



***EVALUACIÓN DE ENMIENDAS ORGÁNICAS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE GRUPOS FUNCIONALES BACTERIANOS EN LA RECUPERACIÓN DEL SUELO EN EXPLOTACIÓN LADRILLERA (COGUA, CUNDINAMARCA).***

**JENNIFER CATALINA VANEGAS ARDILA**

**Jovanna Acero Godoy**

**Asesora interna**

**Amanda Varela Ramírez, Ph.D.**

**Asesora externa**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD**

**BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO**

**TRABAJO DE GRADO**

**BOGOTA D.C. ABRIL DE 2024**



**EVALUACIÓN DE ENMIENDAS ORGÁNICAS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE GRUPOS FUNCIONALES BACTERIANOS EN LA RECUPERACIÓN DEL SUELO EN EXPLOTACIÓN LADRILLERA (COGUA, CUNDINAMARCA).**

**JURADOS**

**Monica Rodríguez Aristizábal**

**Sonia Rosas Arango**

**ASESORES**

**Amanda Varela Ramírez, Ph.D.**

**Jovanna Acero Godoy**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD**

**BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO**

**TRABAJO DE GRADO**

**BOGOTA D.C. ABRIL DE 2024**

**DEDICATORIA**

Esta tesis es un tributo a la colaboración, paciencia y comprensión de todas las personas que estuvieron a lo largo de mi viaje académico. A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios que hicieron posible que llegara hasta aquí. A mi abuela, quien, aunque no pudo presenciar este logro y ya no este físicamente con nosotros, me enseñó a ser perseverante y a afrontar cualquier reto. Sé que desde el cielo siempre me cuida y guía.

Este logro también les pertenece a ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible la culminación de esta tesis y que, de una u otra manera, contribuyeron con sus consejos, conocimientos y ánimos en la realización de este trabajo. A mis directoras de tesis, la Dra. Amanda Varela, y a la profesora Jovanna Acero por su orientación experta, apoyo constante y dedicación durante todo el proceso de investigación. A la Pontificia Universidad Javeriana, por proporcionar los recursos y el ambiente propicio para llevar a cabo este proyecto. A mis padres y hermanos por el apoyo y ánimo que me brindaron en todo momento. Y finalmente, a mis compañeros de clase y amigos, por su estímulo, comprensión y apoyo incondicional en los momentos difíciles.

### **Tabla de contenido**

1. INTRODUCCIÓN.....	7
----------------------	---

2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo general .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
3. ANTECEDENTES.....	15
4. MARCO TEÓRICO .....	18
4.1. Degradación del suelo en explotaciones ladrilleras .....	18
4.2. Enmiendas orgánicas en la recuperación del suelo .....	19
4.3. Grupos funcionales bacterianos y su papel en la recuperación .....	21
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
5.1. Zona de estudio .....	23
5.2. Tratamientos .....	24
5.3. Toma de muestras .....	25
5.4. Análisis de suelos .....	26
5.4.1. Variables Analizadas .....	26
5.4.2. Análisis microbiológico .....	26
5.4.3. Análisis fisicoquímicos.....	28
5.5. Análisis estadístico.....	28
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30
6.1. Resultados microbiológicos.....	30
6.2. Resultados fisicoquímicos.....	35
7. CONCLUSIONES .....	44
8. RECOMENDACIONES.....	46
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	47

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la empresa Arcillas "La Futuro", en el departamento de Cundinamarca, en el municipio de Cogua. Grados decimales: 5.0499, -73-9713, COGUA-Cundinamarca. <i>Obtenida de Google Maps (modificada por el autor)</i> . .....	24
<b>Figura 2.</b> Distribución de enmiendas orgánicas en el experimento de restauración de suelos en la ladrillera arcillas "La Futuro" .....	25
<b>Figura 3.</b> Halos de degradación en Agar Leche. <i>Figura propia</i> . .....	28
<b>Figura 4. A)</b> Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias solubilizadoras de fosfato y <b>B)</b> su actividad enzimática en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. ....	31
<b>Figura 5. A)</b> Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias proteolíticas y <b>B)</b> su actividad enzimática en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. ....	33
<b>Figura 6.</b> Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias fijadoras de nitrógeno en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. ....	34
<b>Figura 7. A)</b> Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias celulolíticas y <b>B)</b> su actividad enzimática en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. ....	35
<b>Figura 8.</b> Promedio con su respectivo error estándar del análisis fisicoquímico en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. <b>A)</b> pH <b>B)</b> Conductividad eléctrica.....	37
<b>Figura 9.</b> Promedio con su respectivo error estándar del análisis fisicoquímico en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. <b>A)</b> Densidad aparente <b>B)</b> Densidad real <b>C)</b> Porosidad <b>D)</b> Humedad <b>E)</b> Textura. ....	40
<b>Figura 10.</b> Promedio con su respectivo error estándar del análisis fisicoquímico en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. <b>A)</b> Materia orgánica <b>B)</b> C:N. ....	41

## RESUMEN

La degradación ambiental causada por la industria ladrillera en la región de Cagua, Cundinamarca, constituye un desafío debido al impacto que ejerce en la erosión del suelo y su compleja restauración. A pesar de los múltiples intentos de recuperación de este tipo de suelos en la región, la selección de tratamientos eficaces que reviertan estos efectos no ha sido exhaustivamente evaluada. El objetivo principal del estudio fue evaluar cuatro tipos de enmiendas orgánicas (biocarbón, compost, mezcla de biocarbón y compost, y un grupo de control) mediante el análisis de la densidad y actividad de los grupos funcionales, así como las propiedades fisicoquímicas edáficas del suelo. El experimento se llevó a cabo en una zona remanente de explotación ladrillera, donde se aplicaron los tratamientos y se evaluaron las propiedades del suelo antes de la aplicación de las enmiendas y a los 1, 5 y 8 meses posteriores. Las enmiendas promovieron un cambio en su densidad y actividad de las bacterias celulolíticas, solubilizadoras de fosfato y fijadoras de nitrógeno. Este cambio se asoció con mejoras en las propiedades fisicoquímicas pH, textura, porosidad y densidad aparente del suelo. Los resultados del estudio evidencian la efectividad de los tratamientos en la recuperación del suelo presentando ventajas para la mayoría de grupos funcionales y propiedades fisicoquímicas. En conclusión, este estudio proporciona evidencia científica sobre el potencial de las enmiendas orgánicas para recuperar suelos degradados por la actividad ladrillera.

## **PALABRAS CLAVES**

Bacteria, recuperación, tratamiento, zona ladrillera.

## **ABSTRACT**

The environmental degradation caused by the brick industry in the region of Cogua, Cundinamarca, is a challenge due to the impact it has on soil erosion and its complex restoration. Despite multiple attempts to recover this type of soil in the region, the selection of effective treatments to reverse these effects has not been exhaustively evaluated. The main objective of the study was to evaluate four types of organic amendments (biochar, compost, biochar and compost mixture, and a control group) by analyzing the density and activity of the functional groups, as well as the soil physicochemical properties. The experiment was carried out in a remnant area of brick mining, where treatments were applied and soil properties were evaluated before the application of the amendments and 1, 5 and 8 months later. The amendments promoted a change in the density and activity of cellulolytic, phosphate-solubilizing, and nitrogen-fixing bacteria. This change was associated with improvements in the physicochemical properties pH, texture, porosity and bulk density of the soil. The results of the study show the effectiveness of the treatments in soil recovery, presenting advantages for most functional groups and physicochemical properties. In conclusion, this study provides scientific evidence on the potential of organic amendments to recover soils degraded by brick activity.

## **KEYWORDS**

Bacteria, recovery, treatment, brick area.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La explotación ladrillera a menudo provoca un impacto ambiental significativo. Este impacto se extiende a varios aspectos del entorno como uno de los principales

contribuyentes a la contaminación del agua, aire y suelo. Las actividades relacionadas con la producción de ladrillos perturban el equilibrio del ambiente, lo que subraya la importancia de mitigar estos efectos para garantizar la sostenibilidad a largo plazo (1, 2). La actividad ladrillera es esencial para la mayoría de la población mundial. La industria de la construcción abarca una parte muy importante en la actualidad con la construcción de viviendas y edificios, pero también genera un impacto considerable en el ambiente, especialmente en el suelo (3, 4). Lo anterior es importante porque el suelo tiene múltiples funciones que desempeña tanto en el ámbito social como en el ecosistema natural (5). La producción de ladrillos requiere extraer arcilla del suelo a cielo abierto, lo que elimina la capa orgánica rica en nutrientes y relacionada con la vegetación, intensificando la erosión. Este proceso altera la estructura del suelo, haciéndolo más seco e improductivo, y afecta negativamente la calidad del agua debido a los lavados durante la producción, contaminando aguas superficiales y subterráneas. Todo esto se debe al uso intensivo de materias primas del suelo en la explotación ladrillera. (3, 6, 7). El suelo adecuado para la fabricación de ladrillos debe ser arcilloso-arenoso, con un contenido de arena que represente entre el 25% y el 30% del material total, esto proporciona la plasticidad necesaria a la arcilla, permitiendo que no retenga demasiada agua, lo que evita la formación de grietas y aumenta la resistencia del ladrillo. Este requisito es crucial en la industria de fabricación de ladrillos para evitar problemas durante el proceso de producción (8, 9). Asimismo, para obtener un producto final se requiere un proceso de cocción que produce gases contaminantes que contribuyen al cambio climático, y un daño a nivel atmosférico al liberar compuestos y gases perjudiciales como resultado de sus procesos (10). La explotación ladrillera también genera drenajes, una actividad

minera considerada contaminante, ya que tiene impacto en los ecosistemas, afectando la actividad y diversidad microbiana en el suelo. Estos drenajes pueden volverse tóxicos o corrosivos, lo cual afecta la composición de las comunidades microbianas directamente asociadas con los ciclos biogeoquímicos y también genera un cambio en las propiedades fisicoquímicas, compactando el suelo (11, 12).

Cogua (Cundinamarca), un municipio con una marcada presencia en la industria ladrillera, forja su base económica en este sector. A lo largo de los años, las extensiones de terreno en este municipio dedicadas a esta industria han ido en aumento, impulsadas por la extracción de arcilla y gravilla, elementos vitales para la manufactura de ladrillos ya que se encuentra en una zona caracterizada por suelos ricos en estas materias primas (13). Cogua no solo se ha visto expandido de manera constante en la actividad minera, sino que esta actividad también ha ido reemplazando otras ocupaciones tradicionales como la agricultura y la ganadería. En las últimas décadas la actividad focalizada en la producción de ladrillos ha experimentado un ascenso gradual para este municipio, aunque esta dinámica económica conlleva una severa degradación ambiental en sus ecosistemas (11, 14).

Ante este panorama, emergen las enmiendas orgánicas como una solución viable a los impactos ocasionados por la industria ladrillera, la cual incide en la degradación de los suelos en sus áreas de explotación (15, 16). En este contexto, las enmiendas orgánicas se presentan como una estrategia para mejorar la recuperación del suelo, tanto en sus características fisicoquímicas como en su composición bacteriana. Los suelos en cuestión han experimentado una degradación considerable, y aunque se han realizado diversos intentos de recuperación, la evaluación exhaustiva de tratamientos efectivos

para revertir estos efectos aún está pendiente (17). Por lo tanto, se plantea comparar enmiendas orgánicas como el biocarbón y el compost para restaurar áreas afectadas por la actividad ladrillera. El objetivo es evaluar las enmiendas utilizando indicadores como grupos bacterianos y parámetros fisicoquímicos del suelo, con el fin de evaluar cuál enmienda es más efectiva para mejorar la calidad del suelo en entornos ladrilleros (18). Dado que el uso de microorganismos como indicadores en este tipo de suelos no ha sido implementado para medir su calidad, es importante destacar que sí se ha implementado su uso en suelos de páramos perturbados, suelos afectados por incendios forestales, reservas, entre otros. Se ha utilizado la actividad microbiana e implementado técnicas de recuperación, como la incorporación de microorganismos eficientes y enmiendas, con el objetivo de mejorar la calidad del suelo (19, 20). En la región de estudio, las estrategias para mejorar el suelo se limitan al uso de políticas ambientales sobre la expansión del área utilizada o políticas orientadas al uso responsable de los recursos naturales. También existen estudios (17, 21) sobre el aprovechamiento de las trazas o residuos finales que quedan de la actividad ladrillera, los cuales suelen utilizarse en jardinería, obras civiles, manejo interno de vías, entre otros. Sin embargo, no se ha fomentado la recuperación del suelo mediante el uso de diferentes estrategias de bioaumentación o bioestimulación para su revegetación u otras actividades como la agricultura.

Por otra parte, las enmiendas orgánicas son productos carbonados resultantes del reciclaje de residuos orgánicos para un posterior aprovechamiento en el suelo. El mejoramiento de la productividad del suelo requiere la integración de estas para probar su efecto y eficacia, como una práctica para aumentar la nutrición vegetal, optimización de parámetros físicos, mejoramiento del ambiente químico y potenciación de la

biodiversidad microbiana y la biota del suelo. Las enmiendas orgánicas agregan estos requerimientos y ofrecen una oportunidad de mejora del suelo (22–24). Se propone el uso de enmiendas orgánicas, específicamente el compost y el biocarbón, que son utilizados generalmente para mejorar las condiciones físicas, químicas y microbiológicas de suelo (25). Al ser incorporadas en un suelo pueden mejorar su calidad, ya que aportan diferentes beneficios como el suministro de nutrientes, estimulación de la diversidad y actividad microbiana, incrementando la agregación del suelo a través de sus efectos sobre el contenido de agua, la temperatura y la aireación (23–25). Esto se ve reflejado principalmente en el aumento de raíces y plantas que, junto con los diversos grupos funcionales bacterianos y los parámetros fisicoquímicos generan una interacción que demuestra su funcionalidad y trabajo conjunto (15).

El uso de grupos funcionales bacterianos como indicadores para evaluar la recuperación del suelo en una explotación ladrillera se justifica debido a su capacidad para sincronizarse en la ejecución de funciones esenciales, como la sinergia en los ciclos de los nutrientes, el cometabolismo y la descomposición de la materia orgánica. Estas funciones son cruciales en la restauración de las condiciones fisicoquímicas y nutricionales del suelo, ya que permiten mejorar su estructura y fertilidad (26). Los grupos funcionales estudiados en este trabajo tienen un papel directo o indirecto en los ciclos de nutrientes, interactuando con factores fisicoquímicos y vegetación. Su actividad enzimática está vinculada al contenido nutricional del suelo, lo que les permite participar en los ciclos biogeoquímicos. Especialmente, las poblaciones de bacterias fijadoras de nitrógeno, celulolíticas, proteolíticas y solubilizadoras de fosfato son cruciales en estos procesos, permitiendo evaluar y discernir diferencias en el suelo (26, 27). Por tanto, su

presencia y actividad actúan como indicadores sensibles de la degradación o empobrecimiento de la calidad del suelo, además de reflejar cambios en sus propiedades. Esta perspectiva centrada en los grupos funcionales bacterianos proporciona una comprensión más completa y precisa de la dinámica del suelo, lo que resulta esencial para evaluar la efectividad de las enmiendas orgánicas en la recuperación de suelo de la explotación ladrillera (25, 28, 29). Se ha comprobado que existe una estrecha relación entre los microorganismos y las propiedades fisicoquímicas del suelo. Estas características son relevantes, ya que afectan las interacciones y el equilibrio del suelo. Esta relación juega un papel crucial en la dinámica ecológica al influir en procesos como la descomposición de la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la salud del ecosistema. (30, 31).

El problema que surge en el contexto de la explotación ladrillera en Cogua, Cundinamarca, se centra en la falta de conocimiento sobre el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la recuperación del suelo afectado por dicha explotación. A pesar de la evidente degradación ambiental causada por la explotación de arcilla y gravilla para la producción de ladrillos, no se ha evaluado exhaustivamente un método para la recuperación de este tipo de suelos. Este vacío en la investigación es crítico, ya que limita la capacidad de implementar estrategias efectivas de recuperación en áreas afectadas por la actividad ladrillera. Por lo tanto, se busca determinar cómo las enmiendas orgánicas, como el compost y el biocarbón, contribuyen a la recuperación de suelos degradados por la explotación, mediante el análisis de grupos funcionales bacterianos y propiedades fisicoquímicas del suelo. Este tipo de estrategias no ha sido tomado en consideración, por lo tanto, identificar el impacto específico de estas

enmiendas orgánicas en la calidad del suelo y su capacidad para restaurar las funciones ecológicas es crucial para desarrollar estrategias efectivas de restauración ambiental en la zona.

Esta investigación tiene como principal objetivo, evaluar enmiendas orgánicas para la recuperación de suelos en la industria ladrillera, promoviendo mejoras en estos sistemas. En este estudio, se evaluaron cuatro tipos de enmiendas orgánicas (biocarbón, compost, mezcla de biocarbón y compost, y un grupo de control), se analizó la densidad y actividad de los grupos funcionales bacterianos celulolíticos, solubilizadores de fosfato, fijadores de nitrógeno y proteolíticos, junto con las propiedades fisicoquímicas del suelo. Los resultados mostraron que las enmiendas promovieron cambios en la densidad y actividad de los grupos bacterianos estudiados, así como mejoras en propiedades como pH, textura, porosidad y densidad aparente del suelo. Aunque no se determinó una enmienda que sobresaliera en todas las propiedades, cada una mostró fortalezas en diferentes aspectos del suelo

En congruencia con la problemática antes expuesta, surge la siguiente pregunta ¿Cuál es el efecto la aplicación de enmiendas orgánicas a la recuperación del suelo en áreas de explotación ladrillera, considerando el análisis de grupos funcionales bacterianos y propiedades fisicoquímicas?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar enmiendas orgánicas mediante el análisis de grupos funcionales bacterianos y propiedades fisicoquímicas para la recuperación del suelo en explotación ladrillera (Cogua, Cundinamarca).

### **2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo degradado por la ladrillera en diferentes periodos de tiempo.
- Analizar la actividad de los grupos funcionales bacterianos proteolíticos, celulolíticos, solubilizadores de fosfato y fijadores de nitrógeno en el suelo degradado por la ladrillera.
- Comparar la eficacia de las enmiendas orgánicas aplicadas en los suelos degradados por la explotación ladrillera como forma de recuperación.

### 3. ANTECEDENTES

La explotación de suelos por la minería ha provocado un problema ambiental preocupante por la erosión de los suelos y su falta de revegetación. Por ello, es importante buscar una posible solución mediante el uso de diversas estrategias, como la bioaumentación y bioestimulación. Para comprender completamente el impacto de la explotación ladrillera, es esencial revisar sus antecedentes.

La fabricación de ladrillos es una industria fundamental en muchas regiones, como en Rajshahi, Bangladesh (33), pero su proceso tradicional tuvo un impacto ambiental negativo importante, este estudio resaltó la necesidad de abordar las emisiones de gases de efecto invernadero, el agotamiento de recursos naturales y la contaminación del suelo y el agua por lo que una forma de mitigar este impacto fue mediante la adopción de técnicas de fabricación más sostenibles, como la adición de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de ladrillos de cerámica roja. De manera similar, un estudio realizado en Cuba destacó cómo incluso pequeñas modificaciones en la composición de los materiales pudieron influir en las etapas de secado y cocción, mejorando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones de gases nocivos (8). Y en una investigación en Murcia donde adoptan como estrategia el uso de las enmiendas orgánicas e inorgánicas en la adsorción y biodisponibilidad de elementos traza en el suelo se subrayó la importancia de elegir qué posible solución usar para mejorar la capacidad del suelo para retener nutrientes y reducir la lixiviación de contaminantes en aguas subterráneas (34).

En Colombia, la actividad minera ha generado preocupación por su impacto ambiental. En la región del Norte de Santander, la industria minera de arcillas para la producción de ladrillos es una actividad económica importante que buscaba el uso diseños de sistemas

de explotación a cielo abierto, como se propuso en el artículo para la mina de arcillas ladrillera Zulia S.A., fue esencial para optimizar la extracción de los recursos minerales de manera eficiente y sostenible. Sin embargo, el proceso de extracción de arcillas pudo generar materiales sobrantes que debieron ser gestionados adecuadamente para minimizar su impacto ambiental (35). Por esto se busca el aprovechar estos materiales, como se abordó en la implementación del PMRRA (Plan Minero de Restauración y Aprovechamiento de Áreas), que fue fundamental para reducir la generación de residuos y promover la reutilización y reciclaje de los recursos dentro del ciclo de producción (21).

Los estudios en suelos mineros son un desafío importante, ya que estos suelos son muy explotados, suelen contaminar los recursos hídricos y afectar la salud humana y la diversidad biológica. Un estudio sobre la adición de enmiendas en suelos mineros del sur de Bolívar buscó encontrar soluciones para mitigar este problema, explorando cómo ciertas adiciones de tratamientos pudieron ayudar a inmovilizar los metales pesados y reducir su movilidad en el suelo (36). Por otro lado, también sobre la minería de oro, en el municipio de Santa Isabel en Tolima generó impactos significativos en la salud del suelo, como se evidenció en ese estudio que evaluó indicadores microbiológicos en áreas afectadas por esta actividad. Se destacó la importancia de comprender cómo las comunidades microbianas respondieron a la contaminación por metales pesados y cómo pudieron utilizarse como indicadores de la calidad del suelo y la salud ambiental, obteniendo como resultado que las comunidades microbianas ayudaron a evaluar la capacidad de un suelo (37). Además, no solo en suelos mineros sino en suelos de perturbación de los páramos, como resultado de incendios forestales, también afectó la diversidad microbiana del suelo, la investigación sobre los grupos funcionales de

microorganismos de estos suelos reveló cómo estos eventos alteraron la composición y función de las comunidades microbianas, lo que a su vez pudo tener repercusiones ambientales, como la descomposición de la materia orgánica y ciclaje de nutrientes (29).

Los suelos afectados por la explotación ladrillera en Colombia son un tema que apenas ha sido explorado, especialmente en lo que respecta a la recuperación o restauración de los ecosistemas afectados por esta actividad. En el estudio de los elementos para el desarrollo de un proceso de restauración de áreas degradadas por ladrilleras en la vereda Patio Bonito del municipio de Nemocón (38), se abordaron los impactos ambientales que genera esta industria y se plantearon estrategias para restaurar las zonas degradadas desde la perspectiva de las comunidades locales y cómo generar conciencia en la población para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, manteniendo así la economía del sector. Esto resultó en una buena acogida por parte de la comunidad debido a la escucha activa sobre posibles soluciones.

En conjunto, estos estudios mencionados anteriormente resaltan la importancia de comprender los efectos de las actividades humanas en la calidad del suelo y la biodiversidad microbiana en diferentes contextos ambientales en Colombia. Además, sugieren la necesidad de desarrollar estrategias de manejo y restauración que consideren las interacciones complejas entre los factores bióticos y abióticos en los ecosistemas afectados.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. Degradación del suelo en explotaciones ladrilleras**

El desarrollo minero en Colombia, aunque crucial para la economía, requiere una gestión profunda y considerada de los daños ambientales que conlleva. Las operaciones ladrilleras, dadas su naturaleza industrial, suelen provocar una degradación notable de la calidad del suelo. La explotación de suelos en estas ladrilleras puede generar un impacto significativo en el entorno natural, que incluye la degradación del suelo, la erosión, la alteración de los cuerpos de agua cercanos, así como la deforestación y la afectación de la capa vegetal (39).

Las actividades de extracción de arcilla pueden tener un impacto significativo en la estructura y calidad del suelo, lo que resulta en una reducción de su capacidad para sustentar la vida vegetal y microbiana. La erosión del suelo, la compactación y la pérdida de nutrientes son efectos comunes de la degradación en estas áreas. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, se observa una alteración notable debido a esta actividad. Se evidencia cambios en el peso específico, contenido de humedad, contenido de grava y contenido de arena. La degradación biológica del suelo se manifiesta en una disminución del contenido de materia orgánica, lo que resulta en una pérdida de comunidades bacterianas y en una reducción de su capacidad para mantenerse en estos entornos (39, 40).

Cada vez cobra mayor relevancia que las ladrilleras adopten prácticas sostenibles, tales como la utilización de tecnologías más eficientes y la implementación de sistemas de gestión ambiental. Estas prácticas suelen orientarse hacia la prevención y compensación de los impactos y efectos ambientales ocasionados por la explotación ladrillera. El

propósito es maximizar los beneficios que los proyectos generen en el medio natural y social dentro de su área de influencia (17).

#### **4.2. Enmiendas orgánicas en la recuperación del suelo**

Las enmiendas orgánicas, como compost, biocarbón y microorganismos eficientes han demostrado ser herramientas efectivas en la mejora de la calidad del suelo degradado. Estas enmiendas aportan materia orgánica que aumenta la retención de agua, mejora la estructura del suelo y proporciona nutrientes esenciales para las plantas y microorganismos. Además promueven la actividad microbiana beneficiosa y estimulan procesos de descomposición de contaminantes (25). Las enmiendas orgánicas provenientes de fuentes naturales como materiales de origen animal, vegetal o microbiano se introducen en el suelo con el objetivo de optimizar sus propiedades y funcionamiento. Este tipo de enmiendas conllevan una serie de ventajas para el suelo, entre las que se incluyen la mejora de su estructura y agregación, lo que aumenta la porosidad y facilita la aireación y el drenaje. Asimismo, se observa un incremento en la retención de agua, lo que contribuye a promover la actividad microbiana y a mejorar el ambiente en el suelo. La aplicación de enmiendas orgánicas representa, por tanto, una estrategia efectiva para optimizar las condiciones del suelo y favorecer su funcionamiento microbiológico de manera integral, beneficiando a las comunidades bacterianas que se encuentran en este y sus procesos biogeoquímicos (41, 42).

El compost, cuando se utiliza como enmienda orgánica en el suelo, tiene efectos significativos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas a medio y largo plazo, especialmente con aplicaciones repetidas. Estos cambios son influenciados por el tipo de material empleado en la producción del compost y las condiciones específicas de los

ensayos, incluyendo el tipo de suelo y la interacción suelo-compost. En relación con las propiedades físicas del suelo, la adición de compost puede ocasionar modificaciones como el aumento de la capacidad de campo y la porosidad. En términos químicos, se ha observado que el pH del suelo puede ser afectado por el compost, tanto disminuyendo como aumentando según la acidez o alcalinidad del compost aplicado. Además, contribuye a la retención de carbono beneficioso para los microorganismos presentes en el suelo (44). El biocarbón destaca como una enmienda orgánica prometedora para mejorar las propiedades del suelo. Su incorporación puede beneficiar la retención de agua, la densidad aparente, el pH y el contenido de materia orgánica del suelo, así como facilitar el laboreo y mejorar su estructura (45). Estos efectos positivos pueden traducirse en un incremento en la productividad de las plantas y una diversificación en el uso de los residuos orgánicos agrícolas. El aporte de nutrientes del biocarbón al suelo varía según la especie vegetal empleada en su producción, la técnica de elaboración y las condiciones del proceso (25, 45, 46).

Por otra parte, la aplicación de microorganismos eficientes en suelos degradados conlleva beneficios significativos. Los microorganismos eficientes son un producto líquido diseñado en Japón que tiene una diversidad microbiana en la que se encuentran bacterias ácido lácticas, bacterias fotosintéticas, levaduras, actinomicetos y hongos filamentosos, estos microorganismos mejoran la estructura física de los suelos, incrementan la fertilidad química y tienen una buena capacidad para absorber agua y nutrientes (48). Desde el punto de vista químico, los microorganismos eficientes pueden descomponer la materia orgánica, liberando nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio en formas disponibles para las plantas. En términos microbiológicos, la

introducción de microorganismos beneficiosos puede restaurar y mejorar la diversidad microbiana del suelo, lo que a su vez promueve procesos biológicos clave como la fijación de nitrógeno y la descomposición de residuos orgánicos (49).

#### **4.3. Grupos funcionales bacterianos y su papel en la recuperación**

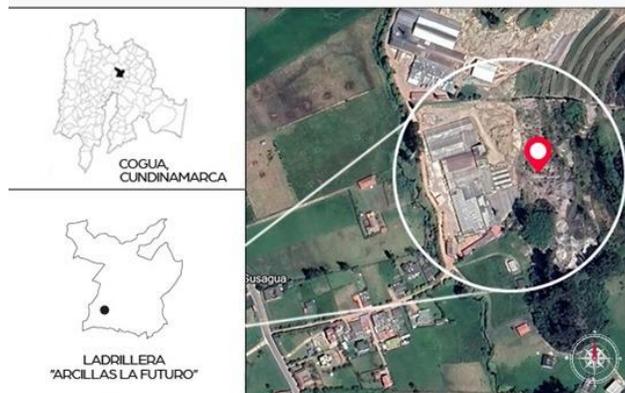
Los grupos funcionales bacterianos son componentes clave del ecosistema del suelo y desempeñan roles esenciales en la salud del suelo. Los microorganismos participan en la descomposición de materia orgánica, la fijación de nitrógeno, la solubilización de nutrientes y la protección contra patógenos. La presencia y diversidad de estos grupos bacterianos pueden indicar la salud y la capacidad de recuperación del suelo (50).\_Estos microorganismos son responsables de numerosos procesos clave en el ciclo de nutrientes y la descomposición de la materia orgánica. Los microorganismos descomponen la materia orgánica, como restos de plantas y estiércol, convirtiéndola en humus y liberando nutrientes esenciales para las plantas. Participan en el ciclo de nutrientes al liberar nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre en formas disponibles para las plantas (51). Las bacterias desempeñan un papel crucial en la formación de agregados del suelo y aumentan la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo mediante la descomposición de materia orgánica, la fijación de nitrógeno y la movilización de fósforo, potasio e hierro. Este aporte de biomasa bacteriana muestra eficacia en la adsorción de nutrientes presentes en los suelos, además de ser una técnica respetuosa con el medio ambiente que no genera productos nocivos. Los procesos biogeoquímicos generados por las bacterias benefician el cambio de pH y la conductividad del suelo, mientras que la retención de agua por parte de estas bacterias también mejora la humedad y porosidad del suelo (52).

Las bacterias que solubilizan el fósforo extraen este elemento de fuentes inicialmente no disponibles, facilitando su incorporación en otros procesos vitales. Asimismo, desempeñan un papel crucial al introducir nuevas bacterias promotoras del crecimiento vegetal, mejorando la capacidad de fósforo en las plantas (53). Las bacterias celulolíticas, por su parte, ejercen un estímulo indirecto en el crecimiento radical, incrementando la celulosa y activando así la degradación de polímeros de mayor complejidad química. Esta actividad celulolítica es más pronunciada en la superficie del suelo, donde el suministro de carbono fresco proveniente de la biomasa vegetal y el aumento de materiales orgánicos e inorgánicos proporcionan sustratos para la comunidad microbiana. Para las bacterias proteolíticas, las proteínas constituyen un componente esencial de la materia orgánica del suelo. A través de la producción de enzimas proteasas se libera una variedad de compuestos asimilables, como aminoácidos, que forman parte de la materia orgánica particulada, siendo rápidamente accesibles para los microorganismos (50, 51). Por último, las bacterias fijadoras de nitrógeno promueven el aumento de los niveles de micorrización, facilitan el establecimiento de las plantas, incrementan su productividad y optimizan la explotación del suelo en términos de agua y nutrientes. Además, incrementan la cantidad de nutrientes a nivel foliar, y una mayor abundancia de estas bacterias indica que la disponibilidad de carbono orgánico en el suelo favorece la inmovilización de nitrógeno. Las comunidades nitrificantes, por otro lado, no se ven limitadas por la disponibilidad de carbono, ya que obtienen energía mediante la oxidación del amonio en lugar del carbono orgánico (55).

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1. Zona de estudio**

La zona de estudio se ubicó en Cogua, Cundinamarca, en la ladrillera Arcillas “La Futuro” (Figura 1) donde se fabrican materiales de arcilla para la construcción, establecida hace aproximadamente 30 años. Cogua es un municipio ubicado en la provincia de Sabana Centro, a 39 km de Bogotá, con una elevación de 2.600 msnm, una temperatura de 12°C, un viento del norte a 5 km/h y una humedad del 90%. La temperatura anual se mantiene generalmente en un rango de 6° a 19°C. El periodo más cálido se experimenta en mayo, mientras que la temporada templada abarca de diciembre a marzo. La época fresca se extiende desde junio hasta septiembre, siendo enero el mes más frío. Este municipio se distingue por su tendencia a permanecer mayoritariamente nublado y experimentar lluvias durante gran parte del año. Su economía se basa en la agricultura, turismo y la fabricación de ladrillos (14). Esta última es la actividad más importante del municipio, ya que Cogua presenta suelos con las características necesarias para la generación de ladrillos, es decir, suelos arcillo-arenosos que cumplen con la característica de un contenido de arena en relación al material arcilloso entre el 25 y el 30 %, necesario para la generación de estos productos.



**Figura 1.** Ubicación de la empresa Arcillas "La Futuro", en el departamento de Cundinamarca, en el municipio de Cogua. Grados decimales: 5.0499, -73-9713, COGUA-Cundinamarca. Obtenida de Google Maps (modificada por el autor).

## 5.2. Tratamientos

El montaje del se realizó in situ con el fin de evaluar el efecto de cuatro tratamientos en la recuperación del suelo remanente de explotación ladrillera (Figura 2). Se llevó a cabo en una montaña con excavación a cielo abierto dentro de la ladrillera, en bloques dentro de los cuales se asignaron de manera aleatoria los siguientes tratamientos: biocarbón de pino (12 ton/ha), compost comercial (12 ton/ha) y de una mezcla de ambas enmiendas (50% compost y 50% biocarbón), junto con el efecto de la adición de microorganismos eficientes (EM) de la Fundación de Asesorías para el Sector Rural Minuto de Dios (FUNDASES). Los EM son una mezcla de *Lactobacillus casei* ( $1.0 \times 10^6$  UFC/ml), *Saccharomyces cerevisiae* ( $2.0 \times 10^4$  UFC/ml) y *Rhodopseudomonas palustris* ( $2.5 \times 10^6$  UFC/ml), que se diluyó en proporciones 1:10 con 5 L de agua, se mezcló y dosificó en cada uno de los tratamientos, es decir, en el biocarbón, el compost y la mezcla de ambas enmiendas. Se tuvieron cinco repeticiones para cada tratamiento (biocarbón, compost, la mezcla de estos dos y el control -sin ninguna adición-), es decir, una totalidad de 20 parcelas delimitadas. Cada parcela fue de aproximadamente  $2.25 \text{ m}^2$  y se ubicaron en

zonas de corte de montaña que quedaron luego de la explotación. A cada parcela se le asignó un número consecutivo y, por medio de la aleatoriedad se le asignó un tratamiento específico. Los tratamientos se aplicaron en el mes de abril, cuando la temperatura se encontraba en la temporada templada y el promedio máximo diario era de 18 °C.



**Figura 2.** Distribución de enmiendas orgánicas en el experimento de restauración de suelos en la ladrillera arcillas “La Futuro”.

### 5.3. Toma de muestras

Para la toma de muestras en cada una de las parcelas, se recolectó aproximadamente 1 kg de suelo en bolsas de cierre de cremallera debidamente marcadas y rotuladas con la ubicación, número de parcela (zona), número de muestreo realizado y datos de quien recogía la muestra. Además, se recolectó una muestra de suelo usando un cilindro metálico para determinar la densidad aparente. Estas muestras fueron transportadas al Laboratorio Ecología de Suelos y Hongos Tropicales (LESYHT) en la Pontificia Universidad Javeriana y almacenadas en nevera a 4°C, para su posterior análisis.

Este muestreo se realizó cuatro veces, en el mes de abril antes de aplicar las enmiendas orgánicas y en los meses de mayo, agosto y noviembre del año 2022, uno en cada mes para observar cambios en el suelo, a través del tiempo, después de la aplicación de sus enmiendas.

#### **5.4. Análisis de suelos**

##### **5.4.1. Variables Analizadas**

En el estudio, se analizaron una variedad de variables microbiológicas y fisicoquímicas para investigar el efecto de diferentes tratamientos de enmiendas orgánicas en el suelo degradado por la explotación ladrillera. Las variables microbiológicas incluyeron la densidad y la actividad enzimática de bacterias proteolíticas, celulolíticas, solubilizadoras de fosfato y fijadoras de nitrógeno. Por otro lado, las variables fisicoquímicas evaluadas abarcaron el pH, la conductividad eléctrica, la humedad, la materia orgánica, la densidad real, la densidad aparente, la porosidad, la textura (porcentaje de arcilla, limo y arena) y la relación C/N. Estas mediciones se realizaron en distintos momentos del estudio (un mes antes de la aplicación de las enmiendas, luego 2, 5 y 8 meses después de la aplicación de las enmiendas) para comprender cómo los tratamientos afectaban la salud y calidad del suelo a lo largo del tiempo.

##### **5.4.2. Análisis microbiológico**

###### **5.4.2.1. Estandarización de la dilución de siembra**

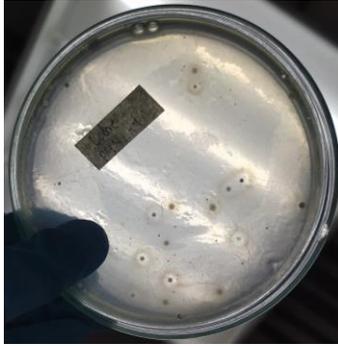
Para el respectivo análisis microbiológico del suelo se hicieron siembras en diluciones seriadas por profundidad. Para ello, se estandarizaron las diluciones en todas las muestras recolectadas. Se tomaron dos muestras al azar, luego se pesaron 10g de cada muestra y se agregaron a 90 ml de solución salina. Se colocaron en agitador durante 8

min. Luego, se tomó 1.0 ml de la mezcla y se prepararon diluciones seriadas desde  $10^{-1}$  a  $10^{-5}$ . Esto indica que el factor de corrección del suelo es 1:1,000,000 ( $1:10^6$ )

Una vez realizadas las diluciones de cada una de ellas, se tomó 1 ml y se colocó por duplicado en las cajas Petri y se agregan los medios de cultivo selectivos para bacterias solubilizadores de fosfato (Agar Pikovskaya), celulolíticas (Agar Rojo Congo), fijadoras de nitrógeno (Medio de Ashby) y proteolíticas (Agar leche) con adición de nistatina 100.000 UI/mL para evitar crecimiento hongos. Por último, se colocaron en una incubadora a  $30 \pm 2$  °C por 4-5 días y se hizo el respectivo recuento en UFC/g de suelo.

#### **5.4.2.2. Siembra, recuento y actividad microbiana**

Con la dilución de siembra estandarizada, se realizaron las siembras de todas las muestras con el mismo proceso y condiciones mencionadas anteriormente. Luego del tiempo establecido de incubación se realizó el recuento de las colonias que crecieron en cada uno de los medios selectivos para obtener la densidad de cada grupo funcional. Además, se midió el diámetro de los halos de degradación de las colonias que lo presentaron para tener una medida semicuantitativa de la actividad microbiana de cada grupo funcional (Figura 3).



**Figura 3.** Halos de degradación en Agar Leche. *Figura propia.*

### **5.4.3. Análisis fisicoquímicos**

Las pruebas que se realizaron fueron las siguientes: pH que se determinó a través del método potenciométrico junto con la conductividad eléctrica, humedad por el método gravimétrico, materia orgánica por el método de pérdidas de peso por ignición, densidad real por el método del picnómetro, densidad aparente por el método de cilindrado, C:N a través de espectrofotometría, textura con el método de Bouyoucos, y se calculó la porosidad con los datos de las densidades real y aparente del suelo por medio de la siguiente formula:

$$P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) \times 100$$

*Donde: P= Porosidad. Da= Densidad aparente. Dr= Densidad real.*

Todas las demás pruebas fueron realizadas en el laboratorio LESYHT según protocolos establecidos.

### **5.5. Análisis estadístico**

La siguiente investigación analiza variables cuantitativas a través de un diseño estadístico que permite comparar el efecto entre las enmiendas orgánicas y la evaluación de la capacidad microbiana de los grupos funcionales proteolíticos, celulolíticos,

solubilizadores de fosfato y fijadores de nitrógeno que se encuentran en el suelo de la ladrillera junto con sus parámetros fisicoquímicos.

Las muestras tomadas se analizaron mediante una prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución normal de los datos y una prueba de Levene para la igualdad de varianzas. Con una prueba de Friedman se comparó el efecto entre los tratamientos y con una prueba *a posteriori* de Wilcoxon se establecieron las diferencias que hay en los tratamientos. Por último, una prueba de Spearman para la correlación de los grupos funcionales bacterianos y las propiedades fisicoquímicas. Dichas pruebas se realizaron en el programa estadístico PAST versión 4.0 y para todas se usó un nivel de significancia de 0.05.

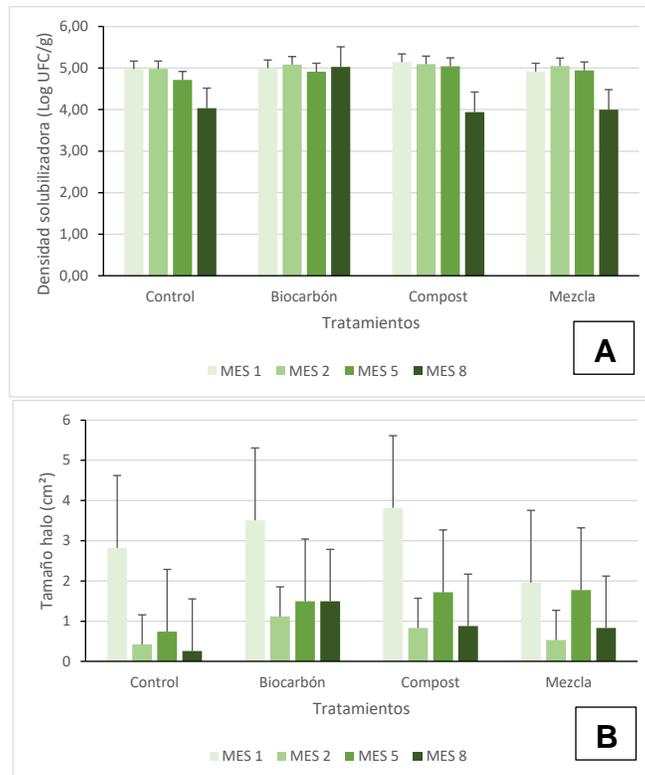
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Resultados microbiológicos

Tras la estandarización de la dilución de la muestra, la que obtuvo los resultados más acordes al recuento bacteriano fue  $10^3$  por lo que se decidió hacer el recuento de los grupos funcionales en esta dilución, a excepción de las bacterias fijadoras de nitrógeno que por su falta de crecimiento se usaron para recuento a partir de la dilución  $10^2$ .

Los resultados (Figura 4 A y B) obtenidos revelan cambios significativos ( $p < 0.05$ ) tanto en la densidad bacteriana como en la actividad enzimática de las bacterias solubilizadoras de fosfato. En cuanto a su densidad, los tratamientos que presentan diferencias son el compost que es menor respecto al control, en la actividad enzimática se observa que en el tratamiento de biocarbón es mayor que en el del compost y estos dos tienen resultados mayores frente al control. Comparando estos hallazgos con estudios previos, como el de Beltrán et al. (55), que evaluó suelos con y sin vegetación en un contexto diferente, se observan similitudes con el comportamiento de la densidad bacteriana. Aunque las condiciones del suelo varían, los resultados sugieren que la presencia de biocarbón y compost puede ser beneficiosa para mantener estas poblaciones bacterianas, incluso en suelos sometidos a estrés por erosión o actividades de explotación. En conjunto, estos resultados respaldan la idea de que el biocarbón y compost pueden desempeñar un papel importante en la mejora de la actividad microbiana de las bacterias solubilizadoras de fosfato, ya que se benefician de estos a partir de los nutrientes que aportan, lo que a su vez puede contribuir a los ciclos biogeoquímicos, a la comunicación entre comunidades y a la mejora estructural del suelo (56). Por otra parte la capacidad de los EM para producir ácidos orgánicos puede facilitar

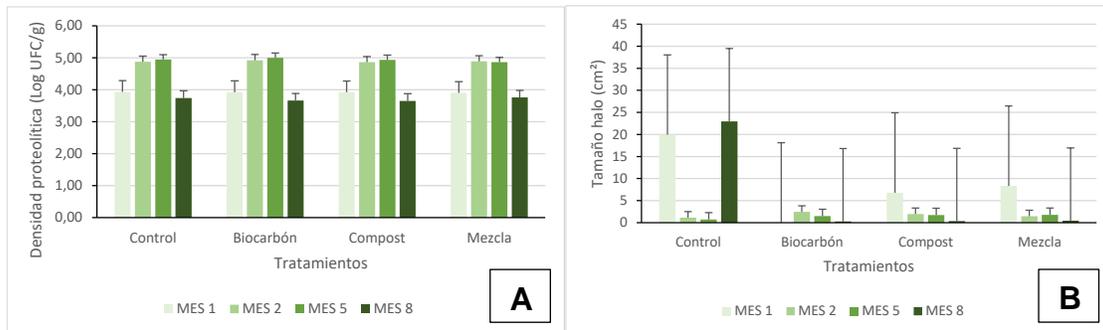
este proceso al ayudar a solubilizar el fósforo inorgánico, haciéndolo más accesible para estas bacterias. Esta interacción entre los EM y las bacterias solubilizadoras de fosfato puede ser crucial para mantener la salud del suelo y promover la disponibilidad de nutrientes para las plantas (48).



**Figura 4. A)** Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias solubilizadoras de fosfato y **B)** su actividad enzimática en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cagua.

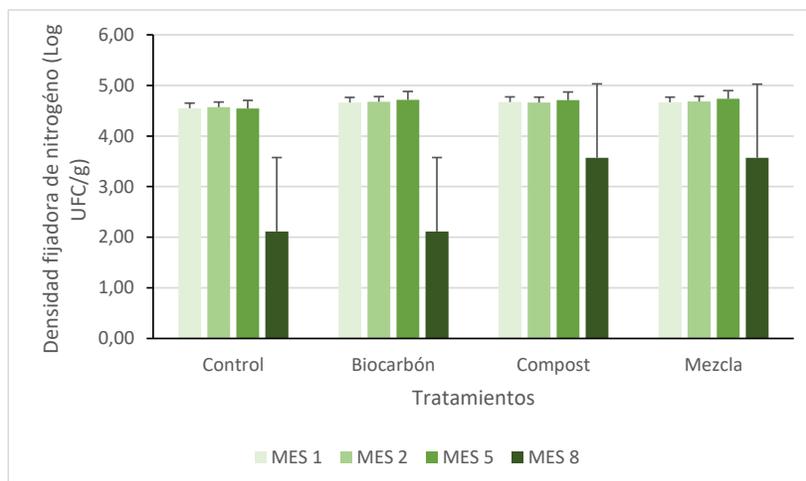
En relación con el grupo funcional de bacterias proteolíticas (Figura 5 A y B), no se observan cambios significativos ( $p > 0.05$ ) ni en su densidad ni en su actividad enzimática. La humedad y la porosidad son factores clave a tener en cuenta en este estudio y su influencia en los diferentes grupos funcionales es relevante. En estudios previos realizados por Ramos y Zúñiga (57), para determinar la actividad microbiana de diferentes grupos funcionales microbianos mediante la cuantificación de  $\text{CO}_2$  se observó que un mayor porcentaje de humedad favorecía la actividad microbiana en el suelo, lo

que implicaba una buena actividad microbiana. En el caso de este estudio, la saturación de agua del suelo que se presentó en el último muestreo podría haber afectado negativamente la actividad de las bacterias proteolíticas, impidiendo la adecuada degradación de proteínas y su participación en el ciclo del carbono y nitrógeno ya que hay menos disponibilidad de oxígeno lo que crea condiciones desfavorables para estas bacterias a comparación de los otros grupos funcionales que están más relacionados con la disponibilidad de nutrientes. Ningún tratamiento pudo contrarrestar este efecto y promover la actividad de estas bacterias en la degradación de proteínas. Sin embargo, también, se sabe que la presencia de microorganismos eficientes puede influir en la competencia por nutrientes en el suelo. Es posible que, en este estudio, la competencia inducida por los EM haya jugado un papel en la falta de cambios observados en las bacterias proteolíticas (58). A pesar de no encontrar diferencias estadísticas entre los tratamientos y el control, es notable que la actividad enzimática en el grupo de control mostró un aumento tanto en el muestreo inicial como en el final. Este incremento sugiere que la actividad enzimática proteolítica del suelo podría haber sido impulsada por una mayor disponibilidad de sustratos o condiciones ambientales más favorables (29)



**Figura 5. A)** Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias proteolíticas y **B)** su actividad enzimática en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cagua.

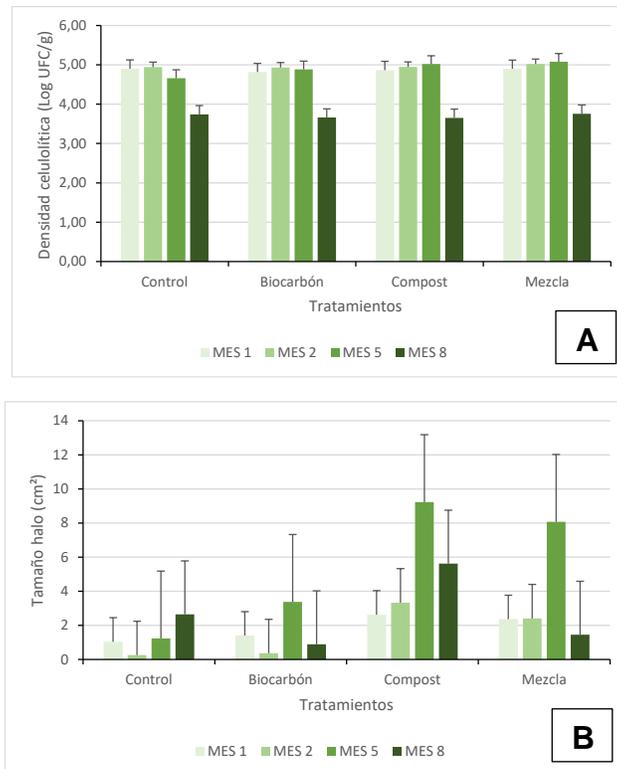
Las bacterias fijadoras de nitrógeno (Figura 6) exhiben cambios significativos ( $p < 0.05$ ) en su densidad y actividad fijadora en los tratamientos de mezcla siendo el mayor, luego el compost y luego el biocarbón, que son mayores con respecto al control. Según investigadores como Garzón Marín et al. (59), algunos grupos microbianos participan en los procesos de descomposición de la materia orgánica durante el proceso de reciclaje del biocarbón y el compost, y posteriormente llegan al suelo tras la aplicación del producto como los son géneros *Agrobacterium* y *Azotobacter* (60). Este fenómeno puede aumentar la densidad y diversidad microbiana en el suelo, lo que podría explicar cómo las diferentes enmiendas tienen diferencias frente al control, además del alto contenido C/N que tienen las enmiendas que benefician sus requerimientos nutricionales (61). Así como algunos componentes de los EM, como *Rhodopseudomonas* que son fijadores de nitrógeno. Su presencia podría promover el crecimiento de otras bacterias fijadoras al mejorar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo.



**Figura 6.** Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias fijadoras de nitrógeno en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua.

Finalmente, el grupo funcional de bacterias celulolíticas (Figura 7 A y B) reveló cambios significativos ( $p < 0.05$ ) tanto en su densidad como en su actividad enzimática. En la densidad microbiana, los tratamientos con diferencias son el de mezcla que es mayor frente al biocarbón y al control, siendo el biocarbón el de menor resultado. En cuanto a la actividad enzimática, se evidencian diferencias en los tratamientos de compost y la mezcla son mayores frente a los demás tratamientos. Las enmiendas usadas en este estudio son tratamientos que incorporan carbono (61). La disminución o el aumento de la actividad de este grupo funcional en el suelo está relacionada con la disponibilidad de celulosa disponible en el suelo y la relación C:N, como lo menciona Beltrán y Lizarazo (29) en su estudio. Estos autores muestran cómo el compost interactúa con el suelo proporcionando cantidades altas de carbono que suelen tener esta enmienda, lo que resulta en un aumento de la actividad celulolítica de las bacterias, pero al mismo tiempo se vuelve una limitación de nitrógeno porque se vuelve temporalmente inaccesible ya que está siendo utilizado por estas bacterias para descomponer la materia orgánica rica en carbono. Estos hallazgos sugieren que el compost puede ser una herramienta efectiva

para promover la actividad de las bacterias celulolíticas en el suelo, especialmente en condiciones donde la disponibilidad de carbono es limitada. Además, dado que esta enmienda está inmersa en el tratamiento de la mezcla, explicaría que al estar junto con el biocarbón brinde aún más componentes para el crecimiento de estas bacterias.

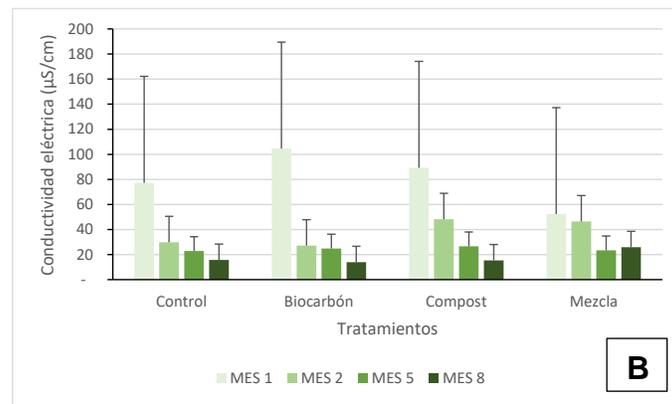
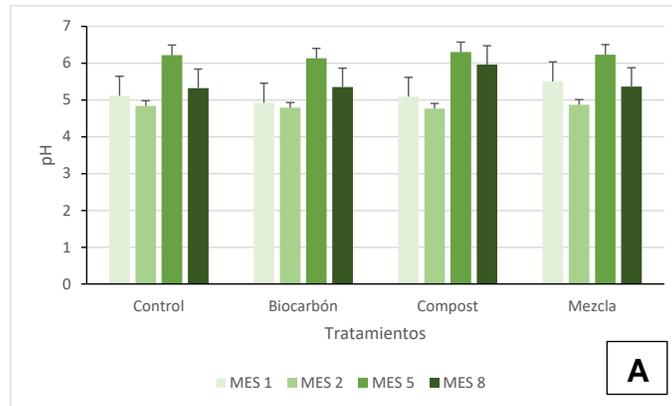


**Figura 7. A)** Promedio con su respectivo error estándar de la densidad de bacterias celulolíticas y **B)** su actividad enzimática en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua.

## 6.2. Resultados fisicoquímicos

Se identificó un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) para el pH en los tratamientos de biocarbón y compost (Figura 8A). Por lo general, estos suelos arcillosos tienen un pH de 5.5 – 6.5 debido a su alto contenido de arcilla; estas enmiendas contribuyeron a que el pH cambiara al intervalo anteriormente mencionado. Estos resultados sugieren que las enmiendas orgánicas podrían haber contribuido al aumento observado en el pH. Esto se

alineada con las afirmaciones de Huaraca Fernández et al. (62) quienes señalaron que dosis elevadas de enmiendas orgánicas pueden elevar el pH en suelos arcillosos, promoviendo cambios significativos. Además, teniendo en cuenta las observaciones de Rodríguez et al. (63) respecto a la capacidad de supervivencia de ciertas bacterias en condiciones extremas, se destaca la importancia de proporcionar un ambiente propicio para los grupos funcionales bacterianos. Esto resalta las implicaciones de ofrecer un entorno favorable para la disponibilidad de iones de hidrógeno, lo cual puede influir en la dinámica de las comunidades bacterianas. En relación a la conductividad eléctrica (Figura 8B), no se observan diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ) en las enmiendas utilizadas. Según lo mencionado por Vega y Virú (64), los resultados deberían estar vinculados a un incremento. Sin embargo, es importante considerar que esto podría depender de la cantidad y concentración de las enmiendas aplicadas, ya que estos autores mencionan que las enmiendas ayudan a la conducción de la corriente eléctrica debido al contenido de sales disueltas que contienen y que proporcionan al suelo. Además, Santamaría y Rossignoli (65) observaron tendencias de disminución en la conductividad eléctrica después de la aplicación de enmiendas. Estos autores explicaron que factores como la retención de agua o el tiempo de incubación de las enmiendas podrían influir en este fenómeno. Estos resultados sugieren que, si bien la aplicación de enmiendas puede aumentar la conductividad eléctrica, factores como el tipo de suelo y el tiempo de incubación de las enmiendas pueden influir en la capacidad para conducir electricidad.



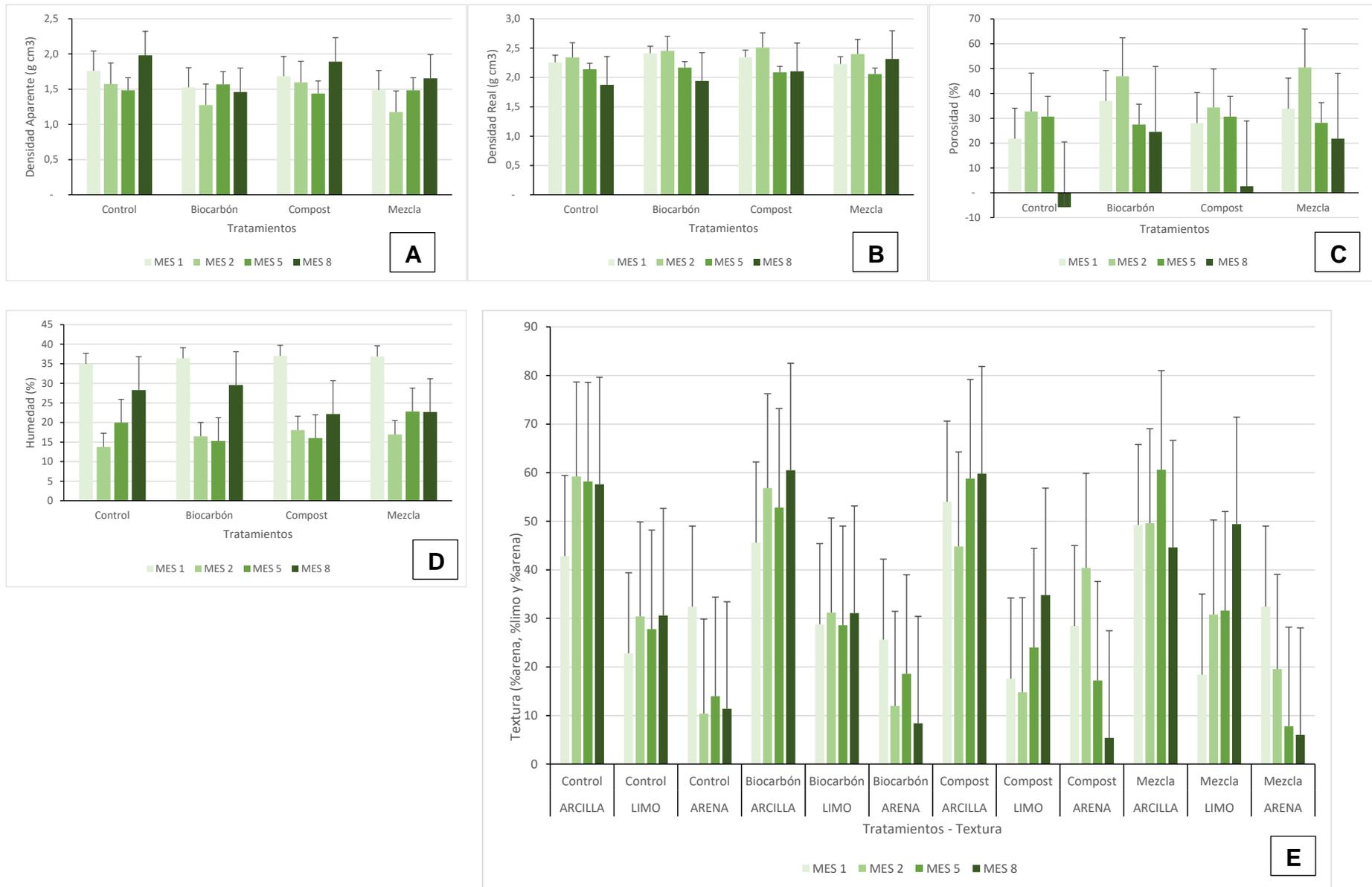
**Figura 8.** Promedio con su respectivo error estándar del análisis fisicoquímico en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. **A)** pH **B)** Conductividad eléctrica.

Las características físicas del suelo son una de las consideraciones más importantes a tener en cuenta al correlacionar los resultados de la textura, porosidad, densidades y humedad. En primer lugar, se observa que los suelos son altamente arcillosos, con una alta cantidad de poros y, por ende, una mayor retención de agua. En este sentido, en la textura (Figura 9E) se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). En la textura limosa se encontraron diferencias entre los tratamientos de compost, biocarbón y la mezcla, y en la textura de arena en el compost y la mezcla que son mayores en comparación con los demás tratamientos, lo que significa que se estaban presentando cambios en estas texturas gracias a las enmiendas. Para la porosidad (Figura 9C), se identificaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) en los

tratamientos de biocarbón y mezcla que son mayores que en el control. La densidad aparente (Figura 9A) también reveló diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) en los tratamientos de biocarbón y mezcla que son menores que en el control, pero para la densidad real (Figura 9B) y la humedad (Figura 9D) no hubo diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). Las enmiendas de biocarbón y compost son materiales conocidos por su capacidad para aumentar la porosidad del suelo debido a sus estructuras porosas, lo que facilita la retención de agua y nutrientes. Estos materiales también ayudan a aflojar suelos compactados al alterar sus densidades, lo que a su vez contribuye a la formación de agregados en el suelo, mejorando su estructura global. Tanto en Mendoza (66) como en Toluedo y Tuesta (67), se documenta que el uso tanto de biocarbón como de compost puede mejorar estas condiciones del suelo, lo que sugiere que son enmiendas efectivas para promover cambios en la textura, porosidad, densidades y humedad del suelo. Sin embargo, es importante señalar que estos estudios se centraron en el efecto de una sola enmienda en particular, lo que limita la comprensión sobre la eficacia de la mezcla de estas dos, especialmente en suelos de explotación ladrillera. En este estudio la humedad y densidad real no presentaron cambios entre tratamientos, ya que como se mencionó este tipo de suelos explotados por minería suele contener bastante agua. Como se ha señalado en Espinoza et al. (68), los suelos mineros son particularmente sensibles a contener humedad y a las épocas de lluvias, lo que puede influir considerablemente en sus propiedades fisicoquímicas.

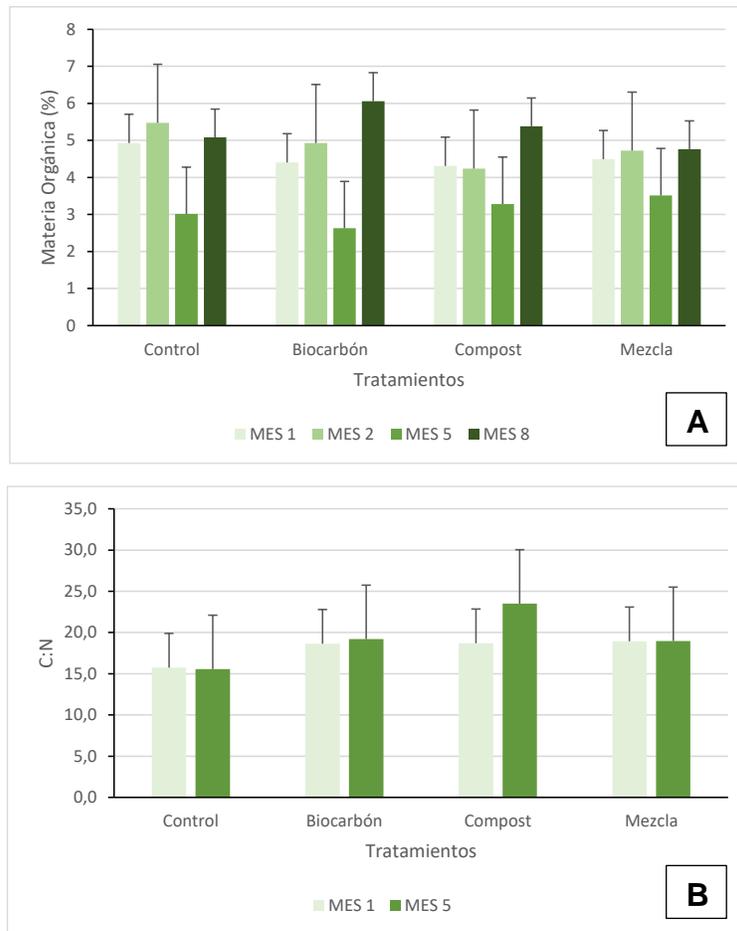
Los resultados obtenidos no muestran diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ) en la concentración de materia orgánica entre los tratamientos (Figura 10A). La composición del biocarbón y el compost proporciona una cantidad significativa de materia

orgánica, como se ha discutido por Lozano Reátegui et al. (69). Estas enmiendas pueden aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo, aunque este incremento requiere un tiempo suficiente para que ocurra una adecuada oxidación de los productos. Dado que el análisis se realizó en un período relativamente corto, es posible que no se haya podido apreciar completamente este aumento. Por lo tanto, en este estudio, al considerar el efecto del tiempo y el incremento observado en los tratamientos, se cree que no hubo una efectiva oxidación de las enmiendas, lo que contribuyó a que todas permanecieran sin diferencias entre ellas. La relación carbono-nitrógeno (C/N) al inicio y al final del experimento se muestra en la Figura 10B. No se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ) entre los tratamientos. El biocarbón y el compost están compuestos, en su mayor parte, por carbono. Según los hallazgos de González et al. (70), estas enmiendas pueden inducir la inmovilización del nitrógeno en el suelo, pero dado el alto contenido de carbono que proporcionan, el proceso de fijación del nitrógeno tiende a ralentizarse. A partir de los resultados obtenidos se evidencia la disponibilidad de estos elementos en el suelo y la capacidad de los grupos funcionales para emplearlos en sus procesos bioquímicos.



**Figura 9.** Promedio con su respectivo error estándar del análisis fisicoquímico en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cagua. **A)** Densidad aparente **B)** Densidad real **C)** Porosidad **D)** Humedad **E)** Textura.

Si bien las enmiendas orgánicas pueden influir en la relación C/N del suelo, no hay diferencia entre los tratamientos, lo que indica que, aunque proporcionen estos elementos y puedan ser utilizados por los grupos funcionales, no hay un tratamiento que sobresalga.



**Figura 10.** Promedio con su respectivo error estándar del análisis fisicoquímico en suelos con tratamientos de control, biocarbón, compost y mezcla en explotación ladrillera en el municipio de Cogua. **A)** Materia orgánica **B)** C:N.

En las correlaciones entre las variables fisicoquímicas y las microbiológicas edáficas que se midieron se observa una relación negativa de las bacterias proteolíticas y la humedad donde a mayor humedad menor densidad y actividad de estas bacterias, como se mencionó anteriormente, esto se debe a que este grupo funcional necesita oxígeno, a

diferencia de los otros grupos estudiados, que no se ven afectados por su disponibilidad. Como se mencionó en los resultados microbiológicos, la humedad es un factor importante para las bacterias proteolíticas. Según lo señalado por Ramos y Zúñiga (57), los suelos saturados afectan su actividad proteolítica, ya que la degradación de proteínas se vuelve difícil para estas bacterias, lo que pudo haber sucedido en este estudio y es por esto que este grupo funcional se vio afectado.

En el tratamiento de control se encuentra una relación negativa entre la textura arcillosa y las bacterias solubilizadoras de fosfato donde las bacterias disminuían. Por lo general, los fosfatos tienden a ser absorbidos por las partículas de arcilla debido a su carga negativa, lo que facilita a las bacterias la solubilización de los fosfatos disponibles que están en el suelo. En el estudio de Guzmán (71), donde se caracterizan bacterias solubilizadoras de fósforo en diferentes tipos de suelos, se menciona que, en suelos con una alta cantidad de arcilla, los fosfatos se fijan más que en otros suelos debido a su mayor disponibilidad.

Por otro lado, en el tratamiento de biocarbón se encuentra una relación positiva entre la humedad del suelo y las bacterias solubilizadoras de fosfato donde ambas aumentaban. La humedad en el suelo puede facilitar la disolución de los fosfatos. Guzmán (71) también argumenta que, al incrementar la humedad del suelo, el fósforo se vuelve más disponible para ser utilizado por las bacterias. El biocarbón es un tratamiento que ayuda a la retención de humedad, lo que pudo haber llevado a que las bacterias solubilizadoras de fosfato tuvieran el fósforo de manera más disponible y pudieran utilizarlo con mayor facilidad. No ocurrió en la mezcla donde también estaba la presencia del biocarbón, esto debido a que el compost, aunque también es una enmienda que retiene humedad puede

tener un efecto contrario y reducir la capacidad de retención de agua del suelo, además en suelos arcillosos, puede crear una capa densa que dificulte el drenaje del agua, lo que lleva a la saturación (72).

Finalmente, en el tratamiento de la mezcla se observa una relación negativa entre las bacterias celulolíticas y C:N donde ambas mostraron una disminución. Según Viteri et al. (73), en la descomposición de residuos, la relación C/N debe ser adecuada para que las bacterias celulolíticas puedan aprovechar y utilizar esos nutrientes para el ciclo del carbono. Si esta relación es demasiado baja, las bacterias presentes no son capaces de activar este proceso. El tratamiento de la mezcla contiene enmiendas que suelen proporcionar carbono y nitrógeno, los cuales son aprovechados por estas bacterias en sus respectivos ciclos biogeoquímicos. Por lo tanto, este tratamiento se considera uno de los más eficaces al hablar de bacterias celulolíticas u otras que participan en el ciclo del carbono.

## 7. CONCLUSIONES

En conclusión, se evaluaron las enmiendas orgánicas mediante el análisis de los grupos funcionales bacterianos y las propiedades fisicoquímicas para lograr la recuperación del suelo en explotación ladrillera. La actividad funcional de los grupos bacterianos celulolíticos, solubilizadores de fosfato y fijadores de nitrógeno permite evaluar el estado inicial del suelo y sugiere que la recuperación del suelo podría ser evaluada en el futuro utilizando indicadores relacionados con la actividad microbiana. Las propiedades fisicoquímicas ayudaron a entender la composición del suelo y el ambiente para las comunidades bacterianas, determinando si el entorno es favorable para la interacción entre los microorganismos o si las enmiendas contribuyen a mejorar estas características en beneficio de la calidad del suelo.

Los intervalos de tiempo (1-8 meses después de la aplicación de los distintos tratamientos) en los que se evaluaron las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo afectado por la actividad de la ladrillera revelaron cambios en diversas características del suelo a lo largo del período de estudio. Se observaron incrementos y disminuciones en distintas propiedades, indicando una respuesta variable a las enmiendas aplicadas.

Después de analizar la actividad enzimática de los grupos funcionales bacterianos proteolíticos, celulolíticos, solubilizadores de fosfato y fijadores de nitrógeno en el suelo degradado por la actividad ladrillera, se concluye que estos grupos desempeñan un papel importante en la recuperación del suelo. Su interacción y comunicación, junto con su actividad enzimática, contribuyen a la mejora de la calidad del suelo.

Al comparar la eficacia de las enmiendas orgánicas en los suelos degradados por la explotación ladrillera, no se pudo determinar una enmienda que sobresaliera en su efecto sobre el suelo. Cada enmienda mostró fortalezas en diferentes propiedades del suelo estudiadas. Esto sugiere que la elección de la enmienda adecuada puede depender de las propiedades particulares que se deseen mejorar en el suelo. Sin embargo, todas las enmiendas demostraron ser útiles para mejorar la calidad del suelo y contribuir a su recuperación.

## 8. RECOMENDACIONES

Considerando la importancia de esta investigación y en función de los resultados obtenidos, se formulan algunas sugerencias para la comunidad investigadora con el fin de lograr que sean tenidas en cuenta en futuros estudios para ayudar a reducir el impacto ambiental de la explotación ladrillera u otras formas de explotación del suelo. Para ello, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Evaluar otras cantidades de enmiendas orgánicas adicionadas al suelo o realizar una o varias redosificaciones adicionales para evidenciar una recuperación del suelo más efectiva y rápida.
- Explorar otros grupos funcionales que participen en los ciclos biogeoquímicos, además de los estudiados en esta investigación, para obtener una comprensión más completa de la dinámica del ecosistema.
- Ampliar el análisis utilizando otras enmiendas orgánicas, aparte del biocarbón y el compost, para ver si proporcionan otro tipo de beneficios, nutrientes y mejoran las características del suelo.
- Hacer un seguimiento más prolongado en el tiempo para evidenciar cuál enmienda es más efectiva y también evaluar grupos funcionales fúngicos.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Gutierrez Aponte, Jose Luis. Desarrollo sostenible y gestión ambiental. En: Medio ambiente y desarrollo sostenible. Universidad los Ángeles de Chimbote; 2009. p. 1–12.
2. Orellana E, González V. Aspectos e Impactos Ambientales. mayo de 2020;185–1107.
3. Parera Z. Soil Exploitation and Environmental Impacts of Brick Making in Wasur 2 Merauke Regency. J Huk Volkgeist. el 27 de diciembre de 2021;6(1):6–14.
4. Codes M, Robledo S, Alessandro M. Impacto ambiental de las ladrilleras en el Algarrobal, departamento de las Heras, Mendoza, Argentina. 2002;
5. Lowy C. El ambiente y los problemas ambientales. [Navarro]: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; 2014.
6. Silva M, Valencia L. Impacto ambiental y gestión del riesgo de ladrilleras en la vereda Los Gómez de Itagüí. 2013;(5):109–23.
7. Cahuatico R. Evaluación de contaminantes atmosféricos CO, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> de la zona urbana Cusco 2017. 2019;
8. Betancourt D, Díaz Y, Martirena F. Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción. Rev Ing Constr. agosto de 2013;28(2):113–24.
9. Perez V. Criterios de Implementación ISO 14000:2015 -Caso del Estudio del Sector Ladrillea Uno A. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 2019;
10. Mora G. Estado actual de la minería en Colombia y la identificación de impactos. Orcid Univ Libr. 2023;
11. Delgado H. Impactos ambientales ocasionados por la extracción de materia prima de la industria ladrillera en la Campiña alta de Supe-Barranca, 2017-2018.
12. Quiceno-Vallejo MF, Escobar MC, Vásquez Y. Impacto de los drenajes de mina sobre los microorganismos del suelo. Rev Acad Colomb Cienc Exactas Físicas Nat. el 16 de marzo de 2020;44(170):241–56.
13. Gutiérrez A. Evaluación del impacto ambiental de la actividad minera de materiales de construcción en el municipio de Cogua- Cundinamarca y su incidencia en el tratado internacional sobre biodiversidad firmado por Colombia. 2016;
14. Olivares M. Análisis de la evolución del valor agregado del municipio de Cogua. [Chía, Cundinamarca.]: Universidad de la Sabana; 2017.
15. Cabrera F. Materia orgánica del suelo: papel de las enmiendas orgánicas. Real Acadeia Sevillana Cienc. 2009;10:275–91.

16. Pozo Suclupe LA. Identificación de impactos ambientales significativos en la industria ladrillera utilizando un moedlo de simulación dinámica. TZHOECOEN. el 12 de diciembre de 2018;10(4):593–609.
17. Alarcon S, Burgos F. Plan de manejo ambiental para la ladrillera el Santuario. [Bogotá]: Universidad Distrital Francisco José de Caldas; 2015.
18. Mora J. La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad del suelo. Univ Caldas Luna Azul. 2015;5–6.
19. Ramirez K, Florida N, Escobar F. Indicadores químicos y microbiológicos del suelo bajo aplicación de microorganismos eficientes en plantación de cacao (*Theobroma cacao* L.). Rev Investig E Innov Agropecu Recur Nat Paz. diciembre de 2019;6(2):21–8.
20. Cruz-Flores G, Guerra-Hernández EA, Valderrábano-Gómez JM, Campo-Alvés J. Indicadores de calidad de suelos en bosques templados de la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México. Rev TERRA Latinoam. el 11 de octubre de 2020;38(4):781–93.
21. Duran L, Guevara D, Heranadez F, Ramirez 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. [Bogotá]: Universidad Católica de Colombia; 2017.
22. Larney F, Angers D. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. Can J Soil Sci. enero de 2012;92(1):19–38.
23. Alvarez S. Enmiendas orgánicas y actividad metabólica del suelo en el rendimiento de maíz. Terra Latinoam. 2010;28(3):239–45.
24. Ferreras L, Gomez E, Toresani S, Firpo I, Rotondo R. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. Bioresour Technol. marzo de 2006;97(4):635–40.
25. Murillo Montoya SA, Mendoza Mora A, Fadul Vásquez CJ. La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. Rev Colomb Investig Agroindustrial. el 28 de diciembre de 2019;7(1):58–68.
26. Gómez Reyes JA, Luna Fontalvo JA. Grupos funcionales microbianos en suelos contaminados con toxafeno en el departamento del Cesar, Colombia. Luna Azul. el 1 de julio de 2018;(47):98–113.
27. Torres MV. Evaluación de grupos funcionales (ciclo del C, N, P) y actividad de la fosfatasa ácida en dos suelos agrícolas del departamento de Boyacá (Colombia). 24(2).
28. Montañó NM, Sandoval Pérez AL, Nava Mendoza M, Sánchez Yañez JM, García Oliva F. Variación espacial y estacional de grupos funcionales de bacterias cultivables del suelo de un bosque tropical seco en México. Rev Biol Trop [Internet]. el 22 de julio de 2013 [citado el 26 de noviembre de 2023];61(1). Disponible en: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/11241>
29. Beltrán Pineda ME, Lizarazo-Forero LM. Grupos Funcionales de Microorganismos en Suelos de Páramo Perturbados por Incendios Forestales. Rev Cienc. el 26 de mayo de 2014;17(2):121–36.

30. Torres LM, Córdoba CA. Grupos funcionales de microorganismos (fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfato y celulolíticos) en suelos de agroecosistemas cafeteros (ecológicos y convencionales) en Anolaima, Cundinamarca. Universidad del Valle. 2013;
31. León Santa María JE, Oré Cierto LE, Vertiz-Osores JJ, Mendez-Ilizarbe GS, Mercado-Marrufo CE, García Curo G, et al. Geohelminfos y parámetros fisicoquímicos del suelo como indicadores de calidad ambiental en el distrito de José Crespo y Castillo, Huánuco. Bol Malariol Salud Ambient. 2022;62(3):383–96.
32. Mantilla-Paredes A, Cardona G, Peña-Venegas C, Murcia U, Rodríguez M, Zambrano M. Distribución de bacterias potencialmente fijadoras de nitrógeno y su relación con parámetros fisicoquímicos en suelos con tres coberturas vegetales en el sur de la Amazonia colombiana. Rev Biol Trop. el 2 de septiembre de 2008;57(4).
33. Shamim MB, Islam MdA, Sultana MstA. Environmental Impact of Brick Manufacturing Process in Rajshahi Region, Bangladesh. Int J Econ Energy Environ [Internet]. el 1 de febrero de 2024 [citado el 10 de marzo de 2024]; Disponible en: <http://www.sciencepg.com/article/ijeec.20240901.11>
34. Arco E. Implicación de Enmiendas Orgánicas e Inorgánicas en la Adsorción y Biodisponibilidad de Elementos Traza en Suelos. [Murcia]: Universidad de Murcia; 2017.
35. Geovanny A, Amparo T, Cañas P, Nogales S. Diseño de un sistema de explotación a cielo abierto para la mina de arcillas ladrillera Zulia S.A., municipio del Zulia Norte de Santander. 2018;
36. Martínez Madrid DE, Marrugo-Negrete J. Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia. Cienc Tecnol Agropecu [Internet]. el 12 de junio de 2021 [citado el 4 de febrero de 2024];22(2). Disponible en: <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/2272>
37. Vargas L. Evaluación de indicadores microbiológicos en suelos de un área impactada por la minería de oro, en el municipio de Santa Isabel- Tolima. [Ibagué, Tolima]: Universidad del Tolima; 2017.
38. Soriano J, Yopasa J. Elementos para el desarrollo de un proceso de restauración de áreas degradadas por ladrilleras en la vereda Patio Bonito municipio de Nemocón [Internet]. [Bogotá]: Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C.; 2022. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/34299>
39. Rincon C, Mahecha O, Torres M. Componentes de desarrollo minero en el municipio de Cogua Cundinamarca. Univ Nac Abierta Distancia. el 6 de diciembre de 2023;
40. Fernández Y. Alteración de las propiedades físico mecánicas de suelos por la actividad extractiva de arcilla utilizada para la fabricación de ladrillo artesanal en el centro poblado santa bárbara - Cajamarca. [Cajamarca]: Universidad Nacional de Cajamarca; 2019.
41. Guerrero Useda ME, Pineda Acevedo V. Contaminación del suelo en la zona minera de Rasgatá Bajo (Tausa). Modelo conceptual. Cienc E Ing Neogranadina. el 30 de abril de 2016;26(1):57.

42. Cuevas J, Seguel O, Ellies A, Dörner J. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Rev Cienc Suelo Nutr Veg* [Internet]. 2006 [citado el 14 de febrero de 2024];6(2). Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-27912006000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912006000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
43. Pérez A, Céspedes C, Núñez P. Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en República Dominicana. *Rev Cienc Suelo Nutr Veg*. 2008;8(3):10–29.
44. Koritschoner J. Cambios en las características física y químicas de un suelo después de la incorporación de compost de distinto origen. *AGRISCIENTIA*. 2019;36:15–23.
45. Cáceres H. Evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en plantaciones de pinus radiata, en tres sitios de la región sierra ecuatoriana. Universidad Técnica del Norte; 2017.
46. Pérez-Cabrera CA, Juárez-López P, Anzaldo-Hernández J, Alia-Tejacal I, Valdez-Aguilar LA, Alejo-Santiago G, et al. Biocarbón de ápices de caña de azúcar como enmienda de suelo para el cultivo de *Ocimum basilicum* var. *thyrsoflora* en invernadero. *Rev TERRA Latinoam* [Internet]. el 28 de febrero de 2022 [citado el 14 de febrero de 2024];40. Disponible en: <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1077>
47. Cui L, Yin C, Chen T, Quan G, Ippolito JA, Liu B, et al. Remediation of organic halogen-contaminated wetland soils using biochar. *Sci Total Environ*. diciembre de 2019;696:134087.
48. Morocho M, Leiva M. Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Cent Agric*. 2019;46(2):93–103.
49. Kcana H. Microorganismos eficientes (EM) en la recuperación de un suelo contaminado con cadmio del distrito de San Jerónimo, Cusco. [Lima, Perú]: Universidad César Vallejo; 2021.
50. Gómez B, Laura M, Ruiz G. Bacterias benéficas del suelo para proteger y recuperar áreas naturales protegidas. *Univ Tecnológica Mix*. 2021;25(74):43–7.
51. Leonel, Leyva A. Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos utilizando biomasa bacteriana: Revisión sistemática y metaanálisis. [Lima, Perú]: Universidad César Vallejo; 2021.
52. Carrasco M. Aplicación de Bacterias y Hongos para la Biodisponibilidad de Nutrientes y Recuperación de Suelos Degradados: Revisión Sistemática. [Lima, Perú]: Universidad César Vallejo; 2021.
53. Hinestroza J, Caicedo H. Abundancia de grupos funcionales de microorganismos del suelo bajo cuatro sistemas de manejo agroecosistémico del municipio de Palmira (Valle del Cauca). Universidad Abierta y a Distancia – UNAD; 2018.
54. Sierralta D, Cáceres A, Valencia I, Gajardo R, Cáceres K, Rodríguez A. Efecto de la revegetación con la especie nativa *Piscidia carthagenensis* Jacq. sobre la calidad del suelo en un matorral xerófito intervenido para la extracción de arena. *Multequina*. 2021;30(2):143–56.

55. Beltrán Pineda ME, Rocha Gil ZE, Bernal Figueroa AA, Pita Morales LA. Microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá. Colomb For. el 21 de junio de 2017;20(2):159.
56. Carranza N, Rejano C. Mecanismo de inmovilización de metales pesados en suelos agrícolas mediante enmiendas orgánicas (Compost y Biochar) y Microorganismos Benéficos (MOBs) [Internet]. Universidad Peruana Unión; 2020. Disponible en: [https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3761/Noemi\\_Trabajo\\_Bachiller\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3761/Noemi_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
57. Ramos E, Zúñiga D. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. Ecol Apl. 2008;7(1–2).
58. Calderón J, Aveiga A, Mendoza M. Bioestabilización de excretas avícolas mediante microorganismos eficientes para el control de la contaminación ambiental. Esc Super Politécnica Agropecu Manabí ESPAM-MFL. 2020;1(23):73–94.
59. Garzón Marín I, Cruz EC, Infante A, Cuervo JL. Efecto del compost de residuos de flores sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Acta Agronómica. el 9 de febrero de 2023;71(2):111–8.
60. Minuț M, Diaconu M, Roșca M, Cozma P, Bulgariu L, Gavrilescu M. Screening of Azotobacter, Bacillus and Pseudomonas Species as Plant Growth-Promoting Bacteria. Processes. el 28 de diciembre de 2022;11(1):80.
61. Aguilera D. Co-estabilización de residuos orgánicos de cervecería artesanal para obtener enmiendas de suelos. [Internet]. [Concepción, Chile]: Universidad de Concepción; 2024. Disponible en: [http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/12117/1/aguilera\\_l\\_d\\_2023\\_AGRO.pdf](http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/12117/1/aguilera_l_d_2023_AGRO.pdf)
62. Huaraca-Fernandez JN, Pérez-Sosa L, Bustinza-Cabala LS, Pampa-Quispe NB. Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. Inf Tecnológica. agosto de 2020;31(4):139–52.
63. Rodríguez A, Zárate S, Bastida A. Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. Rev Cienc Ambient. 2022;56(1):178–208.
64. Vega F, Virú P. Aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros, cerro de Pasco, 2021. [Perú]: Universidad Nacional del Callao; 2023.
65. Santamaria J, Rossignoli C. Efecto de la aplicación de biocarbón sobre propiedades químicas de suelo y desarrollo y rendimiento de lechuga. [Honduras]: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano; 2021.
66. Mendoza D. Revisión sistémica del efecto del Biocarbón para remediación de suelos contaminados por actividad minera. [Lima-Perú]: Universidad César Vallejo; 2021.
67. Toledo J, Tuesta D. Influencia del compost de estiércol de Cavia porcellus en la biorremediación de metales pesados en suelos contaminados con relaves mineros, Jangas – 2022. [Lima-Perú];

68. Espinoza B, González L, Huaman H, Vásquez A. Metodología para discriminar los impactos ambientales naturales de los antropogénicos en actividades mineras. *Fiscalización Ambiental*; 2021.
69. Lozano Reátegui RM, Alegre Orihuela JC, Velazco Castro EV, Mendoza Carlos MM, Nieto Iturri WG. Biocarbón de cáscaras de semilla de palma aceitera enriquecido en biol de estiércol para mejorar suelos sobre pastoreados. *Llamkasun*. el 10 de mayo de 2021;2(2):15–37.
70. González I, Rodríguez M, Delgado B, Peter H. Biochar y su contribución a la nutrición, crecimiento y defensa de las plantas. *Protección Veg* [Internet]. 2020;35(2). Disponible en: <https://ojs.edicionescervantes.com/index.php/RPV/article/view/1090/1606>
71. Guzmán E. Aislamiento y caracterización de bacterias solubilizadoras de fósforo a partir de cuatro suelos de la provincia de Chimborazo [Internet]. [Riobamba – Ecuador]: Escuela Ingeniería Agronómica; 2011. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1827/1/13T0728%20.pdf>
72. Jose D, Antonio M, Enrique V. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra Latinoam*. 2001;19(4):293–9.
73. Viteri P, Castillo D, Viteri S. Desarrollo y evaluación de un inóculo de bacterias celulolíticas. *Rev UDCA*. 2015;18(1):207–15.