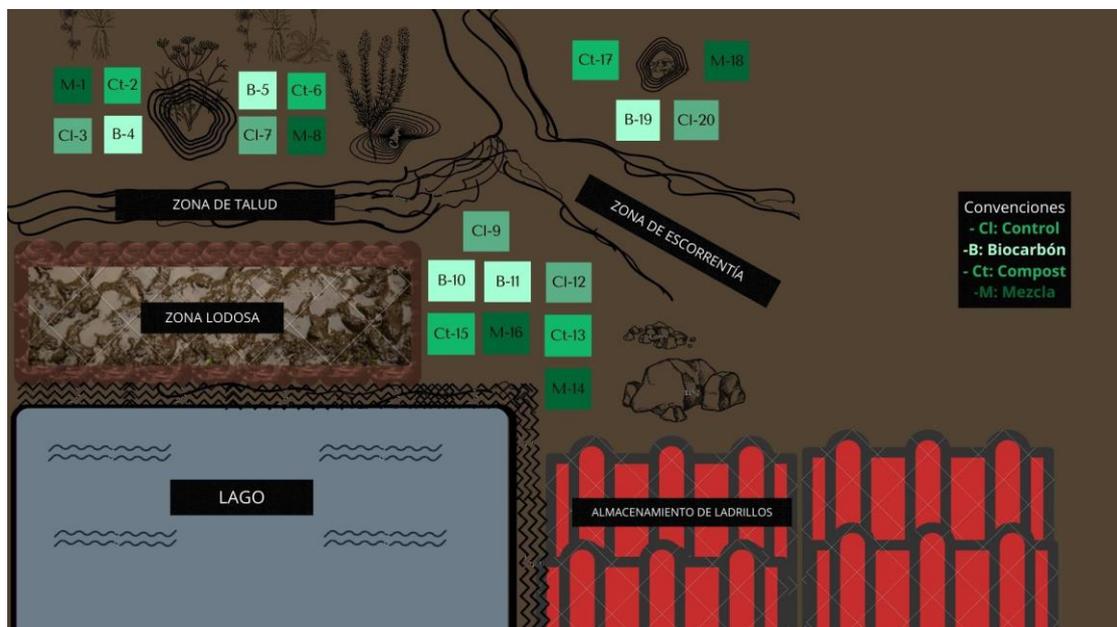


Figura 1. Delimitación y ubicación de las parcelas
Tomado de Juan Camilo Pineda Herrera

Se realizó un diseño de bloques al azar con el objetivo de hacer una comparación de los efectos de cuatro tratamientos orgánicos en suelo con explotación ladrillera, siendo cada parcela la unidad experimental y de muestreo para cada tratamiento. A todos los tratamientos se le hizo una adición inicial de microorganismo eficientes (EM) diluidos en proporción 1:10 en 100 ml de agua. Estos EM contenían una mezcla de *Lactobacillus casei* (1.0×10^6 UFC/ml), *Saccharomyces cerevisiae* (2.0×10^4 UFC/ml) y *Rodopseudomonas palustris* (2.5×10^6 UFC/ml). De esta manera, se utilizaron los siguientes tratamientos: biocarbón de pino, este se produjo por pirólisis a 500 °C por 4h aproximadamente (*Cupressus* sp. 12 ton/ha), compost comercial (12 ton/ha) y una mezcla de ambas sustancias (50% compost y 50% biocarbón). El control consistió en parcelas a las cuales no se les adicionó ninguna de las enmiendas orgánicas estudiadas para obtener un panorama acerca del estado inicial del suelo.

De cada parcela se tomaron muestras de 500 g en cuatro momentos diferentes a lo largo de siete meses. La obtención significativa de las muestras se tomaba en cinco puntos diferentes de una misma parcela, en las cuatro esquinas más una del centro. La primera toma se hizo antes del montaje del experimento y el segundo, un mes después con la finalidad de evidenciar cambios en las propiedades del suelo. El tercer muestreo se realizó cuatro meses después de haber aplicado los tratamientos hasta llegar el último muestreo realizado en el mes de noviembre del 2022, siete meses después de la instauración del montaje experimental.

Posteriormente, las muestras se rotularon y se almacenaron en bolsas plásticas tipo ziploc para ser transportadas al Laboratorio de Ecología de Suelos y Hongos Tropicales (LESYHT) de la Pontificia Universidad Javeriana para la determinación y análisis de parámetros fisicoquímicos como humedad, textura, pH, densidad aparente y real. De manera complementaria se examinó la actividad microbiana, mediante la caracterización de los diversos grupos funcionales fúngicos que pueden encontrarse en el suelo, enfocándonos más precisamente en tres tipos, los cuales son: hongos proteolíticos, ligninolíticos y solubilizadores de potasio.

5.8.2. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

5.8.2.1. pH

Se agregaron 10 g de suelo con 10 ml de agua desmineralizada a un vaso de precipitado de 50 ml. La muestra pasó por un agitador vórtex durante 5 min. Pasado el tiempo se dejó reposar durante 30 min para agitarlos nuevamente antes de tomar una lectura introduciendo los electrodos en la suspensión para medir su pH.

5.8.2.2. Humedad

Para la obtención de esta característica se pesaron aproximadamente 10 g de muestras de suelo de cada parcela, para luego ser llevadas a secar a 105 °C por 24 h en una mufla. Transcurrido este tiempo, se volvieron a pesar en balanza analítica para obtener el peso final y poder emplear la siguiente fórmula que indica su porcentaje (%) de humedad:

$$H = \left(1 - \frac{P_s}{P_h}\right) 100$$

Donde:

Ps: Peso seco (g)

Ph: Peso húmedo (g)

H: Humedad

5.8.2.3. Materia orgánica

Se tomaron 10 g de suelo fresco de cada una y se sometieron a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 105 °C durante un período de 24 h. Durante el desarrollo, se registró el peso inicial del suelo seco (PS₁). Posteriormente, las muestras de suelo se introdujeron en un horno de mufla precalentado a 550 °C durante 2 h. Al finalizar este tiempo, se extrajeron las muestras y se registró el peso final del

suelo seco (PS_2). Con base en los valores de PS_1 y PS_2 , se calculó el peso seco por ignición (PPI) utilizando la siguiente fórmula:

$$M.O = 1 - \left(\frac{PS_2}{PS_1} \right) 100$$

Donde:

MO: Porcentaje de materia orgánica (g)

PS_2 : Peso final del suelo.

PS_1 : Peso inicial.

5.8.2.4. Densidad aparente

Se tomaron muestras in situ (submuestra en la esquina y centro de la parcela) con un cilindro de volumen conocido en el suelo. Las muestras se llevaron a un horno de 105 °C por 72 h (hasta obtener peso constante) para obtener su valor de la siguiente manera:

$$D = \frac{P_s}{v} \times 100$$

Donde:

D: Densidad aparente (g/cm^3)

P_s : Peso del suelo seco (g)

V: Volumen del cilindro conocido (cm^3)

5.8.2.5. Densidad real

Se tomaron 5 g de suelo tamizado para posteriormente añadirlos a un picnómetro y volver a pesar, añadir agua hasta la mitad y llevar a baño maría durante 5 min para expulsar el aire ocluido entre las partículas. Dejar enfriar y aforar con agua destilada, pesar el picnómetro completo, pesarlo vacío y pesarlo sólo con agua. El valor se halla con la ejecución de la siguiente fórmula:

$$Dr = \frac{P_2 - P_1}{(P_2 - P_1) - (P_3 - P_4)} \cdot \rho_a$$

Donde:

Dr: Densidad real

P_1 : Peso del matraz con tapón (g)

P₂: Peso del matraz con el suelo recién tamizado y con tapón (g)

P₃: Peso del matraz enrasado con agua y con suelo luego de haber pasado por baño María (g)

P₄: Peso del matraz con sólo agua hasta el aforo (g)

pa: Densidad del agua (g/cm³)

5.8.2.6. Tamaño de agregados

Inicialmente, se secaron 100 g de suelo de cada parcela a una temperatura de 13°C durante 72 h. Luego, se preparó un conjunto de tamices con sus respectivas torres que tenían aberturas de tamaño de 1,160 mm, 600 µm, 300 µm y 54 µm. El suelo seco se pesó y se colocó en la sección superior de la torre, comenzando con el tamiz de 1,160 mm. Se encendió y se agitó durante 5 minutos a una velocidad de 800 rev/min. Después de este tiempo, se registró el peso resultante del suelo retenido en cada tamiz utilizando una balanza analítica de alta precisión con una resolución de 0,1 g. Los datos recopilados se utilizaron para representar la distribución de los agregados según la cantidad de suelo retenido en cada tamiz, y se calculó el peso correspondiente a los diámetros medidos (PDM).

$$PDM = \sum^n X_i W$$

Donde:

X_i: Diámetro medio de tamices

W_i: Peso de los agregados expresados en fracción del total del peso

5.8.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE GRUPOS FUNCIONALES

Para determinar la densidad de los grupos funcionales fúngicos se inició con una estandarización de las diluciones a las cuales se les hicieron los recuentos para cada grupo funcional. Para esto, se tomaron aleatoriamente muestras de suelo de dos parcelas diferentes. Se realizó una suspensión madre con 90 ml de solución salina y la cantidad de muestra de las parcelas respectivamente (Figura 2). Posteriormente se realizaron cuatro diluciones seriadas en base 10 hasta 10⁻⁴. Las siembras en los medios de cultivo

se hicieron por duplicado y a profundidad con 1 ml de la dilución 1:10, una muestra representativa que garantiza la mezcla con el medio de cultivo permitiendo tener más inóculo.

Para los hongos proteolíticos se usó el medio selectivo preparado con peptona de caseína, extracto de levadura, leche deslactosada en polvo, agar y ampicilina como antibiótico para inhibir el crecimiento de bacterias. En el caso de los hongos ligninolíticos se usó el medio GAE con lignina en polvo al 5%, glucosa, asparagina, extracto de levadura, K_2HPO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, agar bacteriológico y ampicilina como antibiótico. Por último, el medio Pikovskaya modificado para los hongos solubilizadores de potasio, se evaluó la capacidad degradadora del medio con dos opciones para los microorganismos, la primera consistía en extracto de levadura, $C_6H_{12}O_6$, $(NH_4)_2SO_4$, $MnSO_4$, $FeSO_4$, agar y el indicador de pH azul de bromocresol. En cuanto a la segunda opción, se reemplazó la fuente de potasio por K_2HPO_4 para finalmente, comparar su crecimiento y decidir la dilución adecuada para hacer los recuentos y modificación del medio a trabajar.

Estos medios de cultivo fueron llevados a incubación a 20 °C durante 8 días para posterior recuento de UFC/g suelo y medición de halos generados como proceso de degradación del sustrato, un indicativo de que los microorganismos están utilizando el compuesto correspondiente a su grupo funcional.

Una vez obtenidos los recuentos se procedió a escoger las diluciones 10^{-1} para el grupo funcional de hongos ligninolíticos, 10^{-1} para hongos proteolíticos y 10^{-1} para hongos solubilizadores de potasio. La siembra de las 20 muestras de los cuatro muestreos se realizó el mismo procedimiento descrito para la estandarización del ensayo y que se muestra en la figura (2).

Metodología

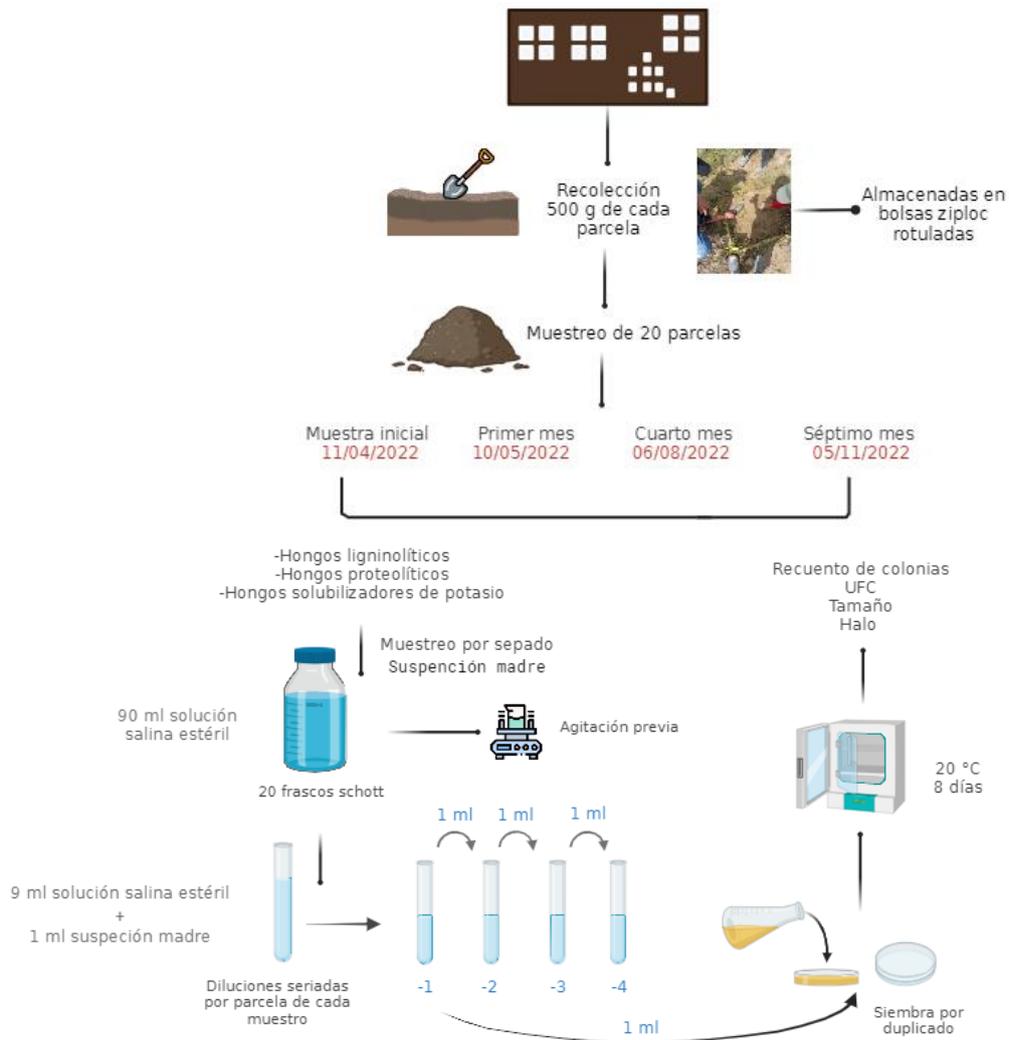


Figura 2. Metodología realizada para determinación densidad microbiana

Elaboración propia

5.8.4. Análisis estadísticos

Para conocer la efectividad y diferencia significativa de los tratamientos aplicados en la recuperación de los grupos funcionales fúngicos y propiedades fisicoquímicas del suelo, se determinó si los datos cumplían con los supuestos estadísticos por medio de la distribución normal; prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Al ser datos dependientes que no seguían los supuestos, se realizó la prueba no paramétrica de Friedman para comparar cada variable con respecto al tratamiento a lo largo de los meses.

Para estimar si existían diferencias entre los tratamientos, se usó la prueba de Wilcoxon a posteriori. Para establecer relaciones entre los parámetros fisicoquímicos del suelo y la actividad de los tres grupos funcionales, se realizó el análisis con la prueba de Spearman. Las pruebas se realizaron con el programa estadístico Past 4.10, con un nivel de significancia de 0,05 para todos los análisis.

6. RESULTADOS

6.1. Resultados experimentales

La explotación ladrillera que implica la extracción de arcilla para su fabricación, genera un impacto significativo en los parámetros fisicoquímicos del suelo en las áreas circundantes. Estos cambios en el suelo pueden deberse a la remoción de materiales, alteración de la topografía, emisiones resultantes de la producción ²¹. El suelo en el territorio nacional generalmente tiene un pH por debajo de 5,5 entendiéndose el contexto experimental, las emisiones de gases como dióxido de azufre y monóxido de carbono, pueden tener un efecto acidificante en el suelo, reduce el pH del suelo y afecta la disponibilidad de nutrientes para la biomasa bacteriana y fertilidad ⁷⁹. La modificación del relieve implica compactación y erosión del suelo, reducción de la porosidad, la capacidad de infiltración de agua y eliminación de las capas superficiales, que generalmente contienen el mayor contenido de materia orgánica disponible ⁸⁰. En general, este tipo de suelo muestra particularidades que concuerdan con lo obtenido en el laboratorio.

6.2. Análisis fisicoquímicos

Las propiedades fisicoquímicas del suelo son características que se utilizan para evaluar la composición y las propiedades del suelo. Estas características son esenciales para comprender la calidad y la capacidad del suelo para soportar cultivos y ecosistemas ⁸¹. El suelo con actividad de explotación ladrillera cuenta con una textura franco-arcillosa, contenido de materia orgánica de 28%, 37% de humedad, pH ácido, densidad aparente de 1,5 g.cm⁻³. La importancia del pH radica en que afecta la solubilidad de los

nutrientes en el suelo. En suelos ácidos, los nutrientes como el calcio, el magnesio y el fósforo tienden a ser menos disponibles ⁸².

Muestra de suelo control

El análisis del suelo control arrojó un promedio de pH de 5,37 clasificándose como un suelo ácido. Se obtuvo un 4,62% de materia orgánica un resultado muy por debajo de lo reportado al igual que la humedad con 23,24%. En cuanto a la densidad aparente, se obtuvo 1,70 g/cm³ un valor aumentado que puede deberse a una compactación del suelo ⁸³. Para la densidad de tamaño de los agregados 54 um, 300 um y 600 um se obtuvo 13,50 um, 7,54 um y 48,71 respectivamente.

6.2.1. pH

Las parcelas que contenían como enmienda orgánica al compost mostraron cambios significativos ($p > 0,05$) en el promedio del pH (5,52) durante los siete meses de tratamiento (Figura 3. A.), caso contrario con el biochar y control donde fue 0,22 y para la mezcla 0,12 menor que el obtenido con el compost, indicando que no se evidenció diferencias significativas ($p > 0,05$).

6.2.2. Humedad

La humedad promedio del suelo alcanzó su pico máximo en el primer mes luego de haber iniciado el montaje experimental y que fue tratada con compost. A partir de ahí mostró una reducción de hasta un 43% para el cuarto mes y 59% para el séptimo mes (Figura 3. B.). Un evento inesperado, teniendo en cuenta que con los tratamientos se esperaba un incremento en la retención de agua. Cuando llueve, el agua se infiltra en el suelo aumentando la humedad; sin embargo, las altas lluvias pueden generar escorrentía lo que podría significar que el agua fluya en lugar de infiltrarse en el suelo sin contribuir significativamente al aumento de humedad en el suelo, sino que puede provocar la erosión. Debido a que el montaje se inició en una de las temporadas de lluvia comprendidas en los meses de abril y mayo.

6.2.3. Materia orgánica

En las parcelas acondicionadas con los cuatro tratamientos, el porcentaje de materia orgánica se mantuvo en 4,4% sin mostrar cambios significativos entre los tratamientos ($p>0,05$) (Figura 3. C.).

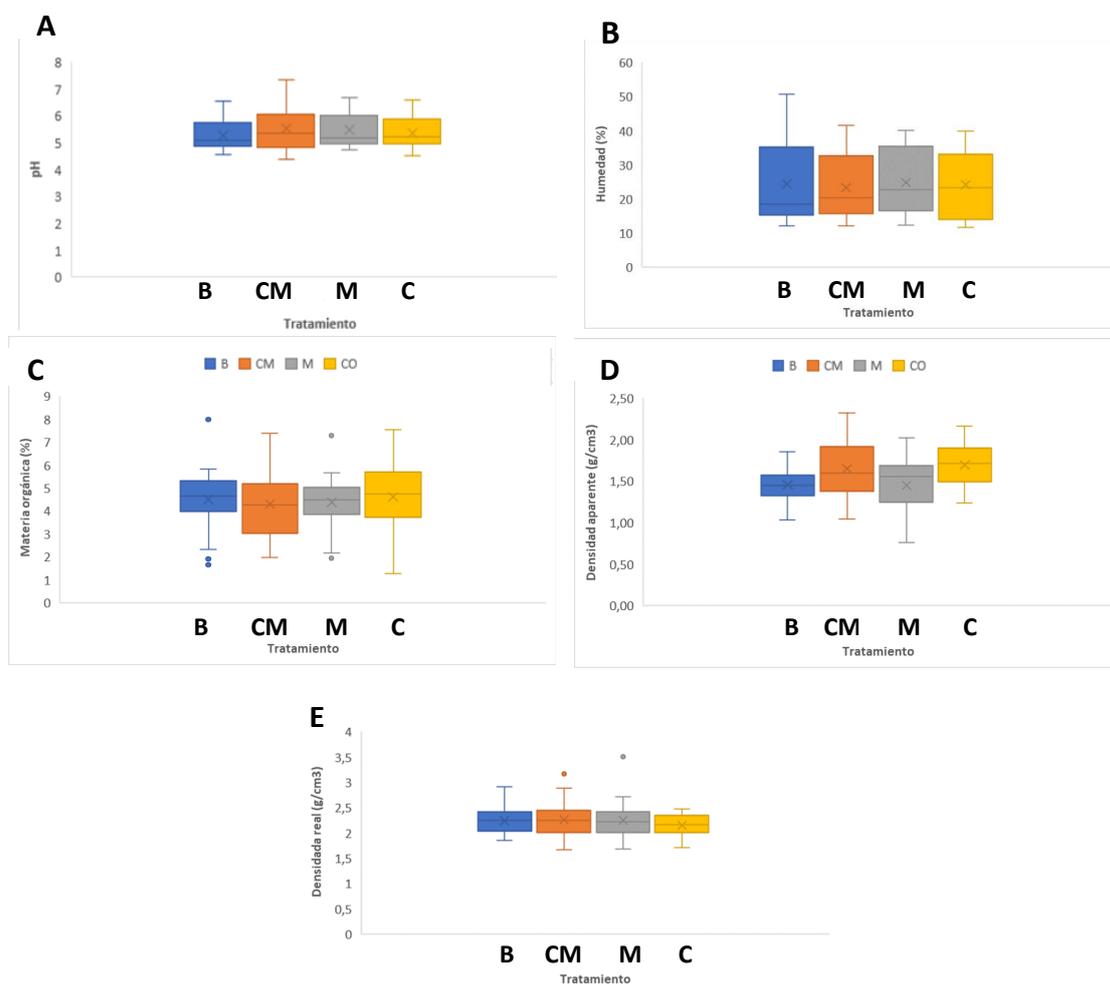


FIGURA 3. Gráfico de cajas y bigotes de las variables fisicoquímicas con los tratamientos aplicados. Las cajas representan los percentiles 75 (cuartil superior) y percentil 25 (cuartil inferior), sus líneas paralelas representan la variabilidad que hay fuera de estos cuartiles. La mediana está representada por línea horizontal dentro de cada caja. Los puntos fuera de los bigotes son valores atípicos. B: Biochar CM: Compost M: Mezcla C: Control.

A. Comportamiento del pH **B.** % Humedad **C.** % Materia orgánica **D.** Densidad aparente **E.** Densidad real

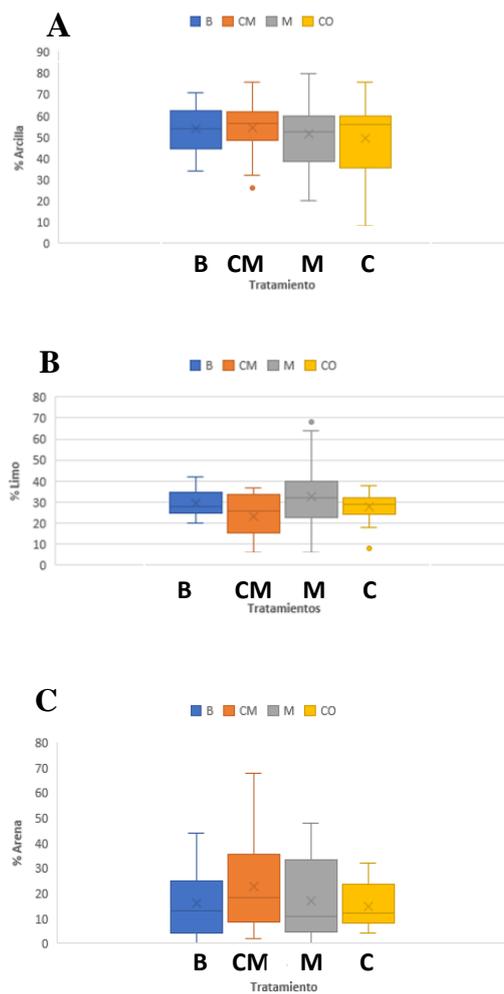


FIGURA 4. Gráfico de cajas y bigotes de las variables fisicoquímicas con los tratamientos aplicados. Las cajas representan los percentiles 75 (cuartil superior) y percentil 25 (cuartil inferior), sus líneas paralelas representan la variabilidad que hay fuera de estos cuartiles. La mediana está representada por línea horizontal dentro de cada caja. Los puntos fuera de los bigotes son valores atípicos. B: Biochar CM: Compost M: Mezcla C: Control.
A. Arcilla (%) **B.** Limo (%) **C.** Arena (%)

6.2.4. Densidad real y aparente del suelo

Inicialmente, en dos de los cuatro tratamientos se encontró un leve descenso en las parcelas tratadas con compost y control (Figura 3. D-E). Sin embargo, la densidad aparente finalmente no mostró cambios significativos ($p > 0,05$). Comparando este resultado con el obtenido con relación al contenido de materia orgánica, se esperaba un comportamiento inverso con respecto a esta, es decir, con un aumento en la cantidad de agregados de tamaño medio y

grande, que tendrían el efecto de reducir la densidad del suelo volviéndose más suelto y menos compacto.

A diferencia de la densidad real, el promedio durante los siete meses del montaje sólo mostró significancia ($p>0,05$) en las parcelas manipuladas con la mezcla con una diferencia de aumento frente a las parcelas control de 0,12 y de 0,03 para los que contenían compost y biochar.

Por lo general los suelos arcillosos tienden a tener una mayor densidad real en comparación con otro tipo de suelo, debido a la compactación de las partículas de arcilla. Con la dosificación del compost se esperaba una mejora en la porosidad del suelo e incrementar la cantidad de espacios vacíos en el suelo para reducir la densidad aparente y que influya en el aumento del valor de la densidad real ⁸⁴.

6.2.5. Distribución de tamaño de agregados

La distribución de tamaño de los agregados y la relación entre sólidos-poros en el suelo son dos características clave que influyen en la estructura y la funcionalidad del suelo. Estos dos aspectos están interrelacionados y desempeñan un papel esencial en la capacidad del suelo para retener agua, aire y nutrientes ⁸⁵. En ninguna parcela se detectó un impacto considerablemente diferente para ninguno de los tamaños evaluados ($p>0,05$) (Figura **6.A.**).

6.3. Densidad grupos funcionales microbianos

La recolección de las muestras de las 20 parcelas durante los cuatro muestreos permitió también un análisis microbiológico mediante el aislamiento de grupos funcionales importantes presentes en el suelo centrados en hongos proteolíticos, ligninolíticos y solubilizadores de potasio.

De acuerdo con las propiedades de los medios de cultivo y las características macroscópicas y microscópicas de los microorganismos se identificaron géneros de hongos como *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Trichoderma* sp para el grupo de los proteolíticos; en los ligninolíticos *Penicillium* sp., *Rhizopus* sp., *Trichoderma* sp, *Aspergillus* sp. (Figura 5). Estos géneros de hongos ya han sido descritos en la literatura por poseer maquinaria enzimática que les permite actuar sobre algunos sustratos específicos presentes en el ambiente ⁸⁶.

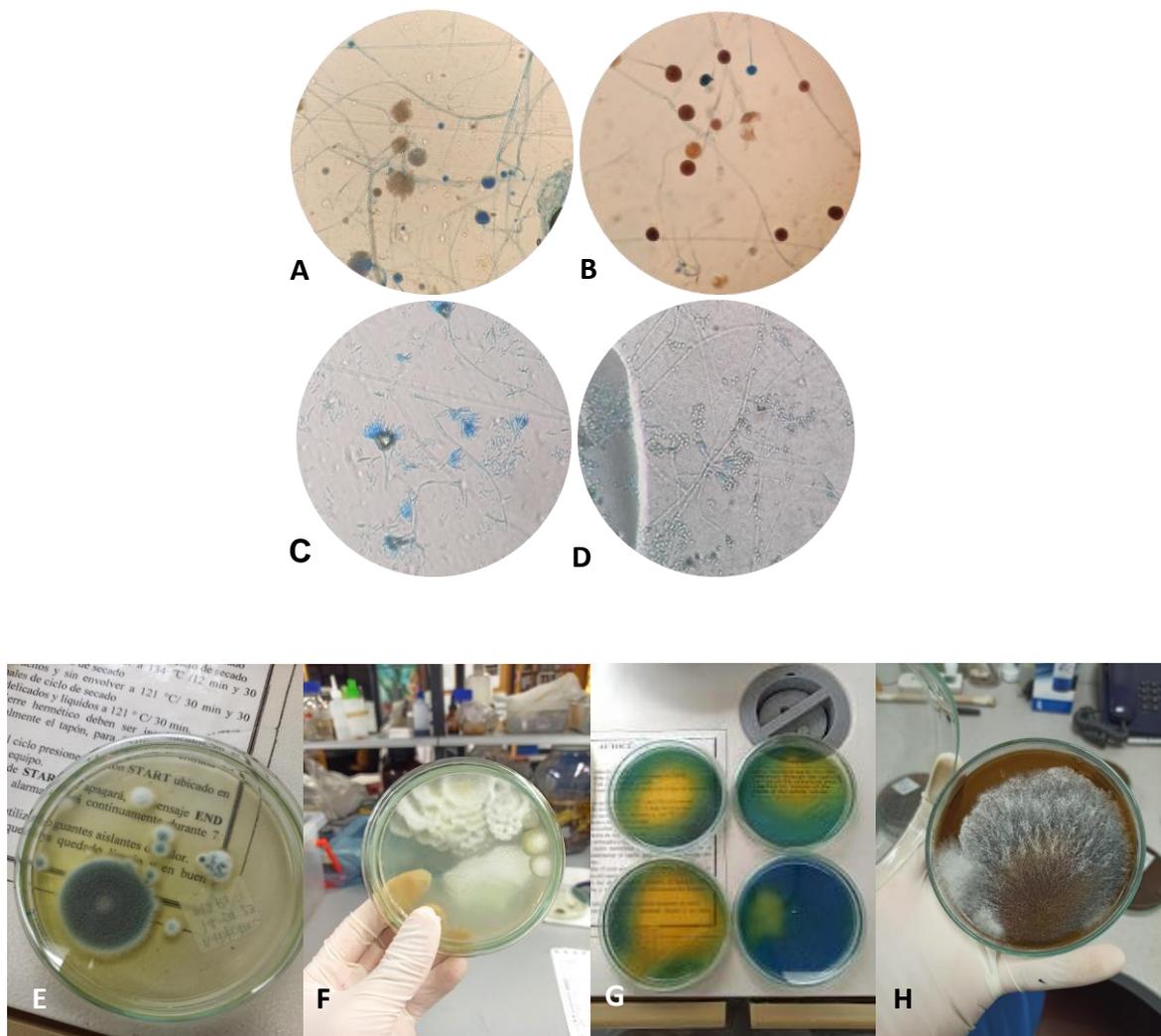


Figura 5. Hongos aislados **A.** *Rhizopus* sp. **B.** *Rhizopus* sp. **C.** *Penicillium* sp. **D.** *Aspergillus* sp. **E-F.** Crecimiento de colonias fúngicas proteolíticas en agar peptona de caseína **G.** Cambio de color agar Pikovskaya modificado (solubilizadores de potasio). **H.** Crecimiento en agar GAE (ligninolíticos).

En cuanto a la densidad de los tres grupos funcionales evaluados, solamente uno presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$), que fue el caso de los hongos ligninolíticos.

6.3.1. Hongos proteolíticos

Con respecto a la presencia de hongos proteolíticos en las muestras recogidas y analizadas, la figura 7.A. Permite ver de manera comparativa entre los tratamientos, la densidad de los grupos fúngicos evaluados con algunos datos atípicos tanto para los tratamientos de biochar como para el compost. El compost fue el tratamiento en donde se mantuvieron los recuentos finales más estables. En este grupo funcional en particular no se logró evidenciar una diferencia significativa ($p > 0,05$) en los tratamientos entre sí.

6.3.2. Hongos ligninolíticos

De los tres grupos funcionales evaluados en cuanto a su densidad, los hongos ligninolíticos fueron los únicos que demostraron una diferencia significativa entre los tratamientos ($p > 0,05$), sugiriendo que son un grupo indicador temprano de cambios en los tratamientos aplicados sobre el suelo. En este caso el control fue el tratamiento con el que se obtuvo diferencia estadísticamente significativa ($p > 0,05$) con respecto a los demás tratamientos evaluados evidenciándose una menor densidad microbiana dentro del mismo orden.

6.3.3. Hongos solubilizadores de potasio

La densidad de los hongos solubilizadores de potasio obtenida con la aplicación de los tratamientos presentó los datos más uniformes, partiendo con recuentos en un primer muestreo superiores a Log 3,00 UFC/g. El comportamiento de los datos fue muy similar, mostrando en los diferentes muestreos tanto aumento como disminución de la densidad de los grupos funcionales microbianos evaluados. Al igual que para los hongos proteolíticos, para este grupo funcional no se obtuvo diferencia significativa entre tratamientos ($p > 0,05$).

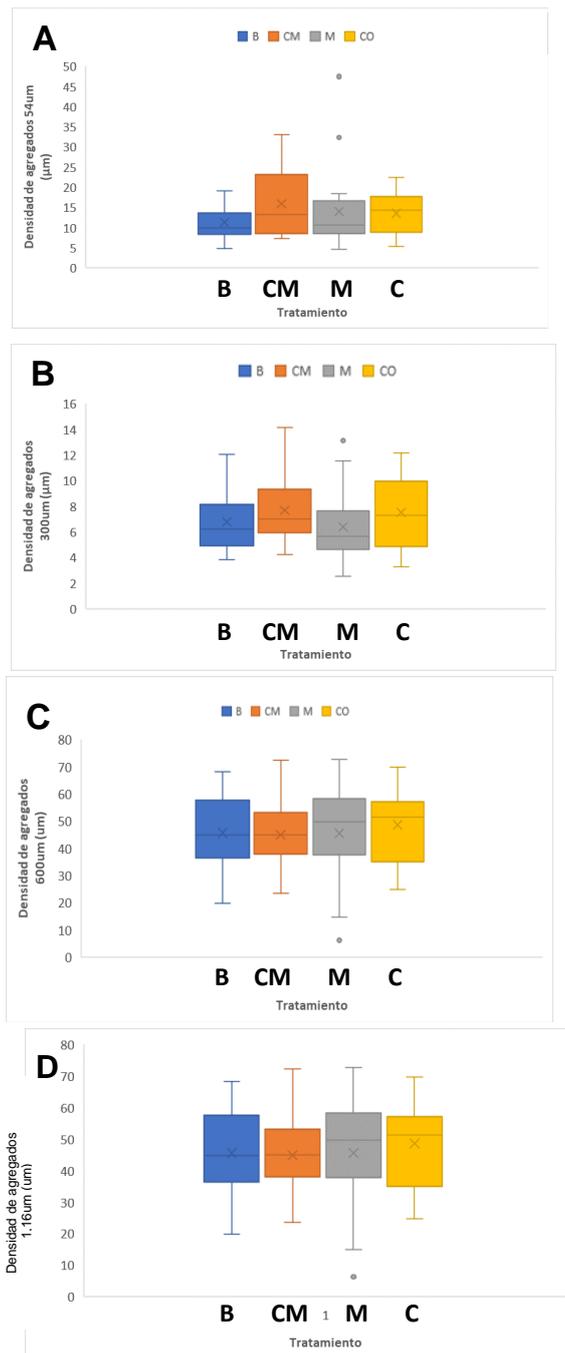


Figura 6. Gráfico de cajas y bigotes de la distribución de tamaño de agregados del suelo. Las cajas representan los percentiles 75 (cuartil superior) y percentil 25 (cuartil inferior), sus líneas paralelas representan la variabilidad que hay fuera de estos cuartiles. La mediana está representada por línea horizontal dentro de cada caja. Los puntos fuera de los bigotes son valores atípicos. B: Biochar CM: Compost M: Mezcla C: Control. **A.** Densidad agregados 54 μm **B.** Densidad agregados 300 μm **C.** Densidad agregados 600 μm **D.** Densidad agregados 1,16 mm

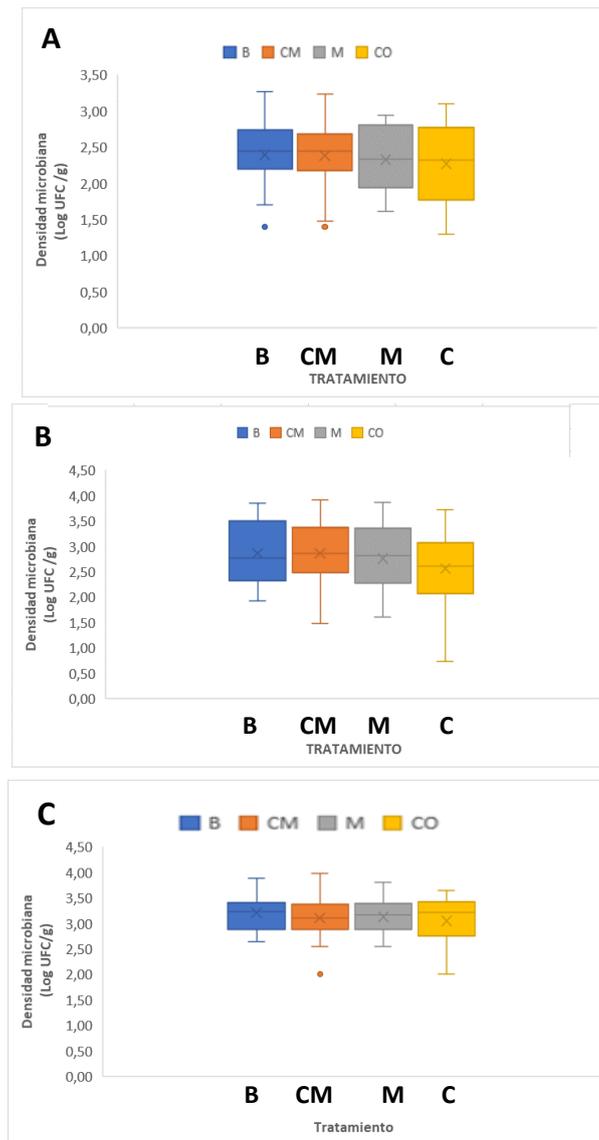


Figura 7. Gráfico de cajas y bigotes de densidad grupos funcionales evaluados. Las cajas representan los percentiles 75 (cuartil superior) y percentil 25 (cuartil inferior), sus líneas paralelas representan la variabilidad que hay fuera de estos cuartiles. La mediana está representada por línea horizontal dentro de cada caja. Los puntos fuera de los bigotes son valores atípicos. B: Biochar CM: Compost M: Mezcla C: Control. **A.** Hongos proteolíticos **B.** Hongos ligninolíticos **C.** Hongos solubilizadores de potasio

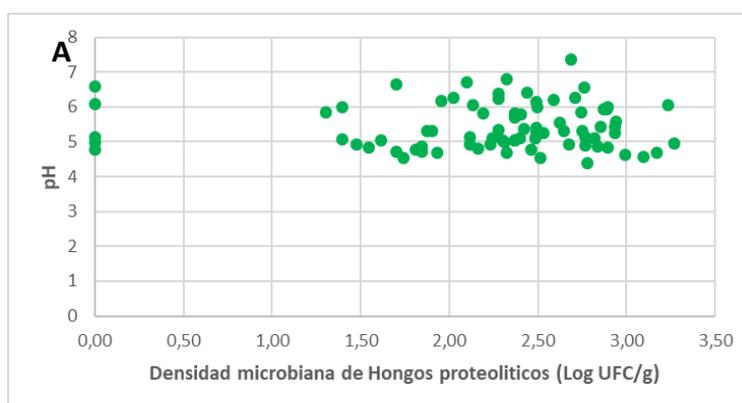
6.4. Pruebas de correlación

Para tratar de establecer una relación entre los parámetros fisicoquímicos y la determinación de la densidad en los tres grupos funcionales analizados, se correlacionaron los resultados de dichas variables con la prueba estadística de correlación de Spearman. (Tabla. 2)

Tabla 2. Pruebas de correlación entre parámetros fisicoquímicos y densidad microbiana de los tres grupos funcionales.

Correlación		Spearman's r_s	Significancia ($p > 0,05$)
pH	Hongos proteolíticos	0,018	0,86
pH	Hongos ligninolíticos	0,128	0,25
pH	Hongos solubilizadores de potasio	0,018	0,86

Finalmente, con los valores obtenidos de r_s y el nivel de significancia ($p > 0,05$) se determinó que no hubo relaciones significativas con las variables fisicoquímicas que explicaran las densidades microbianas. Los datos presentaron comportamientos muy variables evidenciados en la dispersión de estos en la gráfica. (Figura. 8)



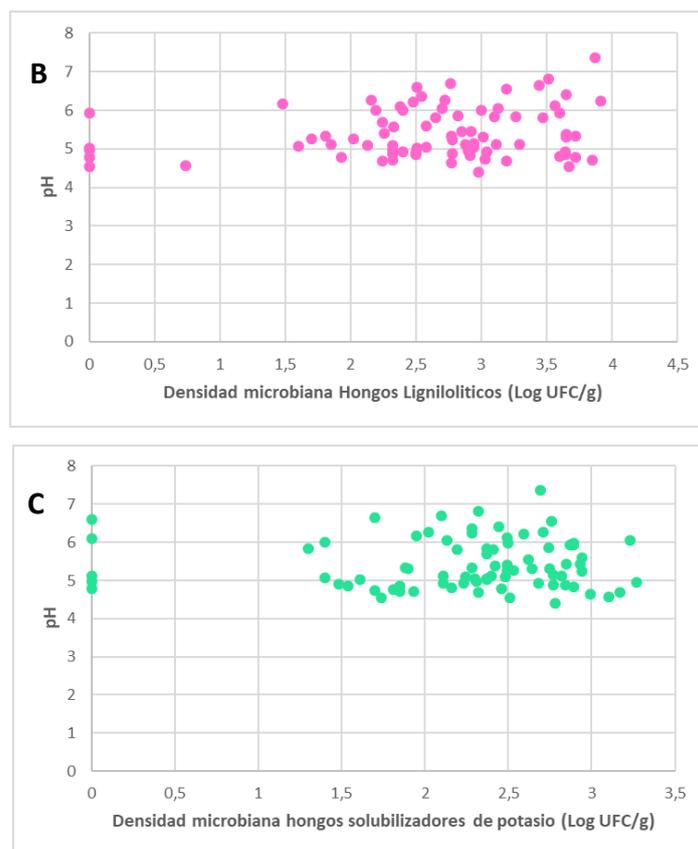


Figura 8. Gráfico de dispersión de los valores de la variable del pH con los grupos funcionales. **A.** Hongos proteolíticos **B.** Hongos ligninolíticos **C.** Hongos solubilizadores de potasio

7. DISCUSIÓN

La recuperación de suelos que han sido afectados por la explotación ladrillera es un desafío importante debido a los cambios en la estructura, la textura y la calidad del suelo que esta actividad ocasiona ⁸⁷. Sin embargo, es posible llevar a cabo procesos de restauración y recuperación para mejorar la salud y la funcionalidad de estos suelos, con el uso de estrategias orgánicas destinadas a contrarrestar el impacto y generar una recuperación de los parámetros fisicoquímicos, e indirectamente estimulación de la biomasa microbiana que participa en los ciclos biogeoquímicos que ocurren en el suelo ⁸⁸.

El entorno de la ladrillera se encuentra expuesto a la emisión de gases generados por los procesos de combustión, acidificando el medio, por lo que el uso de las enmiendas orgánicas se convierte en una solución efectiva para aumentar el pH del suelo entre otras características.

Por su parte, el compost contiene materia orgánica que actúa como un regulador de pH natural, el cual al incorporarse al suelo ayuda a aumentar la capacidad de neutralizar la acidez o alcalinidad, lo que conduce a un pH más equilibrado ⁸⁹. Con los resultados obtenidos se confirma la acción benéfica del compost, tanto así que fue el único tratamiento distinto frente a los demás en lo que corresponde al pH (5,52), con una diferencia de 0,12 en aumento con las parcelas control. Por lo que según Huaraca et al. (2020) el uso continuo de enmiendas orgánicas puede mejorar la estructura del suelo y la actividad microbiana, lo que a su vez contribuye a mantener un pH adecuado a largo plazo.

Sin embargo, al hacer uso de otro tipo de enmiendas como el biochar se debe tener en cuenta que suele manejar un pH alcalino y dependiendo de la dosis aplicada al suelo, puede ejercer un efecto de encalado sobre el mismo, como se demuestra en una investigación enfocada en los efectos del biochar en el suelo la cual determinó que su pH alcalino, con alto contenido de carbono, influye directamente en una disminución del contenido de nutrientes. En este caso, al tener un suelo ácido, el aumento del pH puede mejorar su calidad, aumentar la disponibilidad de nutrientes y reducir la reserva de elementos perjudiciales para el suelo ⁹⁰. Según lo esperado, el compost tuvo una tendencia a equilibrar el pH, por el contrario, el biochar no tuvo un efecto alcalinizante, sino que mantuvo el suelo ácido.

El porcentaje de humedad tuvo un comportamiento inesperado, un descenso entre el cuarto y séptimo mes de haber iniciado el montaje. Según los beneficios de las enmiendas orgánicas se esperaba lo contrario. Sin embargo, como lo plantea (Valverde, 2010) los factores ambientales tienen repercusiones en estos parámetros, por lo que las precipitaciones excesivas pueden causar inundaciones y erosionar el suelo. Es necesario mencionar que se trabajó en un suelo arcilloso, que cuenta con un tamaño de poros mucho menor que otros tipos de suelo. Estos favorecen a la retención de agua en periodos prolongados; a pesar de que brindan este beneficio, precisamente al tener poros pequeños se puede dificultar el movimiento de agua, generando problemas de encharcamiento e influencia en la actividad de los microorganismos en el suelo por la disminución de oxígeno, retardo en los ciclos biogeoquímicos y pérdida de la diversidad microbiana ⁹¹.

La recuperación de la materia orgánica favorece que el suelo cuente con nutrientes esenciales para que los microorganismos puedan participar en la transformación y mineralización, aumentando la disponibilidad de P, K, Ca, Mg y Cu de forma permanente. Esto permite

estimular la competencia de la microbiota reduciendo la presencia de microorganismos patógenos, generando sinergias que impidan la liberación de gases efecto invernadero como CO₂ y N₂O a través de la formación de micorrizas que absorben nitrógeno. Si bien las enmiendas orgánicas están enfocadas a la recuperación del porcentaje de M.O y demás variables fisicoquímicas, debe tenerse en cuenta varios factores que influyen inesperadamente para mejorar su condición, considerando la idoneidad del entorno, condiciones climáticas, calidad del suelo, textura y cantidad del tratamiento por utilizar, lo que permitiría estimar o no los cambios significativos esperados ⁸⁸.

La actividad minera compacta el suelo por el uso de maquinaria para lograr su fin. Es por ello la relevancia de conocer la porosidad y estructura del suelo mediante la relación de densidad aparente y materia orgánica del suelo para entender su calidad. La materia orgánica en el suelo tiene un impacto significativo en la densidad aparente y, por ende, en la estructura y las propiedades físicas del suelo. Con un buen manejo, se estima que cuanto mayor sea la densidad aparente, más compacto estará el suelo, dificultando la retención de agua y circulación de aire.

Cuando se combinan biochar y compost en la recuperación de las densidades del suelo, se pueden obtener beneficios sinérgicos, ya que el biochar retiene agua y nutrientes, mientras que el compost aporta materia orgánica y mejora la actividad microbiana. Pese a sus beneficios pueden presentarse limitaciones debido a las condiciones específicas en suelos de explotación ladrillera; la contaminación por metales pesados, degradación y/o proporción inadecuada pueden no ser suficientes para mitigar adecuadamente los efectos de la contaminación y no evidenciar cambios significativos ($p > 0,05$) en el transcurso de los meses, lo que puede deberse a las dosis aplicadas, la naturaleza arcillosa del suelo y el tipo de respuesta comparada al tiempo en que el suelo ha sido explotado, no hay un equilibrio lo que muestra resultados no significativos ($p > 0,05$) no sólo para las densidades en suelo, sino también para las demás fisicoquímicas ⁹².

El tamaño de poro del biochar y su tiempo de generación pueden influir en la eficiencia para mejorar el suelo, especialmente en la interacción con los hongos y otros microorganismos del suelo ⁹³. La dimensión de los poros se relaciona con la retención de agua y disponibilidad de nutrientes, los poros pequeños resultan ser más beneficiosos tanto para las plantas como para los microorganismos. Asimismo, el tiempo y temperatura de generación se reduce a tiempos prolongados con temperaturas elevadas puede tener una mayor estabilidad y capacidad para

retener nutrientes que cuando se utilizan temperaturas excesivamente altas y tiempos muy prolongados, puede generar un producto mucho más denso que dificulta la interacción de nutrientes y microorganismos ⁹⁴.

La densidad real del suelo es una medida importante para comprender la composición de las partículas minerales en el suelo y cómo están empaquetadas; esta puede variar según el tipo de suelo y su contenido mineral ⁹⁵. La explotación ladrillera puede tener un impacto significativo en la densidad real, por lo general tiende a aumentarla debido a la compactación resultante de las operaciones de extracción y procesamiento de arcilla. En este caso el promedio de los tratamientos fue de 2,55 encontrándose dentro de un parámetro normal para suelos ⁹⁶. Los suelos arenosos tienden a tener una densidad real más baja debido a que las partículas minerales más grandes están menos apretadas, mientras que los suelos arcillosos tienen una densidad real más alta debido a la fina textura y la compactación de las partículas. Su relevancia radica en la caracterización de suelos, ya que puede proporcionar información sobre la estructura y la textura del suelo, así como sobre su capacidad para retener agua y nutrientes ^{97,98}.

Como se ha documentado, en suelos con textura arcillosa se esperaría una densidad mayor frente a los demás tipos de suelo, debido a la compactación de las partículas de arcilla que a largo plazo podría generar problemas en la retención de agua y aireación. Es por eso que la recuperación de suelos es un proceso que requiere tiempo y en este caso, no fue el suficiente para que los componentes minerales y las sustancias aplicadas en el suelo pudieran interactuar. Entonces en un principio las variables se pueden ver que responden de manera contraria a lo esperado, tomando en cuenta que el suelo apenas está iniciando su proceso de adaptación a los tratamientos. Además, es esencial llevar a cabo un monitoreo ambiental adecuado y adoptar prácticas de gestión sostenible para mitigar los efectos negativos en el suelo y el ambiente ⁹⁹.

Teniendo en consideración otras variables, en el tamaño de los agregados no se observaron cambios significativos ($p > 0,05$) en ninguna de las parcelas tratadas, este parámetro se vio afectado nuevamente por el tiempo de aplicación de los tratamientos, debido a que se requiere de un periodo mayor para estimar cambios en el tamaño de las partículas de los agregados en el suelo. Según lo documentado, se obtienen diferentes resultados para cada tratamiento, con la materia orgánica por lo general se ve mejoría en la estabilidad de los agregados; gracias a las propiedades de los microorganismos que tienden a unir las partículas de suelo, sin embargo, es complejo mantenerlo estable sin las condiciones adecuadas. Por su parte, el compost ha

tenido resultados poco concluyentes. Se esperaría que a largo plazo se mejore la estructura y estabilidad de los agregados ¹⁰⁰.

En relación con los parámetros fisicoquímicos del suelo, el uso de recuperación que podrían tener esas parcelas está destinado a la revegetalización de la zona afectada y recuperación de la cobertura vegetal eliminada por las actividades extractivas de arcilla. Con el paso del tiempo naturalmente sea colonizado por diferentes tipos de plantas capaces de sobrevivir en suelos con estas condiciones específicas que brindan estabilidad al suelo y que la capa verde de vegetación no sólo sea un aporte estético sino también de estructura y soporte que evite la degradación del suelo para que se retome al ecosistema original, vegetación de un bosque Altoandino.

La evaluación desde una perspectiva microbiológica se realiza por medio de la determinación de la densidad microbiana de microorganismos con capacidades metabólicas especiales conocidos como grupos funcionales entre los que se encuentran los hongos proteolíticos, ligninolíticos y solubilizadores de potasio. Son importantes porque son capaces de actuar sobre diversos sustratos además de participar en los ciclos biogeoquímicos los cuales son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas ¹⁰¹.

El tratamiento con EM está formado por múltiples tipos de microorganismos (diversos tipos de bacterias, levaduras) los cuales poseen diferencias en su metabolismo. Estas diferencias en el metabolismo influyen en la eficiencia de la utilización de diversos sustratos y a su vez en que productos libera y deja disponibles en el medio. Un elemento importante es el carbono el cual es utilizado para fines energéticos y para la síntesis celular. Dentro del ciclo del carbono, la asimilación de este elemento es más eficiente en los hongos que en otros tipos de microorganismos lo que conlleva a una menor liberación de productos orgánicos y de CO₂ al medio, caso contrario a las bacterias. Una forma de inmovilización es la asimilación de nutrientes inorgánicos en donde participan comunidades microbianas con el fin de usar los nutrientes para la formación de nuevo material celular. Es por ello por lo que la magnitud de la inmovilización de estos elementos es proporcional a la cantidad de células y filamentos microbianos formados y a su vez con la asimilación de carbono ¹⁰².

Con el uso de enmiendas orgánicas como el biochar ha de esperarse resultados de aumento en la densidad de los hongos evaluados, ya que este por sus características como la gran cantidad

de poros que posee es capaz de brindar una mayor superficie que los microorganismos pueden emplear como hábitat y puedan colonizar ¹⁰³. Situación que no pasó en este estudio debido a que no se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la densidad de los grupos funcionales entre los tratamientos, a excepción de los hongos ligninolíticos.

El único grupo funcional que mostró diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos fue el de hongos ligninolíticos. Los hongos de la podredumbre blanca han sido descritos en procesos de biorremediación de suelos por ser capaces de actuar sobre el segundo polímero más abundante, la lignina ^{34, 104}. En este caso, los hongos hacen parte del grupo restringido de microorganismos que poseen capacidad de degradación de la lignina. Para que los microorganismos puedan crecer y a su vez descomponer la lignina requieren de condiciones adecuadas de nutrientes, humedad, pH, temperatura y aireación.

Los nutrientes aportados por los tratamientos (compost y biochar) permitieron que estos crecieran y se desarrollaran, lo que facilita el proceso de degradación de la lignina en este tipo de suelo. Al ser el único que presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$), se sugiere como un grupo indicador temprano de cambios en los tratamientos aplicados sobre el suelo con un aumento de su densidad ¹⁰⁵. Para que se pueda dar ese posible predominio de un grupo específico de microorganismos, como en este caso los hongos, se explica en lo mencionado anteriormente, la existencia de condiciones óptimas de nutrientes como la abundancia de restos vegetales en el suelo que impide en gran medida que haya una competencia por alimento. Además, también por la sinergia con las bacterias fotosintéticas presentes en la solución de EM, las cuales incluso han sido reportadas por su participación en el metabolismo de la lignina con la utilización de enzimas como la lactasa ¹⁰⁶.

Los hongos proteolíticos son un grupo importante de microorganismos que pueden estar presentes en el suelo y que tienen la capacidad de producir una serie de enzimas proteolíticas con el fin de hidrolizar los enlaces peptídicos de otras proteínas ¹⁰⁷. Su importancia radica en la participación inicial en el ciclo del nitrógeno en donde usa principalmente las proteínas como sustrato y las fragmenta en compuestos asimilables como péptidos y aminoácidos libres en donde estos últimos pueden ser empleados como fuentes de carbono y nitrógeno por muchos organismos heterótrofos ¹⁰⁸. Las enzimas de estos microorganismos han sido estudiadas a nivel industrial, funcionando a un pH óptimo entre 4,0 y 4,5 y son estables entre pH 2,5 y 6,0.

Además de esto, con su participación en el ciclo del nitrógeno permiten la liberación de H⁺ a partir de la oxidación de NH₄⁺ lo que favorece la acidificación del suelo ¹⁰⁹.

A pesar de las diferentes ventajas que se han mencionado que trae el aporte de enmiendas orgánicas como el biochar, se debe tener en consideración que también genera impactos negativos sobre los microorganismos, debido a que se puede dar una reducción de las poblaciones microbianas como los hongos debido a la competencia de nutrientes. En esta competencia estarían involucradas las levaduras presentes en la solución de EM que requieren como fuente de nitrógeno el amoníaco, la urea o sales de amonio y mezcla de aminoácidos, lo cual pudo haber intervenido al momento de obtener de diferencias significativas ($p > 0,05$) de la densidad microbiana entre los tratamientos ¹¹⁰.

Con respecto a la solubilidad del potasio, esta es elevada cuando los suelos presentan pH alto situación que no se dio en este ensayo ¹¹¹. Esto pudo incidir en cuanto a que la densidad de los hongos solubilizadores de potasio no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$).

En el proceso de solubilización del potasio intervienen diferentes tipos de microorganismos, pero varía de acuerdo con las condiciones que presente en el suelo ¹¹². De acuerdo con la literatura, se ha evaluado las concentraciones de potasio proporcionados por el biochar a las plantas, donde demostraron que la absorción de este elemento aumenta en igual magnitud que la cantidad de biochar que se agrega; es por ende que los niveles de este macronutriente no son deficientes para las plantas ¹¹³.

Con el uso del compost y EM hay alta disponibilidad de materia orgánica lo que permite que las concentraciones de potasio sean elevadas por la descomposición de esa materia orgánica en presencia de estos microorganismos solubilizadores de potasio, caso contrario a cuando se usa solo la solución de EM, la cual contiene bajas concentraciones de materia orgánica y por ende las concentraciones de este elemento se verán disminuidas ¹¹⁴.

Para la producción de ladrillos en Colombia se utilizan mezclas de 55% arcillas de cascajo y 45% de arcilla amarilla. Este tipo de material arcilloso es considerado la fuente principal de K en el suelo, debido a que este elemento puede mantenerse unido mediante cargas eléctricas negativas en la superficie o en los bordes de las láminas de la arcilla. Entre más débilmente

sea la unión, más fácil e intercambiable será el potasio y podrá ser liberado a la solución de suelo ¹¹⁵. En otro caso, una retención fuerte de este elemento se da entre las capas de la arcilla en donde por ciclos de humedad y secamiento, esta se expande y se contrae respectivamente, liberando el potasio. Sin embargo, esta liberación del potasio fijado no es completa y es más demorada ¹¹⁶. Además, la fijación de este elemento puede disminuir cuando el pH del suelo es ácido por la presencia de polímeros de aluminio separando las interláminas y reduciendo la carga efectiva y la salida del K ¹¹⁸.

Por lo anterior, el aporte de potasio desde la arcilla va a depender del tipo de arcilla presente en el suelo y la cantidad de esta, es decir, cuanto mayor sea el contenido de arcilla en el suelo más grande será su capacidad para absorber el K y mayor será su habilidad para reponerlo a la solución de suelo cuando éste disminuye en su concentración ¹¹⁹.

Adicionalmente, para la disponibilidad de este elemento en el suelo tanto para las plantas como para otros organismos, los hongos que facilitan la solubilización del K tienen una función crucial en hacer que el potasio sea más accesible estos, transformando compuestos de K poco solubles en formas que las plantas pueden absorber fácilmente ¹²⁰. Sin embargo, no solo la disponibilidad va a depender de las concentraciones de arcilla que tenga el suelo sino también de otros parámetros fisicoquímicos como la temperatura del suelo en donde se ve afectada la difusión del K y la actividad de las raíces de las plantas ¹¹⁷.

La relación entre C y N funciona como un indicador clave de la cantidad relativa de carbono orgánico respecto al nitrógeno en la materia orgánica presente en el suelo. Su importancia radica en que afecta la velocidad de descomposición de la materia orgánica mediante microorganismos descomponedores que necesitan C y N en una proporción específica para llevar a cabo eficientemente la descomposición. Una relación baja favorece una descomposición más rápida ya que hay suficiente nitrógeno disponible en comparación con el carbono ¹²¹. En el montaje experimental, posiblemente el N estaría limitando el C para ser usado por los microorganismos dado las bajas concentraciones de materia orgánica, principalmente en las parcelas control que no contenían nada, pero sí mostraba recuentos similares a las parcelas que sí contaban con un tratamiento, es aquí donde los EM utilizan lo mínimo que hay dejando pocos reservorios de nutrientes para los demás microorganismos. El N en el medio pudo haber sido provisto por las plantas que mueren, raíces e insectos que

también contribuyen en la materia orgánica, observaciones que se realizaron en las distintas tomas de muestra.

Con la implementación de los microorganismos eficientes en los tratamientos, se buscó agregar un valor extra a los beneficios ya presentes en las enmiendas de manera individual. Al tratarse de una sustancia que contiene diversos grupos de microorganismos, estos participarán activamente en el ciclo de nutrientes descomponiendo compuestos orgánicos complejos en formas más simples. Asimismo, contribuirían a la descomposición de la materia orgánica, mejora de la estructura del suelo y favoreciendo el crecimiento vegetal mediante la generación de sustancias que provocan respuestas beneficiosas en las raíces, al tiempo que inhiben la proliferación de patógenos ¹²². La aplicación de los EM podría potencialmente generar antibiosis, ya que ciertas bacterias y hongos presentes podrían producir compuestos que limitan el desarrollo de patógenos en el suelo, ayudando así a prevenir enfermedades en las plantas y reduciendo la competencia por nutrientes en el entorno ¹²³.

En aspectos generales, no se evidenciaron mejoras notables en la mayor parte de los tratamientos, aunque algunos empezaron a mostrar avances, esto se debe a que la recuperación de suelos es un proceso que requiere tiempo y constancia. Sin embargo, en este caso no fue el suficiente para que los componentes minerales y las sustancias aplicadas en el suelo pudieran interactuar, por lo que en un principio las variables se pueden ver contrario a lo esperado, teniendo en cuenta que el suelo apenas está iniciando su proceso de adaptación a los tratamientos ¹²⁴. Se recomienda estudios futuros en donde se establezcan otras variables fisicoquímicas como la concentración de nutrientes como el K, N, C, la relación entre los mismos, la conductividad eléctrica para una correlación más amplia con los grupos funcionales no solo los evaluados en este trabajo.

CONCLUSIONES

Se evidenció que las enmiendas orgánicas evaluadas proporcionaron leves mejoras respecto a ciertos parámetros con algunos de los tratamientos, sin embargo, se debe tener en cuenta que los procesos de biorremediación para este tipo de impactos en el suelo, que eliminan por completo la capa orgánica y órgano-mineral, requieren tiempo y varias intervenciones para mantenerse estables. Por lo que lo ideal sería volver a analizar cada parámetro en un período más extenso, esperando una mejoría más notable, teniendo en cuenta los factores ambientales y climáticos.

Respecto a la densidad microbiana se determinó que los hongos ligninolíticos se proponen como un grupo indicador temprano de cambios en los tratamientos aplicados sobre el suelo, posiblemente debido a que presentan características especiales como la degradación de lignina y otros compuestos o también por su resistencia a las condiciones ambientales. Esto les permite descomponer en un menor tiempo la materia orgánica y a su vez mejorar la estructura del suelo, aumentando su porosidad y facilitando la infiltración de agua.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos: la humedad, densidades, tamaño de distribución de agregados y materia orgánica, es probable que tarden más de siete meses en evidenciar procesos de recuperación del suelo frente a tratamientos como el compost, microorganismos eficientes y biochar, cuando el suelo ha sido fuertemente impactado por actividades antrópicas como la minería. Debido a que hasta el momento su regeneración no fue lo suficientemente significativa.

Al realizar la respectiva comparación, ninguno de los parámetros fisicoquímicos del suelo permitió explicar la densidad de los grupos funcionales evaluados durante el periodo de aplicación de las enmiendas orgánicas, de modo que no se logró encontrar una correlación entre estos parámetros o algún indicio de que alguno impacte directamente en el otro en los aspectos analizados. Aunque es posible que con el tiempo se pueda evaluar nuevamente la interacción entre estos, cuando el suelo probablemente esté en mejores condiciones gracias a las enmiendas y nos permita encontrar una relación entre los parámetros analizados.

Finalmente, se recomienda el uso de las enmiendas orgánicas utilizadas en este proyecto, principalmente del compost, ya que es catalogado como una buena alternativa a los fertilizantes químicos por sus aportes al suelo, pese a que la obtención de resultados no se puede apreciar de manera inmediata, sin embargo, en un tiempo adecuado se evidencian efectos muy positivos para el suelo y todos los procesos que se llevan a cabo en el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Burbano, H. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. 2016. *Revista de Ciencias Agroambientales* 33(2) 117 - 124. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
2. Corporación Ambiental Empresarial CAEM. Inventario Nacional del Sector Ladrillero Colombiano. 2015. Pag. 9.
3. Ortega J, et al. *La Gestión Ambiental Y Su Impacto En El Desarrollo De Las Actividades Productivas*. Cap 5; 2018.
4. Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible. Portafolio de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el sector alfarero y de producción de ladrillo en Colombia. 2021.
5. Almeida, J. Impactos ambientales provocados por la extracción de arcilla en el municipio de Ibiassucê-BA. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Año 05, Ed. 09, Vol. 03, págs. 35-46. ISSN: 2448-0959
6. Gómez Reyes JA, Luna Fontalvo JA. Grupos funcionales microbianos en suelos contaminados con toxafeno en el departamento del Cesar, Colombia. *Rev. luna azul (En línea) [Internet]*. 2018; (47):98-113. Disponible en: <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/3070>
7. Torres, M. y Lizarazo, L. Evaluación de grupos funcionales del ciclo del C, N y P y actividad de la fosfatasa ácida en dos suelos agrícolas del departamento de Boyacá. 2006. *Agronomía Colombiana*, 24 (2), 317-325
8. Sivila, R. y Ángulo, W. Efecto del descanso agrícola sobre la microbiota del suelo (Patarani-Altiplano Central boliviano). 2010. *Ecología en Bolivia*, 41 (3), 103-115
9. Mora, J. La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad del suelo. *Revista Luna Azul*. 2006.
10. Montaña, M. et al. Variación espacial y estacional de grupos funcionales de bacterias cultivables del suelo de un bosque tropical seco en México. 2013. *Revista de Biología Tropical*, 61 (1), 439-453
11. Castillo, M. *Adaptación De Microorganismos Fijadores De Nitrógeno De Vida Libre A Diferentes Concentraciones De Sales De Amonio*. Universidad Del Valle; 2019.
12. Sánchez M, Zapata L. Impacto ambiental y gestión del riesgo de ladrilleras en la vereda Los Gómez de Itagüí, *Cuaderno Activa*. 2013: 5: (109-123).
13. Afanador N, et al. *Propiedades Físicas Y Mecánicas De Ladrillos Macizos Cerámicos Para Mampostería*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 22, núm. 1, junio, 2012, pp. 43-58.
14. Cañón, M. Formulación de indicadores basados en el modelo presión estado respuesta (per) para explotación minera en el municipio de Cogua- Cundinamarca. [Internet]. 2018. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/14006>
15. Salinas, H. y Salazar, D. Cadenas operativas y sistemas de explotación minera prehispánica. *Puentes hacia el pasado: Reflexiones teóricas en arqueología*. 2008. (pp. 73-91). Santiago: Monografías de la Sociedad Chilena de Arqueología.
16. Orgaz, Martín, & Ratto, Norma. Minería de las arcillas en tiempos prehispánicos (departamento Tinogasta, Catamarca, Argentina). *Estudios atacameños*, 2020. (66), 35-48.

17. Cárdenas M, Reina M. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal. 2008. Disponible en: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/893>
18. Boza, M, Montoya, M. Sector minero en Colombia. [Internet]. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, 2020. Anuario iberoamericano de derecho minero: fundamentos jurídicos del sector minero en Iberoamérica.
19. Astaiza E, Llanos D. Diagnóstico de la actividad ladrillera y caracterización del tipo de arcillas empleadas en la vereda de Pueblillo, Popayán, Cauca, en búsqueda de alternativas de producción para minimizar los impactos ambientales. 2019. Universidad Autónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
20. Charari D, Palomino D. Tipificación y análisis de precios unitarios para construcciones utilizadas en la industria ladrillera en los municipios de Cogua y Nemocón departamento de Cundinamarca y Roldanillo y Bolívar departamento Valle Del Cauca Año 2022. [Internet]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/30156>
21. Vargas, L. Evaluación de indicadores microbiológicos en suelos de un área impactada por la minería de oro, en el municipio de Santa Isabel Tolima. 2017. [Internet]. Ibagué: Universidad del Tolima.
22. Guillermo PM. Análisis de la microbiota de los suelos impactados y no impactados por minería metálica en República Dominicana. 2016.
23. Beltrán, M. et al. Microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá. Colombia Forestal, 2017. 20 (2), 158-170
24. Otones, V. Diagnóstico ambiental de suelos contaminados por actividades mineras y evaluación de técnicas de estabilización para su recuperación. Ediciones Universidad de Salamanca; 2019.
25. Prieto, M. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Universidad de Córdoba, UCO Press; 2016.
26. Quiroz L, et al. Biochar effect, mycorrhizae and Guazuma ulmifolia, in early mining soil rehabilitation stages. *Terra Latinoamericana*, 39, e 709. 2016. Recuperado de: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.709>
27. Díaz L, Laguna H, Gutiérrez, Melo A, Vega A. Tratamiento de suelos mineros mediante compostaje con Biochar, estiércol ovino y residuos orgánicos domiciliarios. Revista MAMYM [Internet]. 2020;5 (2) 11–8 Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522020000200002&script=sci_arttext
28. Nuñez, E., Tarrillo, M. Análisis de los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros producto de la actividad minera. [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/30726>
29. Fernández, A., Perdomo, L. Grupos Funcionales de Microorganismos (fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfato y celulolíticos) en suelos de agroecosistemas cafetaleros (ecológicos y convencionales) en Anolaima, Cundinamarca. [Internet]. 2015. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10901/11255>
30. Zamora A, Ramos J y Arias M. Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana. 2012. BIOAGRO, 24 (1), 5-12.

31. Gómez A, Cruz A, Jiménez D, Ocampo A, Parra S. Biochar Como Enmienda En Un Oxisol Y Su Efecto En El Crecimiento De Maíz. Universidad de Ciencias Aplicadas. 2016; 19 (2): 341-349. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000200011&lng=en.
32. Da Silva, R. Bacterial and fungal proteolytic enzymes: production, catalysis and potential applications. 2017. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 183, 1-19.
33. Naveda R, Ricardo A, Jorge M, Paola A, Flores, L, & Visitación, L. Remoción de lignina en el pretratamiento de cascarilla de arroz por explosión con vapor. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2019; 85(3), 352-361. Recuperado de: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000300007&lng=es&tlng=es
34. Montoya, M. Muñoz, G. Degradación De Lignina En Lodos Provenientes De La Industria Papelera Mediante El Empleo Del *Ganoderma Lucidum*. 2020. Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/71398234.pdf>
35. Cardona, M., Osorio, J., Quintero, J. Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2009. (48), 27-37.
36. Delgado, D. Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámparakos*, 2017. 1(17), 77–83.
37. Laich, F. El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. ICIA. 21 de octubre de 2011: 1-7.
38. Solares, B. Reflexiones sobre la actual crisis de salud desde las ciencias humanas. 2020. Recuperado de: <https://cursospace.dgru.unam.mx/handle/123456789/592>
39. Souza PM, Bittencourt ML, Caprara CC, Freitas M, Almeida RPC, Silveira D, et al. A biotechnology perspective of fungal proteases. *Braz J Microbiol* [Internet]. 2015. Apr;46(2):337-46. Recuperado de: <https://doi.org/10.1590/S1517-838246220140359>
40. Wang, J., & Wang, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022. 2019. Recuperado de: 10.1016/j.jclepro.2019.04.282
41. Soto, G. y Muñoz, C. Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost, y su empleo en la agricultura orgánica. 2002.
42. Hoyos, D., Alvis, N., Jabib, N., et al. Utilidad de los microorganismos eficaces (EM®) en una explotación avícola de Córdoba: parámetros productivos y control ambiental. *Revista MVZ Córdoba*, 2008. 13 (2): 1369-1379.
43. Feijoo, M. Microorganismos eficientes y sus beneficios para los agricultores. *Científica Agroecosistemas*. 2016. 4 (2): 31-40.
44. Durán L, Guevara D, Hernández F, Ramírez F. Estrategia y Aprovechamiento de Materiales Sobrantes del Proceso de Explotación de la Mina y de Producción de la Ladrillera Framar Ltda. durante La Implementación del PMRRA. 2016. Repositorio de la Universidad Católica de Colombia.
45. Beltrán, M., Lizarazo, L. Grupos Funcionales De Microorganismos En Suelos De Páramo Perturbados Por Incendios Forestales. 2013.

46. Maceda A, Soto, M, Peña C, Trejo C, Terrazas, T. Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y bosques*, 2021; 27(2), e2722137. Disponible en: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
47. Beneficios de microorganismos solubilizadores de P y K en la recuperación y mantenimiento de suelos agrícolas. 2021. Disponible en: http://www.avocadosource.com/wac8/section_07/velazquezgurrolaa2015.pdf
48. León J, González M, Gallardo J. Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Revista de biología tropical* [Internet]. 2011 Diciembre; 59 (4): 1883-1894. DOI: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S003477442011000400037&lng=en.
49. Carreño, J. Evaluación de la diversidad taxonómica y funcional de la comunidad microbiana relacionada con el ciclo del nitrógeno en suelos de cultivo de arroz con diferentes manejos del tamaño. [Internet]. 2019. Repositorio de la Universidad Nacional.
50. Muñoz M., Delgado M., Lucas M. La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación: *Ecosistemas*, 2021. 30(3), 2238. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>
51. Lobos A. Metaanálisis y brechas del conocimiento en la literatura científica sobre el ciclo del fósforo en suelos (1975-2020) [Internet]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias; 2021-11.
52. Cerón L, Ancízar F. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología* [Internet]. 2012; 14(1):285-95. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-34752012000100026&script=sci_arttext
53. Avellaneda, T. Grupos funcionales de microorganismos del suelo asociados a cultivo de papa, ganadería y páramo del Parque Nacional Natural de Los Nevados, 1060 registros. 2022. En línea: http://ipt.sibcolombia.net/sib/resource.do?r=unal_gebix, publicado el 23/07/2013.
54. Torres, L. Evaluación de grupos funcionales (ciclo del C, N, P) y actividad de la fosfatasa ácida en dos suelos agrícolas del departamento de Boyacá (Colombia). 2003. *Agronomía Colombiana*, 24 (2), 317-325. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652006000200015&lng=en&tlng=es.
55. Manosalva S, Naranjo W. Geología y mineralogía de yacimientos de caolín en el departamento de Boyacá. I2 [Internet]. 3 de julio de 2007; 4(1):48-52. Disponible en: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/847
56. Martínez, M. Uso de materia orgánica y microorganismos en el manejo integrado de la nutrición. *Red Agrícola*: 16-22. Seminario internacional manejo integrado de la nutrición para una producción sustentable y de alta calidad. Santiago, 2014.
57. Dominchin M., Verdenelli R., Vargas S, Aoki A, Marin R., Meriles J. Efecto de la aplicación de biochar avícola sobre las propiedades químicas y microbiológicas de un suelo haplustol típico con diferentes intensidades de uso. *Ciencia del suelo*, 2019. 37(2), 315-327.
58. Kambo H, y Dutta A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359-378. 2015. Recuperado de: 10.1016/j.rser.2015.01.050

59. Weber, K. y Quicker, P. Properties of biochar. *Combustible*. 2018, vol. 217, pág. 240-261. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>.
60. Qian K, Kumar A, Zhang H, Bellmer D, Huhnke R. Recent advances in utilization of biochar. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2015;42:1055–64. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008995>
61. Azim K, Soudi B, Boukhari S, et al. Composting parameters and compost quality: a literature review. *Org Agric* [Internet]. 2018;8(2):141–58. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
62. Bárbaro L, Karlanian M, Rizzo P, Riera N. Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Child J Agric Anim Sci* [Internet]. 2019; 35. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0719-38902019000200126&script=sci_arttext
63. Soliva, M. y López, M. Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. *Escuela Superior de Agricultura de Barcelona*. España, 2004; 1-17.
64. Khater, G. Algunas propiedades físicas y químicas del compost. En t. *J. Residuos de recursos*, 2015, vol. 5, n° 1, pág. 72-79.
65. Seguel S, García G, Casanova P. Variación en El tiempo de Las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura técnica* [Internet]. 2003; 63(3):287–97. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072003000300008&script=sci_arttext
66. Cabrera, F., Madejón, E. Enmiendas para la recuperación de suelos contaminados por elementos traza. En: *Cabrera, F. Residuos orgánicos en la restauración/rehabilitación de suelos degradados y contaminados*. 2014. Ediciones MundiPrensa, Madrid, España.
67. Montoya S, Mora A y Vásquez, C. La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2020; 7(1), 58-68.
68. Durán L, Guevara F, Hernández F, y Ramírez D. Estrategia y aprovechamiento de materiales sobrantes del proceso de explotación de la mina y de producción de la Ladrillera Framar Ltda, durante la implementación del PMRRA. 2017.
69. Peñaranda Cañas, A., y Suárez Nogales, T. Diseño de un sistema de explotación a cielo abierto para la mina de arcillas ladrillera Zulia sa, municipio del Zulia Norte de Santander. 2018.
70. Pardo J, Mendoza J, Cantor N, Castro B, Cuevas D. Análisis de las principales implicaciones ambientales por la explotación minera en los sectores del suroriente de Bogotá por mal manejo de los cierres y abandonos al término de la explotación ejecutada. *Documentos Trab Areandina* [Internet]. 2019;(1). Disponible en: <https://revia.areandina.edu.co/index.php/DT/article/view/1461>
71. Paez J. Tipos de contaminantes atmosféricos asociados a la fabricación de ladrillos artesanales en Colombia. 2020. *Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente*.
72. Alarcón S, Burgos F. Plan de manejo ambiental para la Ladrillera El Santuario. [Internet]. 2015. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/3484>
73. Xiong J. Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (*Paulownia fortunei*). *Universidad de Sevilla*; 2015.

74. Antón C, Arranz J, Baretino D, Carrero G. Actuaciones para el reconocimiento y retirada de los lodos depositados sobre el terreno, y su restauración edáfica y morfológica. 2010. Boletín Geológico Minero, 93-121.
75. Hernández M. y García C. Enmiendas para la recuperación sostenible de los suelos. Residuos orgánicos en la restauración/rehabilitación de suelos degradados y contaminados. 2014. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
76. García, C. y Bedmar, M. Rehabilitación de suelos degradados y contaminados mediante la aplicación de compost. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R. (Eds.) Compostaje. 2007. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. Capítulo 18, pp. 425-448.
77. Alberto, J. Recuperación y rehabilitación de espacios verdes para una valoración y preservación del patrimonio natural y cultural de una ciudad: el caso del Parque Ávalos, Resistencia, Chaco, Argentina. 2016. Geográfica digital, 13(26), 1-20.
78. Pineda, J. Efecto de elementos orgánicos en la recuperación de suelo en explotación ladrillera de arcilla (Cogua, Cundinamarca). [Internet]. 2022. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10554/6322>
79. Grattelli S. Cuantificación de emisiones de Monóxido de carbono (CO), material particulado (PM10) y ruido asociado al sistema productivo de dos empresas ladrilleras de Pucallpa. 2022. Repositorio Universidad de Ucayali.
80. Ildefonso, P. Aproximaciones empíricas para la evaluación de la calidad del suelo: ventajas e inconvenientes. En: XX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, Conferencias. San Juan de los Morros, 25-29 de noviembre de 2013. pp. 1-14. http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/20_CVCS/index.htm
81. Calderón C, Bautista G, Rojas S. Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. Orinoquia [Internet]. 2018. DOI: <https://doi.org/10.22579/20112629.524>.
82. Burbano, H. La Calidad Y Salud Del Suelo Influyen Sobre La Naturaleza Y La Sociedad. Tendencias, 18(1), 118-126. <https://doi.org/10.22267/rtend.171801.68>
83. Antúnez B, et al. Propiedades físico - hídricas del suelo en el cultivo del maíz grano [en línea]. Rengo: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 2015. no. 312. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7894>
84. Ingaramo O, Paz J, Mirás J, Vidal E. Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo. Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe: Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular, ISSN 0213-4497, No 32, 2007, págs 127-137. 2007.
85. Paradelo, R. Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. Boletín Geológico y Minero, 124 (3): 405-419 ISSN: 0366-0176
86. Londoño D. Application of organic amendments for the recovery of physical properties of the soil associated to water erosion. Lámpsakos, 17, pp 77-83, 2017.
87. Huaraca J, et al. Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. Información tecnológica versión On-line ISSN 0718-0764. 2020.
88. Escobar, E al. Propiedades físicas del suelo en cuatro fincas suburbanas de Santiago de Cuba. Centro de Investigaciones Agropecuarias, Vol 48, No 2, abril-junio, 74-78, 2021.

89. Julca A, Meneses L, Blas R, Bello, S. (2006). La Materia Orgánica, Importancia Y Experiencia De Su Uso En La Agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.
90. Valverde E. Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud. Instituto Tecnológico De Costa Rica Escuela De Ingeniería En Construcción; 2010.
91. Osorio, N. Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. 2009. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 43–71). Cenicafé.
92. Middelanis T. El biocarbón aplicado al suelo retiene agua y nutrientes en los valles interandinos del Departamento de Cochabamba, Bolivia. 2019. *Revista Acta Nova*. vol.9 no.3 Cochabamba nov.
93. Pérez, P. Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. [Revista UIS Ingenierías, vol. 20, núm. 1, págs. 121-134, 2021]: Universidad Industrial de Santander.
94. Escalante, Pérez, Hidalgo, et al. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. 2016. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
95. Xu, N., Tan, G., Wang, H., & Gai, X. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. 74: 1-8. 2016.
96. Fernández AMC. Caracterización De Residuos De Vida Transformados En Biochar. [Internet]. Uva.es. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/18893/TFG-L%201310.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
97. Cerón L., Melgarejo L. Enzimas Del Suelo: Indicadores De Salud Y Calidad. *Acta Biológica Colombiana* [Internet]. 2005;10(1):5-18. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319028576001>
98. Descomposición de la materia orgánica. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2023. Obtenido de https://www2.ulpgc.es/descargadirecta.php?codigo_archivo=3984
99. Márquez, Nar. Evaluación Del Efecto De La Aplicación De Biochar En Suelos Agrícolas Basado En La Migración De Nutrientes. [Internet]. Edu.co. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81468/1017248628.2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
100. Viguera YS. Enzimas proteolíticas: Generalidades y la importancia de las aspartil proteasas fúngicas. En: CIERMMI Mujeres en la ciencia T4. ECORFAN; 2019. p. 1–15.
101. Otiniano A, Meneses L, Blas R, Bello, S. La Materia Orgánica, Importancia Y Experiencia De Su Uso En La Agricultura. 2006. [Internet]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000100009
102. Ortiz, M. Evaluación preliminar de la abundancia de hongos ligninolíticos cultivables y su actividad peroxidasa, obtenidos a partir de suelos con diferentes usos agrícolas en zona rural de Villavicencio. Volumen 14 - Sup (1): 171-177. 2010. [Internet]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v14s1/v14s1a14.pdf>
103. Ospina, M. Interacción Del Biochar Y Los Microorganismos Del Suelo. 2022. [Internet]. Disponible en: <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/4794/Interacci%C3>

%B3n%20del%20Biochar%20y%20los%20microorganismos%20del%20suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

104. Paradelo, R. 2013. Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (3): 405-419 ISSN: 0366-0176
105. Gutiérrez, A. La Densidad Aparente En Suelos Forestales Del Parque Natural Los Alcornocales Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Agrícola. Universidad De Sevilla; 2010.
106. Pérez, J. Efecto de la tecnología de microorganismos eficientes en suelos intervenidos antrópicamente del parque forestal embalse del Neusa, departamento de Cundinamarca. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, 2016. Obtenido de: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/15921/perez%20bravo%20jahanav%20aleja;jsessionid=C8446D79ABC9520D54126CF7E1F77D6F?sequence=1>
107. Martínez, M. Microorganismos del suelo implicados en el ciclo de Nitrógeno. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Obtenido de: [/https://info.igme.es/SidPDF/034000/614/34614_0001.pdf](https://info.igme.es/SidPDF/034000/614/34614_0001.pdf)
108. Vallejo V, Gomez M, Cubillos A, Roldán F. Effect of land use on the density of nitrifying and denitrifying bacteria in the Colombian Coffee Region. *Agronomía colombiana*. vol.29 no.3 Bogotá Sept./Dec. 2011. Obtenido de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652011000300015
109. Morocho T, Mariuxi L. Efficient microorganisms, functional properties and agricultural applications. *Centro Agrícola*, 46(2), 93-103. 2019. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093&lng=es&tlng=es
110. Quijano, L. Osorio, W. Martínez J & et.al. Soil bulk density and aggregate size control plant root growth of *Megathyrus maximus*. *Acta agronómica*. 2021 | 70-4 p 353-362. Obtenido de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/88785/83403
111. Terán A. Microorganismos solubilizadores de fósforo (P) y potasio (K) como alternativa biotecnológica para una agricultura sustentable. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2022. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/55843/1/T-112342%20%20Palma%20Ter%C3%A1n.pdf>
112. Díaz O, Montero D, Lagos J. Acción de microorganismos eficientes sobre la actividad de intercambio catiónico en plántulas de Acacia (*Acacia melanoxylon*) para la recuperación de un suelo del municipio de Mondoñedo, Cundinamarca. *Revista Colombia Forestal* Vol. 12: 141-160 / diciembre 2009. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v12n1/v12n1a10.pdf>
113. Maya J. Delgado Z. Efecto del enclamiento y secamiento sobre la dinámica del Potasio en un suelo Andisol del departamento del Cauca. 2007. Universidad del Cauca. Obtenido de: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/7240/>
114. Marchi, A. Efecto del Laboreo en la dinámica de Potasio en suelos de la región Pampeana Argentina Proceeding del XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Salamanca España. 2005. Tomo II, 607-614.
115. Cotrina, et al. Efecto de abonos orgánicos en suelo agrícola de Purrupampa, Panao, Perú. *Centro Agrícola*, 2020, vol. 47, no 2, p. 31-40.

116. Escobar, D. Evaluación de la fijación de fósforo y potasio y su aplicación a distintas dosis en suelos con diferentes niveles de fósforo. 2022. Tesis Doctoral. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2022.
117. Hernandez, J. Barbazán, M. Perdomo, C. Potasio. 2010. [Internet] Tomado de <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/Potasio.pdf>
118. Larriva, N. Síntesis de la importancia del Potasio en el suelo y plantas. 2003. La granja [número 2]. Facultad de ciencias pecuarias y agroindustriales. Tomado de Users/ASUS/Downloads/Dialnet-SintesisDeLaImportanciaDelPotasioEnElSueloYPlantas-5969765.pdf
119. Conti, M. Dinámica de la liberación y fijación de Potasio en el suelo. Cátedra de Edafología - Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires. Obtenido de [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/C2645DDD711C34D303257967007D6ED5/\\$FILE/AA%204.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/C2645DDD711C34D303257967007D6ED5/$FILE/AA%204.pdf)
120. Vivanco TDS. Determinación de la capacidad de solubilización de potasio por *Bacillus mucilaginosus*". [FACULTAD DE AGRONOMÍA]: UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA; 2018.
121. Berenice et al., Carbono orgánico y nitrógeno total en suelos forestales de México mediante espectroscopia VIS-NIR. Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol 9 (47). 2017
122. Tanya Morocho M, Leiva-Mora M. Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Centro agrícola [Internet]. 2019 [citado el 28 de noviembre de 2023];46(2):93–103. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093
123. Hernández-Lauzardo Ana Niurka, Bautista-Baños Silvia, Velázquez-del Valle Miguel Gerardo, Hernández-Rodríguez Annia. Uso de Microorganismos Antagonistas en el Control de Enfermedades Postcosecha en Frutos. Rev. mex. fitopatol [revista en Internet]. 2007 25 (1): 66-74. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092007000100009&lng=es
124. Flores, S. et al. Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de Cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 2019, vol. 22, no 44, p. 85-94.