

Composición y abundancia de invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica del suelo, en relación a prácticas agronómicas en ocho fincas con cultivos de palma de aceite en la zona Oriente de Colombia.

Angélica María Herrera Díaz

Código: 20141029

Universidad de La Salle
Departamento de Ciencias Básicas
Bogotá D.C., Colombia 2019

Tesis como requisito parcial para obtener el título de

Biólogo (a)

Universidad de La Salle, Bogotá

Angélica María Herrera Díaz

Febrero 2020

Tutor

Silvia Rivera Rodríguez

Cotutor

Lucía Cristina Lozano Ardila

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto no hubiera sido posible sin el amor, el apoyo y el constante acompañamiento de mis padres en este camino que desde pequeña siempre llamó mi atención y mi completa admiración, y que hoy en día, es apenas el comienzo para seguir deslumbrándome por la biología.

Quiero agradecerle a Diego R. por motivarme a ser cada día mejor, por su compañía en cada momento de mi vida, por su apoyo y disposición en tenderme la mano para poder llevar a cabo todos mis proyectos y en particular, de este trabajo.

A la Fundación Ecotrópico Colombia, por permitirme hacer parte de su equipo de trabajo, a Adriana Hurtado directora de la Fundación, a Juliana Morales por colaborar en el Laboratorio del Museo de La Salle y especialmente a Silvia Rivera quien con mucha entrega y amor dirigió mi trabajo de grado, además, de permitirme conocer al ser humano tan sensible, amoroso y humilde que la identifica.

A la Universidad de La Salle y en especial al programa de Biología por irradiar tanto amor y respeto por la vida. A la profesora Lucía Lozano por acompañarme en este proceso de formación profesional, además como co-directora de tesis, por su compromiso y su disposición en ayudarme a cumplir este logro.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Distribución de cultivos de palma de aceite en Colombia

1.2 Suelos con cultivos de palma de aceite en Colombia

1.3 Organismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica

1.3.1 Invertebrados descomponedores de materia orgánica

1.3.2 Microorganismos descomponedores de materia orgánica

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

2.2 Objetivos específicos

3. METODOLOGÍA

3.1 Escogencia de las fincas.

3.2 Recolección de los datos para la selección de prácticas de manejo agronómico

3.3 Fase de campo

3.4 Fase de laboratorio

3.4.1 Identificación taxonómica de los invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos palmeros evaluados.

3.4.2 Obtención de datos de los análisis microbiológicos y fisicoquímicos de los suelos

3.5 Análisis de datos

3.5.1 Manejo de datos de los invertebrados y los microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica

3.5.2 Estadísticos

4. RESULTADOS

4.1 Abundancia de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos de las ocho fincas evaluadas

4.2 Abundancia de microorganismos descomponedores de materia orgánica

4.2.1 Análisis de correspondencia canónica (CCA) entre las variables fisicoquímicas del suelo y los microorganismos descomponedores de materia orgánica.

4.2.1.1 Variables físicas del suelo vs microorganismos descomponedores de materia orgánica

4.2.1.2 Variables del carbono y nitrógeno vs microorganismos descomponedores de materia orgánica.

4.2.1.3 Variables elementos del suelo vs microorganismos descomponedores de materia orgánica.

4.3 Análisis de correspondencia canónica (CCA) entre las prácticas de manejo agronómico y la abundancia de los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Abundancia de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos estudiados

5.2 Abundancia de microorganismos descomponedores de materia orgánica

5.2.1 Relación entre las bacterias aerobias mesófilas (B.A.M) y las variables fisicoquímicas.

5.2.2 Relación entre los microorganismos celulolíticos y las variables fisicoquímicas.

5.2.3 Relación entre los hongos mesófilos y las variables fisicoquímicas.

5.2.4 Relación entre los microorganismos amonificantes y las variables fisicoquímicas

5.2.5 Relación entre los actinomicetos y las variables fisicoquímicas.

5.3 Relaciones entre las prácticas de manejo agronómico y las abundancias de los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica

6. CONCLUSIONES

7. RECOMENDACIONES

8. REFERENCIAS

RESUMEN

El aumento en las zonas dedicadas a los cultivos de palma de aceite en el mundo, ha repercutido en la pérdida de biodiversidad edáfica. Una de las zonas con menor tasa de fertilidad y la presencia de suelos ácidos en Colombia es la Orinoquía, es por ello que los agricultores recurren a la aplicación de enmiendas y fertilizantes de síntesis química, ocasionando alteraciones en las propiedades y características físicas, químicas y biológicas de los suelos. Esta agroindustria ha representado uno de los motores más importantes de la economía colombiana, sin embargo, se ha pasado por alto todas las implicaciones que tienen las prácticas agronómicas en procesos biológicos y ecosistémicos incluyendo los de descomposición de materia orgánica y con ello, organismos indicadores de este proceso. En este estudio se evaluó la composición y abundancia de invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en relación a prácticas agronómicas en ocho fincas con cultivos de palma de aceite en la Zona Oriente de Colombia. El presente trabajo se realizó en el marco de la consultoría *“Valoración de los servicios ecosistémicos de la polinización, formación de suelos y el control biológico de plagas y enfermedades en las subregiones palmeras Norte y Oriente”* desarrollada por la Fundación Ecotrópico Colombia, en el marco del Proyecto GEF-PPB (Paisaje Palmero Biodiverso). Acorde a esto, la toma de muestras en campo fue realizada por un grupo de especialistas de Ecotrópico, en la cual se utilizó la unidad muestral propuesta por Bignell, trabajando en 3 unidades muestrales por finca, distribuidas en un transecto que atraviesa el lote palmero en distancias logarítmicas a 0,100 y 1000 m. El diseño de la unidad muestral fue conformado por dos círculos concéntricos de 3 y 6m de radio. Alrededor de las circunferencias fueron distribuidas 12 muestras para análisis de la microbiota y 12 para mesofauna edáfica, además de 4 muestras para los análisis fisicoquímicos. Se trabajaron con ocho fincas con cultivos de palma de aceite cercanas a áreas con coberturas naturales, con la implementación de diversas prácticas de manejo agronómico y en fase productiva. Se realizó el procesamiento y la clasificación taxonómica de las muestras de los invertebrados edáficos procedentes de las fincas palmeras. Esta fase se realizó en el Laboratorio del Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de la Salle; también, se compararon y analizaron los resultados de los datos fisicoquímicos y microbiológicos. Con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticas entre la composición fisicoquímica y microbiológica de los suelos de las ocho fincas, se realizaron pruebas *Kruskal- Wallis* para datos no paramétricos. Sobre

esta prueba, se realizaron pruebas pareadas de *Dunn post hoc*, para identificar entre cuáles fincas se daban estas diferencias comparando valores p de significancia no corregida (valores para cada prueba pareada) con un α de 0,05. Además de análisis multivariados de agrupamiento para visualizar asociaciones e intentar hacer inferencias entre las mismas. El orden Hymenoptera fue el más abundante en los suelos de las ocho fincas evaluadas, seguido de Coleoptera y Blattodea, mientras que las abundancias más bajas fueron encontradas en los órdenes Styломmatophora, Polydesmida, Dermaptera e Isopoda. Para las ocho fincas evaluadas, las bacterias aerobias mesófilas presentan los valores de abundancia más altos, seguido de los amonificantes y actinomicetos. Los grupos de microorganismos menos abundantes fueron los hongos mesófilos y los microorganismos celulolíticos. En términos generales, los suelos evaluados presentaron un contenido pobre de materia orgánica, siendo un factor determinante en las abundancias encontradas de microorganismos descomponedores de materia orgánica. A pesar que se ha documentado por un lado que, la adición de residuos de raquis a los suelos favorece la abundancia de invertebrados y microorganismos y por el otro que, la aplicación de glifosato y fertilizantes de síntesis química altera las dinámicas ecológicas de los suelos, en este estudio no se encontraron relaciones directas entre los indicadores biológicos estudiados y estas prácticas de manejo agronómico.

1. INTRODUCCIÓN

Se han reportado más de 13 millones de hectáreas de tierra cultivadas con palma aceitera en los trópicos (1). Para el caso de Colombia, las cifras para las áreas cultivadas aumentaron un 15% en el año 2015, clasificando al país como el cuarto productor más alto del mundo y el productor pionero de palma de aceite en América (2,3).

La pérdida de biodiversidad relacionada con la destrucción de amplias extensiones de bosques naturales para el establecimiento de cultivos de palma de aceite, ha sido un tema que en las últimas décadas ha tomado relevancia tanto a nivel nacional como internacional (4).

1.1 Distribución de cultivos de palma de aceite en Colombia

En Colombia, la mayor concentración de zonas dedicadas a los cultivos de palma de aceite se distribuye en la Zona Norte, comprendiendo a los departamentos de Cesar, Córdoba, Magdalena, Sucre y Bolívar; Zona Central, en los departamentos de Santander y Norte de Santander y Zona Oriental, en los departamentos de Casanare y Meta (2). De las áreas cultivadas con palma de aceite se estima que para el año 2015, 88.523 estaban en fase de desarrollo y 377.662 en fase de producción de la cual, la Zona Oriental obtuvo el mayor porcentaje de desempeño de producción total de aceite de palma (5).

Dentro de las tres zonas productoras de palma de aceite en Colombia existe una gran variedad de suelos, generalmente ácidos, álicos, desaturados de bases y con bajas concentraciones de fósforo disponible; de igual forma, características como las diferencias climáticas, hacen que se genere un conjunto de condiciones edafoclimáticas específicas de cada zona y por ende los requerimientos de los suelos cultivados van a responder de manera diferente al momento de brindar las condiciones óptimas en los cultivos (5).

1.2 Suelos con cultivos de palma de aceite en Colombia

La industria de la palma de aceite es actualmente uno de los motores más importantes para la economía del mundo, sin embargo, la competitividad de los cultivos se ha visto perjudicada debido a los elevados costos de producción que genera, dentro de los cuales la fertilización es uno de los más altos. Todas estas implicaciones pueden estar relacionadas con las zonas cultivadas, ya que, gran proporción de los cultivos actuales se encuentran sobre suelos que previamente tuvieron incidencia de actividades ganaderas y

agropecuarias, estos usos previos del suelo, han provocado un deterioro en su estructura, teniendo como resultado la alteración de sus características físicas y químicas (6, 7).

Según estudios realizados por Gómez y colaboradores (8), una de las zonas con menor tasa de fertilidad y la presencia de suelos ácidos es la Zona Oriente, por lo tanto, los agricultores aplican enmiendas y fertilizantes de síntesis química. Además, ésta zona está fuertemente aquejada por la presencia de enfermedades de la palma que ocasionan grandes problemas al sector palmero como la Pudrición del Cogollo (PC) y la Marchitez Letal (ML). Todos estos factores inciden en una menor productividad comparada con el resto de zonas del país (8, 9).

Estudios como el de Owen (10), señalan que la palma de aceite puede crecer y desarrollarse en suelos con baja fertilidad, sin embargo, otros estudios contrastan esta premisa indicando que esta especie es una de las plantas cultivadas que mayores cantidades de nutrientes necesita para lograr altos niveles de productividad, especialmente en los primeros años de cultivo (7, 9, 11).

Una de las restricciones más comunes en la demanda de estos cultivos ha sido la baja disponibilidad de formas libres de los elementos químicos esenciales en los suelos, relacionada con las altas tasas de extracción de nutrientes que caracterizan a estos cultivos, en particular, cuando se trata de alcanzar rendimientos altos. Dadas las circunstancias, Cenipalma señala que en Colombia ha sido recurrente basar los problemas de deficiencia nutricional exclusivamente en análisis foliares y son, por lo tanto, muy escasos los estudios que integren análisis edáficos sobre las características y propiedades físicas, químicas y biológicas en suelos con plantaciones de palma de aceite (5).

1.3 Organismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica

Dentro de las alternativas de manejo agrícola empleadas por el sector palmero se encuentran diferentes prácticas tendientes a la sostenibilidad de los cultivos (como la incorporación al suelo del producto del compostaje de residuos y la adición directa de residuos del proceso productivo en platos o calles de palera, entre otras). A pesar que, estas son actividades que reducen los impactos ambientales en el agro-ecosistema, el proceso de la descomposición de materia orgánica es muy lento (12).

El proceso de descomposición de materia orgánica se da principalmente por actividad enzimática de hongos y bacterias, sin embargo, un primer aporte es realizado por invertebrados edáficos como por ejemplo ácaros, milpiés, lombrices de tierra, termitas,

hormigas, coleópteros y algunas larvas de insectos, ya que rompen y trituran residuos de las plantas y de otros animales, y a la vez dispersan los propágulos microbianos (13,14). Una alta diversidad de organismos que participen en estos procesos podría agilizar el proceso de descomposición de materia orgánica (12).

1.3.1 Invertebrados descomponedores de materia orgánica

El efecto de diferentes grupos de invertebrados durante el proceso de descomposición, como por ejemplo la fragmentación de hojas, hace que se remuevan los residuos vegetales hacia diferentes estratificaciones del suelo, estimulando la colonización y actividad de microorganismos capaces de transformar componentes orgánicos de la hojarasca en nutrientes minerales disponibles para el aprovechamiento de las plantas, aportando de manera significativa al reciclaje de nutrientes en áreas naturales e intervenidas. Se han reconocido a Diplopoda, Isopoda, Blattodea y Oligochaeta como unos de los grupos más importantes en la transformación física de estructuras complejas y consumo de materia vegetal (15, 16).

Algunos autores (17, 18, 19, 20, 21) han clasificado a los invertebrados transformadores de hojarasca y a los mesorreguladores como grupos funcionales importantes en las dinámicas ecológicas del suelo; a pesar de que difieren en los niveles de fragmentación debido a la distinción de tamaño entre los dos grupos; los transformadores contribuyen a la degradación de la materia orgánica a mayores escalas de tiempo y espacio, gracias a que son de mayor tamaño, en comparación con los mesorreguladores. Ambos grupos se alimentan principalmente de materia orgánica y establecen relaciones mutualistas con microorganismos, que les ayudan en los procesos de digestión (22). Además, intervienen en la regulación de ciclos de nutrientes del suelo a través de actividades como el forrajeo (16, 23).

Entre los principales grupos de invertebrados transformadores de hojarasca se encuentran las lombrices de tierra o anélidos, las hormigas, los ácaros, milpiés y las termitas y, en menor medida, los moluscos (caracoles). Estos organismos trituran los residuos y dispersan los propágulos microbianos. El carbono orgánico liberado en este proceso puede ser mineralizado como CO_2 o CH_4 , o incorporado en varios tipos de materia orgánica en el suelo (24).

Los mesorreguladores comprenden un grupo de la mesofauna edáfica que incluye por ejemplo a las cochinillas (isópodos), milpiés y lombrices de tierra, los cuales son

considerados detritívoros obligados. Principalmente, tienen la capacidad de realizar la fragmentación mecánica de la materia orgánica, influenciando la actividad microbiana, modificando los sustratos orgánicos, transportando propágulos microbianos y generando microambientes con condiciones abióticas convenientes para su multiplicación y actividad en los procesos de degradación (25, 26).

Algunos invertebrados como por ejemplo las lombrices de tierra, las termitas, los milpiés, las cochinillas de humedad y los colémbolos tienen la capacidad de brindar información sobre la calidad de suelo debido a su sensibilidad y rapidez en responder a perturbaciones en los ecosistemas permitiendo identificar el estado de conservación del mismo, además del grado de intervención por actividades antropogénicas (27, 28).

1.3.2 Microorganismos descomponedores de materia orgánica

Este grupo es altamente diverso compuesto principalmente por bacterias y hongos que, en conjunto con algunos invertebrados, participan en una cascada de procesos sucesivos de modificación de materiales orgánicos como por ejemplo polisacáridos, lípidos, hidrocarburos saturados, fenoles, proteínas, quitina, alcoholes hasta compuestos polimerizados como la celulosa y la lignina los cuales son transformados hasta su mineralización y humificación (15, 25, 29,30).

Mientras el proceso de mineralización hace disponibles los nutrientes esenciales para los productores primarios y el mantenimiento de la fertilidad química de los suelos; la formación de materiales húmicos permite la acumulación de materia orgánica que brinda estructura, porosidad y capacidad de retención de fluidos y cationes a través de la formación de agregados, conservando y evitando pérdida de nutrientes por lixiviación (31, 32).

Dentro de los grupos de microorganismos con mayor riqueza y abundancia de especies, importantes en el proceso de transformación de la materia orgánica del suelo, se encuentran las bacterias y los hongos (25). Por un lado, las bacterias son los primeros organismos en colonizar superficies del suelo, estos son transportados a través del movimiento del agua y de diferentes artrópodos edáficos; pero a la vez, su susceptibilidad a responder ante situaciones de estrés ambiental, las hace ser organismos directamente dependientes de los recursos presentes en el suelo (30).

Los hongos y actinomicetos, al ser microorganismos de crecimiento filamentosos los hace más exitosos al momento de explorar micro-sitios del suelo, además de aprovechar los recursos y movilizar los nutrientes, incluso en suelos en los cuales la disponibilidad de los mismos es muy pobre (33). Cabe destacar que estos microorganismos además de aportar al proceso de formación de suelos, también son de gran importancia para otros grupos de organismos, por ejemplo, de algunos invertebrados los cuales se alimentan de hongos (34).

La incursión en líneas de investigación acerca de microorganismos de los suelos está en transición mostrando avances en el desarrollo de bioinsumos y sistemas de análisis de calidad. Se ha demostrado que la presencia de algunos microorganismos asociados al suelo contribuye a mantener la capacidad de protección de las plantas contra enfermedades y plagas, además, de estar asociados a los ciclos biogeoquímicos (12, 35, 36, 37).

El rol funcional de los microorganismos e invertebrados edáficos ha recibido poca atención, a pesar de los servicios que éstos brindan para mantener el equilibrio en los ecosistemas; la función de estos grupos de organismos ha ido sufriendo una serie de alteraciones, a raíz del reemplazo de las dinámicas naturales por operaciones técnicas dependientes de fuentes de energía no renovables como la fertilización química (38).

El desarrollo que la agroindustria de la palma de aceite ha tenido en el país, desafortunadamente no ha estado acompañado de un proceso sistemático de investigación que incorpore factores como el estudio integral de los suelos palmeros y de alternativas de manejo de las prácticas empleadas, con el fin de conocer y monitorear la salud del suelo a largo plazo (5, 39). Es por ello, que un abordaje integral de estos organismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica junto con parámetros fisicoquímicos del suelo y prácticas agronómicas, representa una puerta de conocimiento sobre las implicaciones de las actividades antropogénicas en los agro-ecosistemas de alto valor económico, de tal forma que se generen formas alternativas de manejo, contribuyendo a mantener la productividad y la conservación de la biodiversidad de los suelos, teniendo en cuenta que gran parte de la biodiversidad del planeta es albergada en el suelo (31,40,41, 42).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar la composición y abundancia de invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en el suelo, en relación a prácticas agronómicas en ocho fincas con cultivos de palma de aceite en la zona Oriente de Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar la abundancia de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos de las ocho fincas palmeras.
- Analizar las abundancias de microorganismos descomponedores de materia orgánica teniendo en cuenta los análisis fisicoquímicos de los suelos estudiados.
- Establecer posibles relaciones entre las prácticas agronómicas empleadas en las ocho fincas palmeras y las abundancias de invertebrados y microorganismos descomponedores de materia orgánica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó bajo el marco del proyecto “*Evaluación de los servicios ecosistémicos de la polinización, formación de suelos y control biológico de plagas y enfermedades para su valoración en las subregiones palmeras Norte y Oriente*” desarrollado por la Fundación Ecotrópico Colombia (septiembre de 2016 a febrero de 2018) en el marco del proyecto GEF/BID Paisaje Palmero Biodiverso (PPB).

La toma de muestras en campo fue ejecutada por un grupo de especialistas asignado por la Fundación Ecotrópico Colombia. Conforme a esto, el aporte generado mediante este estudio está centrado en el procesamiento de las muestras de invertebrados edáficos de las fincas palmeras evaluadas, contribuyendo a la generación de datos de composición taxonómica y abundancia, además, del análisis de datos fisicoquímicos y microbiológicos generados en el Laboratorio de Suelos y Aguas, el Laboratorio de Microbiología, Control de Calidad Bioinsumos y Extractos Vegetales de Uso Agrícola pertenecientes al Centro de Bio-Sistemas (C-Bios) de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano y del Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

3.1 Escogencia de las fincas

Según el trabajo de la Fundación Ecotrópico, para la escogencia de las fincas palmeras, se consideraron como criterios de selección la integridad ecológica del paisaje en la que están inmersos los cultivos (cercanía y área de las coberturas naturales remanentes) y el uso de diversas prácticas de manejo agronómico. En la Tabla 1 se resumen las características generales de las ocho (8) fincas evaluadas en el presente trabajo, a cada una se le asignó un código dejando anónimo su verdadero nombre por razones de confidencialidad.

Fue necesario vincular en este estudio las fincas que tuvieran datos históricos completos de las actividades y los costos asociados a las diferentes prácticas de manejo agronómico basadas en el uso de productos de síntesis química y productos biológicos. En cada una de las fincas a evaluar se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: que tuvieran cerca algún fragmento de vegetación natural primaria o secundaria, el estado y presencia de zonas de Alto Valor de Conservación (AVC) y que estuvieran en fase productiva (cerca de 10 años, habiendo superado los primeros años después de la siembra). Para mayor claridad, cada una de las fincas evaluadas corresponde a una plantación diferente.

En cuanto a las prácticas de manejo agronómico, se buscaron fincas que tuvieran diferentes tipos de prácticas de implementación: desde la nula intervención de la finca (sin prácticas agronómicas), pasando por fincas con tendencia al uso de prácticas sostenibles (uso de productos orgánicos como enmiendas, compost, fertilizantes y controladores biológicos), hasta fincas con uso intensivo de productos de síntesis química (uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas inorgánicos) (Anexo 1).

Tabla 1. Características generales de las 8 fincas evaluadas.

FINCA	AZ	DW	CX	BY	EV	GT	FU	HS
Especie cultivada	<i>Elaeis guineensis</i>	<i>Elaeis guineensis</i>	<i>Elaeis guineensis</i>	Híbrido GxO	<i>Elaeis guineensis</i>	Híbrido GxO	Híbrido GxO	<i>Elaeis guineensis</i>
Edad de la finca (años)	9	12	19	10	9	9	17	15
Área de la finca (Ha)	28,15	28,4	42,6	9,04	28,4	42	25,34	17,6
Densidad de siembra de la finca (Palmas/Ha)	142,98	122,08	122,08	131,19	123,79	152,45	134,78	133,07
Rendimiento promedio de la finca palmera (Ton/Ha)	29,6 (2017)	24,8 (2017)	19,6 (2016)	25 (2017)	18,94 (2017)	23 (2017)	14,89 (2016)	21,5 (2017)

3.2 Recolección de los datos para la selección de prácticas de manejo agronómico

De acuerdo a las principales prácticas recomendadas por Fedepalma y Cenipalma, (39, 40,41) para las diferentes fases del cultivo (establecimiento del cultivo, labores culturales, manejo nutricional y sanitario, cosecha y producción), el equipo de consultores de la Fundación Ecotrópico identificó 7 prácticas de manejo agronómico: limpieza de interlíneas y drenajes; estrategias de control de plagas y enfermedades; limpieza de platos; fertilización; aplicación de biomasa; porcentaje de cobertura de arvenses y uso de maquinaria pesada dentro de la finca, de las cuales se escogieron las últimas 5 como posibles prácticas que pudieran tener efectos directos e indirectos sobre el servicio ecosistémico de formación de suelos que abarca los procesos de descomposición de materia orgánica (Anexo 1).

Con lo que respecta a la fertilización, en las ocho fincas evaluadas se recogió la información relacionada con los insumos agrícolas utilizados en los cultivos, principalmente los que contienen N, P, K, B y Mg, adicionados en el último año por hectárea. Esto permitiría predecir sobre la ausencia o baja abundancia de algunos de los grupos funcionales estudiados, cuyas actividades ecológicas pueden verse afectadas debido al exceso o deficiencia de estos elementos.

La información detallada asociada a cada una de estas prácticas se solicitó a los dueños de las fincas.

3.3 Fase de campo

Se utilizó la unidad muestral propuesta en Bignell (20,21) y representada en la figura 1, en la cual se relacionan los métodos para llevar a cabo el inventario de la biota en suelos del trópico con los estudios de biodiversidad e intensificación agrícola en áreas con coberturas naturales. Se trabajó en 3 unidades muestrales por predio, distribuidas en un transecto que atraviesa el lote palmero en distancias logarítmicas a 0,100 y 1000 m como se ilustra en la figura 2. Este sistema incluye el muestreo de invertebrados, microorganismos y muestras de suelo para análisis fisicoquímico.

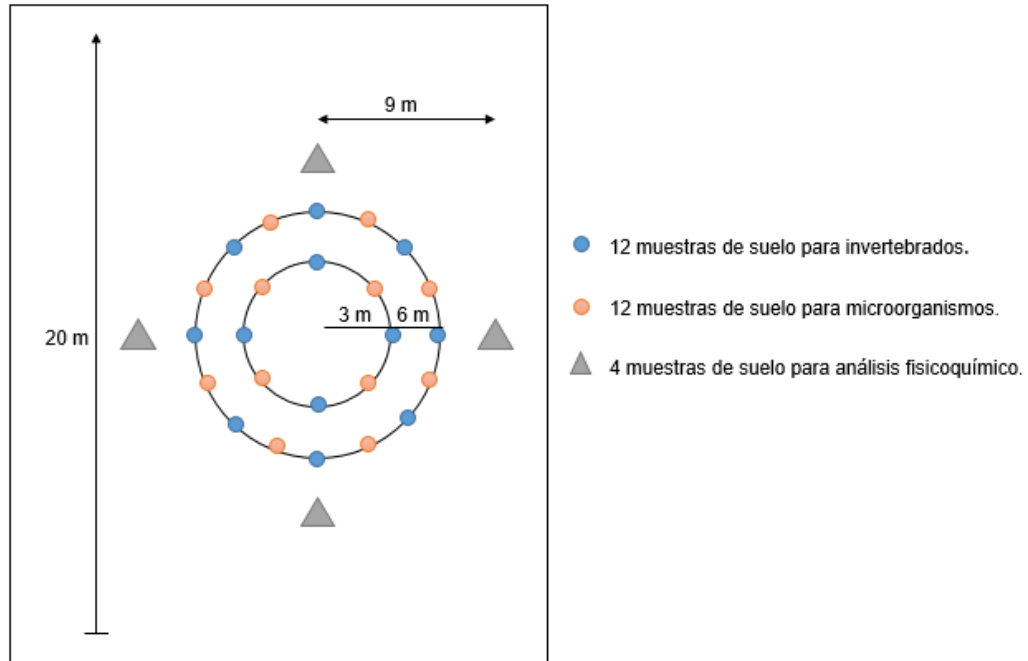


Figura 1. Diseño de la unidad muestral representada en un transecto de 20 m. Conformado por dos círculos concéntricos; uno de 3 m de radio que estará incluido en uno de 6 m en el que se tomaron 12 muestras de suelo para invertebrados, 12 muestras de suelo para microorganismos y 4 para análisis fisicoquímico.

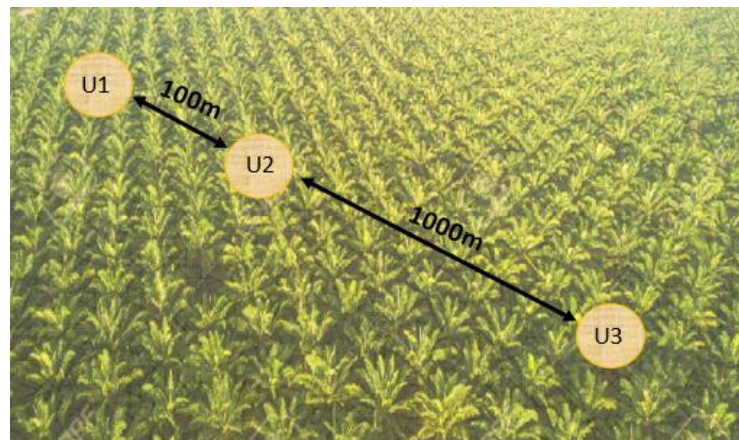


Figura 2. Distribución de la unidad muestral por predio palmero.

El diseño de la unidad muestral fue conformado por dos círculos concéntricos de 3 y 6 m de radio. Alrededor de las circunferencias fueron distribuidas 12 muestras para análisis de la microbiota y 12 para invertebrados edáficos, además de 4 muestras para los análisis fisicoquímicos que fueron colectadas usando un barreno tipo Edelman combinado.

Las muestras correspondientes de los invertebrados fueron tamizadas en campo, se limpiaron los especímenes, se utilizaron tamices progresivos de 6,3, 3,36, 1,18 mm, 425, 250 y 75µm. Los organismos seleccionados fueron almacenados en alcohol al 70% con glicerol y enviados a laboratorio del Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de La Salle para llevar a cabo su posterior clasificación taxonómica.

3.4 Fase de laboratorio

3.4.1 Identificación taxonómica de los invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos palmeros evaluados.

El material entomológico colectado fue procesado en el Laboratorio del Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de la Salle con supervisión y respaldo de la entomóloga Juliana Andrea Morales Monje llevando a cabo la clasificación taxonómica de los organismos con los criterios descritos más adelante.

Las muestras fueron rotuladas con el nombre del núcleo palmero, la finca a la cual pertenecían, la unidad muestral, la época del año y fecha de colecta. Esta información fue registrada, con el fin de tener conocimiento de la procedencia de los individuos. Posteriormente fueron observados en un estereoscopio (Zeiss, zoom máx. 32x) llevando a cabo una revisión y anotación de las características morfológicas, luego, fueron separados y clasificados hasta el nivel taxonómico de Orden. Cada grupo de organismos fue depositado en viales entomológicos con su respectivo código que representa la secuencia en la cual se han determinado los individuos.

La recopilación de esta información fue llevada a una base de datos en Excel con la siguiente información: Nombre de la finca, Unidad muestral, Trampa, Hora, Código, Etapa de desarrollo, Nombre común, Phylum, Subphylum, Clase, Orden, cantidad y dado el caso anotaciones que se hayan observado durante la manipulación de los organismos.

La identificación de los órdenes de invertebrados fue realizada mediante la implementación de material didáctico tomado de las claves taxonómicas de Borror y DeLong's (43), la guía visual de artrópodos de Ribera, Melic y Torralba (44) y el libro Immature insects de Stehr (45) y se estandarizó la nomenclatura taxonómica de acuerdo con el Sistema Integrado de Información Taxonómica (ITIS-www.itis.gov). Esta metodología fue aplicada para organismos en estadios larvales/ninfales y adultos.

3.4.2 Obtención de datos de los análisis microbiológicos y fisicoquímicos de los suelos

La realización de los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo se llevó a cabo en el Laboratorio de Suelos y Aguas del Centro de Bio-Sistemas (C-Bios) de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano en los cuales se incluyó análisis de la fertilidad química completa para caracterizar el suelo: cuantificación de elementos disponibles; **pH** en agua (1:1) (acidez Intercambiable sólo cuando $\text{pH} < 5.5$); **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)** en acetato de amonio (1:20); **elementos menores (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Al)** en DTPA (1:2), **boro (B)** mediante extracto de saturación, **fósforo (P)**: Bray II; **N-mineral** en KCl (1N)–Kjeldahl; **N-Total, Pw, N orgánico y materia orgánica. Carbono total** mediante fraccionamiento de materia orgánica NaOH 0.1N - Stevenson 1982. Análisis Físico: **clasificación de textura** por Bouyoucos sin destrucción de materia orgánica, **densidad aparente, densidad real, porosidad total y porosidad ocupada por el aire** mediante Materia Orgánica según Walkley Black.

Para la detección y cuantificación de los indicadores seleccionados de la microbiota del suelo, los análisis microbiológicos de organismos cultivables de las muestras fueron realizados en el Laboratorio de Microbiología, Control de Calidad Bioinsumos y Extractos Vegetales de Uso Agrícola de C-Bios y en el Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Los análisis incluyen recuento de bacterias heterótrofas mesófilas, hongos heterótrofos o saprobios mesófilos y actinomicetos, para ello se realizaron diluciones seriadas de 10^{-0} a 10^{-7} , siembra en medios de cultivo específicos por duplicado (**Hongos**: PDA, rosa de Bengala, Saboreaud y Komada. **Bacterias**: Agar nutritivo. **Actinomicetos**: Czapek), incubación a 28°C por 5 a 10 días para hongos y actinomicetos y 24 a 48 horas para bacterias y recuento en placa. También, recuento de **microorganismos celulolíticos** a través de conteo en placa por siembra en superficie y de **amonificantes** mediante fermentación tubos múltiples, conteo por número más probable.

3.5 Análisis de datos

3.5.1 Manejo de datos de los invertebrados y los microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica.

Una vez procesadas las muestras de los invertebrados edáficos y la creación de bases de datos con las diferentes categorías taxonómicas, se hizo una revisión bibliográfica para determinar qué órdenes de invertebrados estaban relacionados con los procesos de descomposición de materia orgánica en los suelos (17, 18, 19, 20, 21).

Los transformadores de hojarasca y mesorreguladores fueron los grupos funcionales más importantes y con mayor actividad en los procesos de descomposición de materia orgánica de los suelos. Los dos grupos se analizaron como uno solo denominado: ***invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica***, debido a que su rol funcional en el suelo es el mismo, además, de que en ambos grupos se comparten algunos órdenes de invertebrados.

Los microorganismos evaluados en este trabajo fueron seleccionados *a priori* por su función específica en la degradación de materia orgánica, escogiendo aquellos grupos que son utilizados ampliamente como indicadores en estudios de microbiología ambiental y cuyos métodos de detección y cuantificación se encuentran estandarizados dentro de microorganismos cultivables. Se seleccionaron a los actinomicetos, los amonificantes, los hongos aerobios mesófilos, los celulolíticos y a las bacterias aerobias mesófilas por su contribución a la formación de suelos (17, 18, 19).

3.5.2 Estadísticos

Se trabajaron con los promedios de las tres unidades muestrales y se adoptó un solo valor para cada parámetro en cada una de las ocho fincas. Para el caso de las abundancias de los microorganismos, los recuentos fueron transformados a unidades logarítmicas.

Con el fin de determinar la existencia de diferencias entre los promedios de las variables de las ocho fincas (promedios de los indicadores microbiológicos y los parámetros fisicoquímicos estudiados), se realizaron pruebas *Kruskal- Wallis* para datos no paramétricos. Sobre esta prueba, se realizaron pruebas pareadas de *Dunn post hoc*, para identificar entre cuáles fincas se daban estas diferencias comparando valores *p* de significancia no corregida (valores para cada prueba pareada) con un α de 0,05.

Adicionalmente, para poder realizar los análisis de ordenación de correspondencia canónica entre las variables fisicoquímicas y los indicadores microbiológicos, fue necesario dividir las variables en tres grupos (Variables físicas del suelo, variables del carbono-nitrógeno y variables elementos del suelo).

Para visualizar agrupamientos y relaciones entre las variables bióticas (abundancia de los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica) y abióticos (parámetros fisicoquímicos y prácticas agronómicas), se realizaron análisis multivariados de ordenación de correspondencia canónica (en inglés: Canonical Correspondence Analysis-CCA). Estos análisis permitieron ordenar los datos teniendo como base las relaciones de los datos biológicos, maximizando las posibles relaciones o el poder predictivo que efectúan los datos ambientales (para este caso las variables fisicoquímicas).

El análisis de correspondencia canónica es un análisis de correspondencia de una matriz con datos biológicos asociados a sitios específicos en donde cada sitio tiene valores para una o más variables ambientales. Los ejes de ordenación son combinaciones lineales de las variables ambientales. Estas variables, se representan gráficamente como correlaciones con los sitios de muestreo, basándose en un algoritmo de *eigen analysis*. Gráficamente se organizan los sitios de muestreo, asociándolos según su similitud a partir de los puntajes obtenidos después de las operaciones matemáticas matriciales realizadas por el programa estadístico. Sobre ese ordenamiento se grafican vectores que representan las variables ambientales que permiten ver relaciones positivas y negativas con las variables biológicas y los sitios de muestreo (46).

Todas las pruebas estadísticas fueron realizadas en los software PAST (PAleontological STatistics, Version 3.15) y R Project for Statistical Computing versión 3.4.2.

4. Resultados

4.1 Abundancia de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos de las ocho fincas evaluadas

Los órdenes de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica del suelo que presentaron las mayores abundancias relativas en las fincas palmeras evaluadas fueron Hymenoptera (entre los cuales el 99% de los individuos encontrados fueron hormigas); Coleoptera y Blattodea (termitas con un 88% y cucarachas un 12%) (Figura 3).

En la figura 3 se observa que el orden Hymenoptera obtuvo las mayores abundancias relativas en todas las fincas exceptuando la finca EV, la cual estuvo mejor representada por el orden Coleoptera con una abundancia relativa del 53,77%. La finca DW obtuvo la mayor abundancia relativa de organismos del orden Blattodea en comparación con el resto de las fincas. En contraste, las abundancias relativas más bajas fueron encontradas en los órdenes Stylommatophora, Polydesmida, Dermaptera e Isopoda, los cuales presentaban valores inferiores al 3% de la muestra total de invertebrados en cada una de las ocho fincas.

A pesar de que los órdenes Collembola, Mesostigmata, Haplotaxida, Enchytraeida y Diptera estuvieron presentes en los suelos de las ocho fincas estudiadas, sus abundancias relativas fueron menores al 6% (Figura 3).

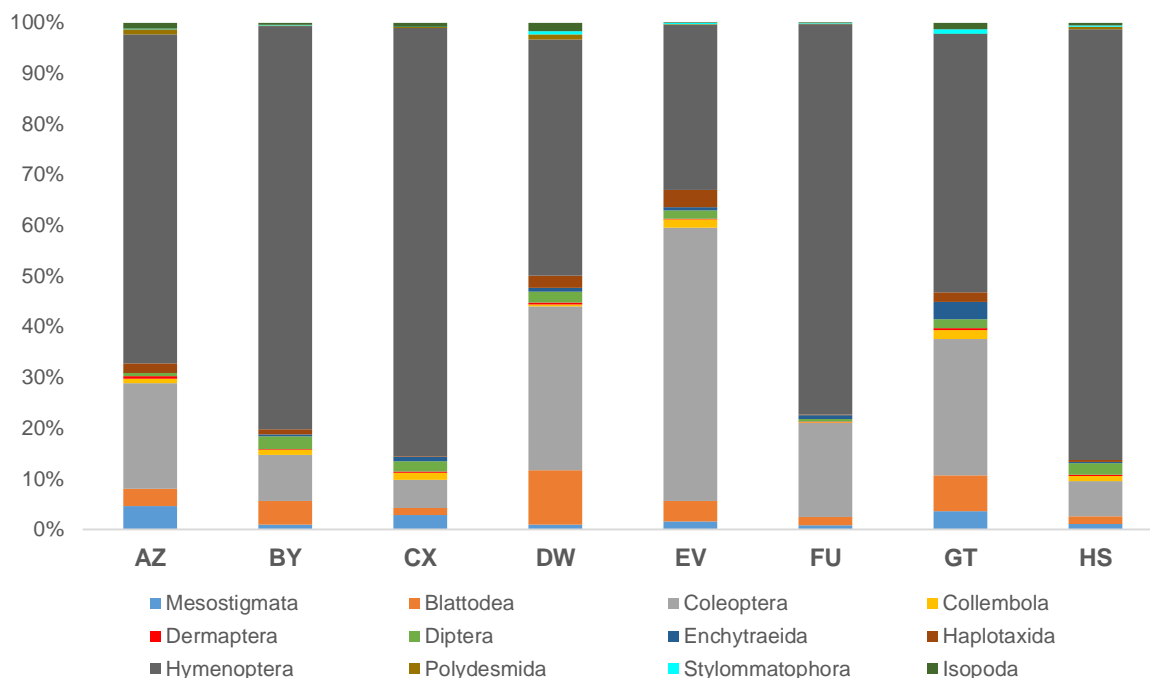


Figura 3. Abundancia relativa de los órdenes de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos de las ocho fincas palmeras evaluadas.

4.2 Abundancia de microorganismos descomponedores de materia orgánica

En la figura 4 se muestra la representación gráfica del logaritmo de las abundancias de los diferentes grupos de microorganismos que participan en el proceso de descomposición de materia orgánica para cada una de las ocho fincas palmeras evaluadas.

En la figura 4 se observa que, para las ocho fincas evaluadas, las bacterias aerobias mesófilas presentan los valores de abundancia más altos, seguidas por los amonificantes y actinomicetos.

Los grupos de microorganismos menos abundantes en las fincas palmeras fueron los hongos mesófilos y los microorganismos celulolíticos (figura 4).

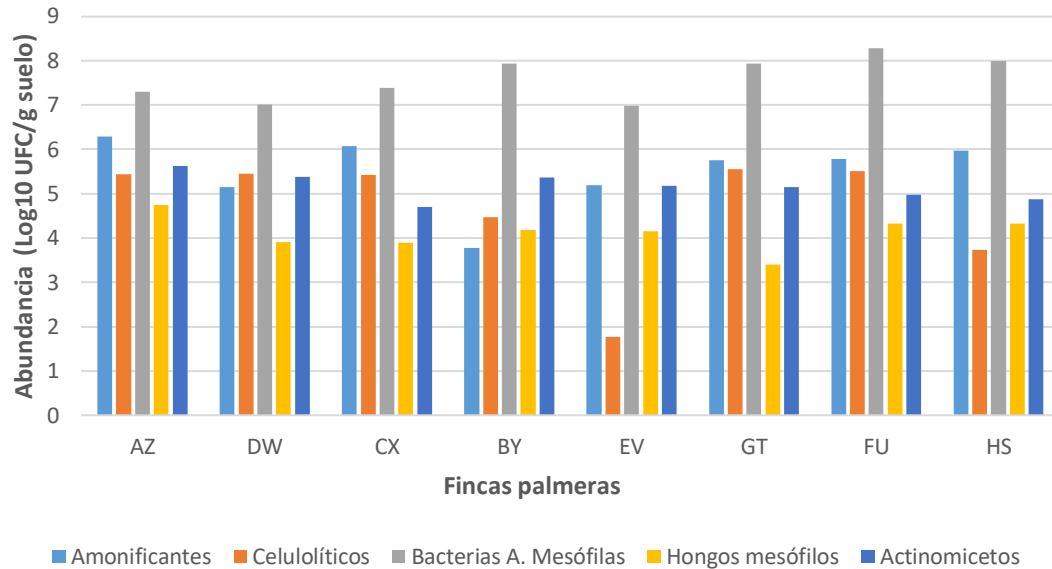


Figura 4. Logaritmo de las abundancias de microorganismos descomponedores de materia orgánica en los suelos de las ocho fincas palmeras evaluadas.

El grupo de microorganismos descomponedores de materia orgánica que obtuvo mayores abundancias fue el de las bacterias aerobias mesófilas encontrándose el valor más alto (valor logarítmico: 8,28 UFC/g suelo) en la finca FU en comparación con el resto de las fincas.

La finca AZ presenta las abundancias más altas para los amonificantes (valor logarítmico: 6,29 UFC/g suelo), actinomicetos (valor logarítmico: 5,62 UFC/g suelo) y los hongos mesófilos (valor logarítmico: 4,75 UFC/g suelo). Mientras que para el grupo de celulolíticos la finca GT presentó la abundancia más alta (valor logarítmico: 5,56 UFC/g suelo).

La finca EV presenta una abundancia de 1,77 UFC/g suelo (valor logarítmico) para los microorganismos celulolíticos siendo el valor más bajo comparado con el resto de las fincas.

4.2.1 Análisis de correspondencia canónica (CCA) entre las variables fisicoquímicas del suelo y los microorganismos descomponedores de materia orgánica

A continuación, en las figuras 5, 6 y 7, se presentan las gráficas de CCA en donde se muestra la ordenación de las fincas bidimensionalmente, representadas cada una con un punto negro y su código correspondiente. La cercanía de los puntos es proporcional a su similitud en cuanto a ordenación. Adicionalmente, ordena en el espacio los indicadores microbiológicos representados con puntos azules y el nombre respectivo del indicador y posiciona como vectores las variables fisicoquímicas (líneas verdes) maximizando las posibles relaciones entre los vectores, los sitios y las variables microbiológicas.

La magnitud y el sentido de los vectores es proporcional a los valores encontrados en el contexto de la matriz, respecto a las fincas y a los valores de los parámetros microbiológicos.

4.2.1.1 Variables físicas del suelo y los microorganismos descomponedores de materia orgánica

En la figura 5, los valores obtenidos para los *eigenvalues* de los ejes 1 y 2 son 0,010144 (73,73%) y 0,0020431 (14,85%) respectivamente. Esto indica que los patrones de distribución de las fincas, con relación a las abundancias de microorganismos descomponedores de materia orgánica, pueden explicarse en un 88,58% por las variables fisicoquímicas analizadas en la figura (Temperatura del suelo, pH, densidad aparente, porosidad total, %Pw (porcentaje de humedad), CIC (capacidad de intercambio catiónico), arcilla, arena y limo).

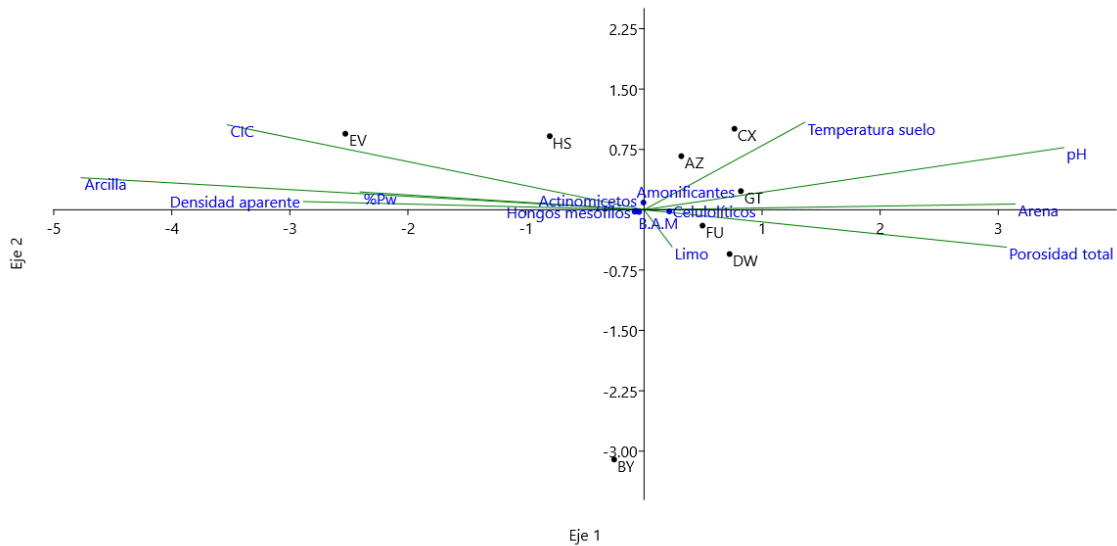


Figura 5. Análisis de correspondencia canónica de los indicadores fisicoquímicos del suelo (variables físicas) y los microorganismos descomponedores de materia orgánica para su respectivo ordenamiento con las fincas evaluadas.

En la figura 5, las fincas EV y HS se encuentran ubicadas en el mismo cuadrante. La finca EV presenta los valores más altos de las siguientes variables físicas: capacidad de intercambio catiónico (CIC) (15,68 meq/100g), contenido de arcilla (34,45%), porcentaje de humedad (%Pw) (1,58%) y densidad aparente (1,29 g/cm³).

En la figura 5 se observa que la finca FU y DW se ubican en el mismo cuadrante al igual que los microorganismos celulolíticos. Estos presentan una tendencia de correlación positiva con la porosidad total y el contenido de limo; y una correlación negativa con el contenido de arcilla, la capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente y el porcentaje de humedad.

Las fincas AZ, CX y GT se encuentran en el mismo cuadrante. La finca GT presenta el valor de pH más alto que el resto de los suelos (4,87), mientras que las fincas AZ y CX se encuentran relacionadas con la temperatura del suelo, sin embargo, estos parámetros fisicoquímicos no presentan correlación con los microorganismos estudiados (figura 5).

4.2.1.2 Variables del carbono-nitrógeno y los microorganismos descomponedores de materia orgánica

En la figura 6, los valores obtenidos para los *eigenvalues* de los ejes 1 y 2 son 0,0056077 (67,95%) y 0,0022208 (26,91%) respectivamente. Esto indica que los patrones de distribución de las fincas, con relación a las abundancias de microorganismos descomponedores de materia orgánica, pueden explicarse en un 94,86% por las variables fisicoquímicas analizadas en la figura (Carbono total, nitrógeno total, nitrógeno mineral y %MO (porcentaje de materia orgánica)).

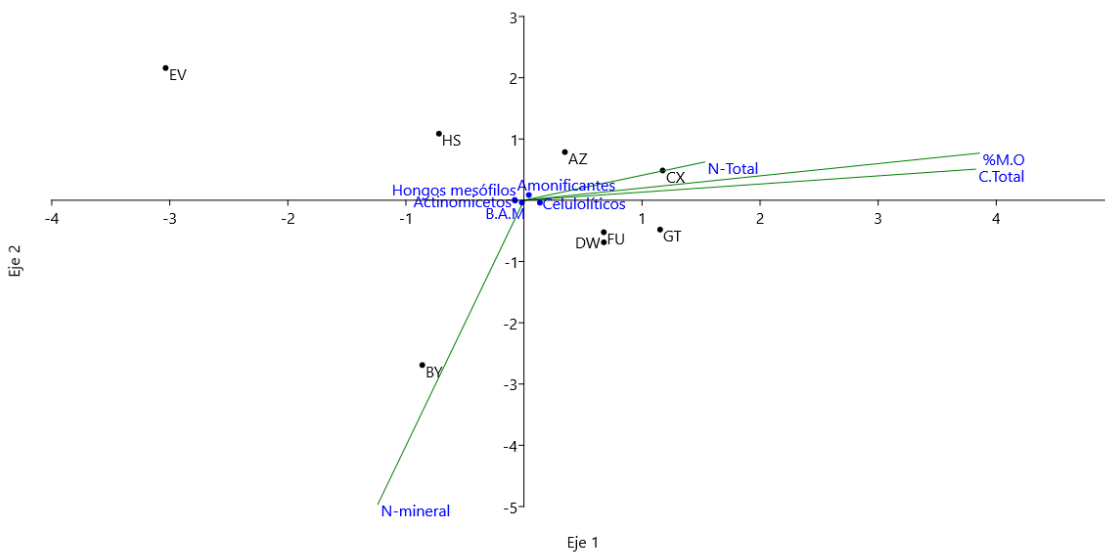


Figura 6. Análisis de correspondencia canónica de los indicadores fisicoquímicos del suelo (variables del C y N) y los microorganismos descomponedores de materia orgánica para su respectivo ordenamiento con las fincas evaluadas.

Las fincas AZ y CX se distribuyeron espacialmente en el mismo cuadrante, en el cual se encuentran las abundancias más altas de microorganismos amonificantes. La finca CX asociado a este grupo de microorganismos, presenta una tendencia de correlación positiva con el contenido de materia orgánica y carbono total; y una correlación negativa con el nitrógeno mineral (figura 6).

En la figura 6 se observa que las fincas DW, FU y GT se encuentran ubicadas en el mismo cuadrante donde se obtuvo las abundancias más altas de microorganismos celulolíticos. No se presenta ninguna asociación con las variables fisicoquímicas evaluadas.

La finca BY presenta alto contenido de nitrógeno mineral ordenándose en el mismo cuadrante las bacterias aerobias mesófilas.

Las fincas HS y EV se encuentran espacialmente distanciadas de los vectores con los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos. No se observa ninguna correlación.

4.2.1.3 Variables elementos del suelo vs microorganismos descomponedores de materia orgánica

En la figura 7, los valores obtenidos para los *eigenvalues* de los ejes 1 y 2 son 0,010716 (68,52%) y 0,0032401 (20,72%) respectivamente. Esto indica que los patrones de distribución de las fincas, con relación a las abundancias de microorganismos descomponedores de materia orgánica, pueden explicarse en un 89,24% por las variables fisicoquímicas analizadas en la figura (Elementos totales: P, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn y B).

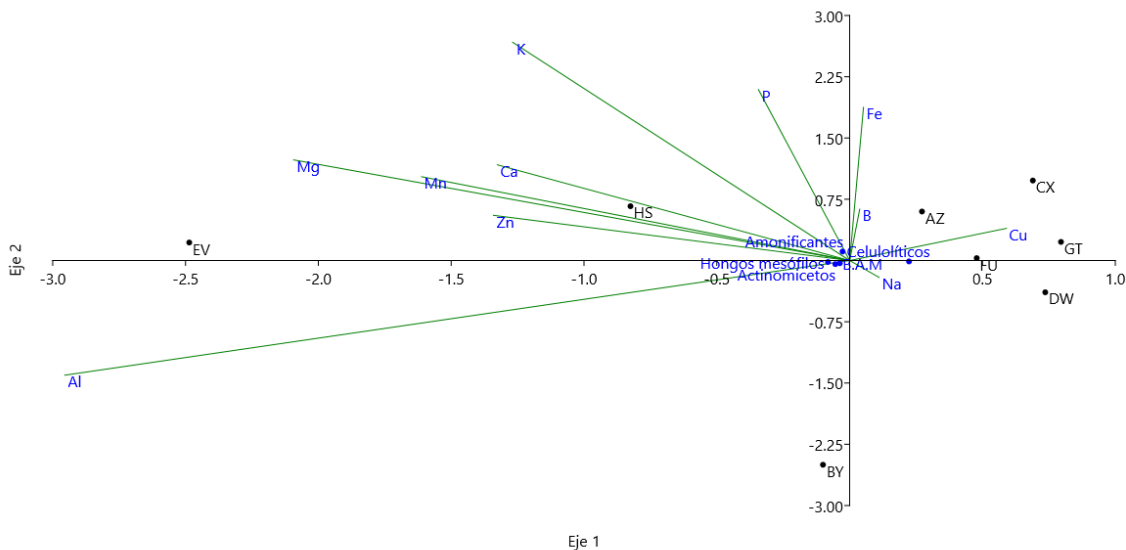


Figura 7. Análisis de correspondencia canónica de los indicadores fisicoquímicos del suelo (variables elementos químicos) y los microorganismos descomponedores de materia orgánica para su respectivo ordenamiento con las fincas evaluadas.

Los microorganismos amonificantes se encuentran en el mismo cuadrante donde se ubica la finca HS. Estos presentan una tendencia de correlación positiva con el contenido P, K, Ca, Mn, Mg y Zn; y una correlación negativa con el contenido de sodio (figura 7).

Las fincas AZ, CX, GT y FU se encuentran en el mismo cuadrante lo que las hace similares teniendo en cuenta las variables bióticas y abióticas analizadas. En estas fincas se obtuvo las mayores abundancias de microorganismos celulolíticos correlacionados negativamente con el contenido de aluminio (figura 7).

4.3 Análisis de correspondencia canónica (CCA) entre las prácticas de manejo agronómico y la abundancia de los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica.

En la figura 8, los valores obtenidos para los *eigenvalues* de los ejes 1 y 2 son 0,16805 (75,39%) y 0,020486 (9,19%) respectivamente. Esto indica que los patrones de distribución de las fincas, con relación a las abundancias de los invertebrados (Hymenoptera, Blattodea, Coleoptera, Mesostigmata y Diptera) y de los microorganismos descomponedores de materia orgánica, pueden explicarse en un 84,58% por las prácticas de manejo agronómico evaluadas en la figura (**Limpieza de platos:** Cantidad de Glifosato (L/ha/año); **Fertilización:** N (Kg elemento/año), P₂O₅ (Kg elemento/año), K₂O (Kg elemento/año), MgO (Kg elemento/año) y B (Kg elemento/año); **Aplicación de biomasa:** Disposición de residuos de raquis (Ton/ha); **Porcentaje de arvenses en la finca:** % cobertura de arvenses; **Uso de maquinaria pesada dentro de la finca:** Compactación del suelo (g/cm³).

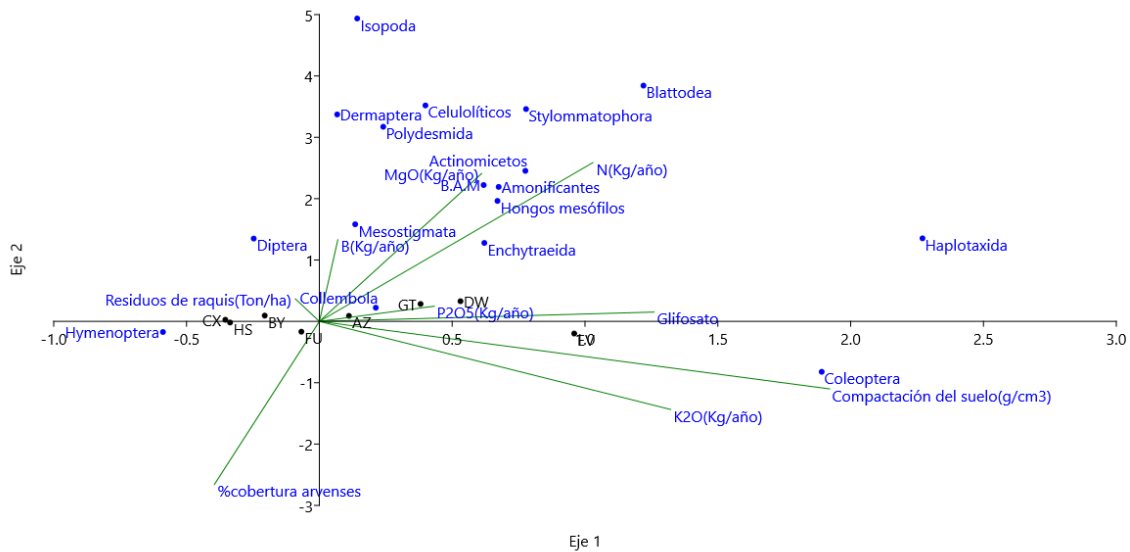


Figura 8. Análisis de correspondencia canónica entre las prácticas de manejo agronómico y los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomponedores de materia orgánica para su respectivo ordenamiento con las fincas evaluadas.

En la figura 8 se pudo observar que la finca BY obtuvo una correlación negativa con la adición de fertilizantes K_2O (Kg elemento/año).

La finca FU presenta una correlación positiva con el porcentaje de cobertura de arvenses y una correlación negativa con la adición de fertilizantes nitrogenados y MgO (Kg elemento/año) (figura 8).

En la figura 8 se observó que la finca EV presenta las mayores cantidades de glifosato (L/ha/año) y una mayor compactación del suelo (g/cm^3).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Abundancia de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica en los suelos estudiados

Entre los principales órdenes de invertebrados indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica que se encontraron en las fincas palmeras evaluadas fueron Hymenoptera, Coleoptera y Blattodea. Para el caso del orden Hymenoptera el 99% de los individuos colectados fueron hormigas y para el orden Blattodea el 88% fueron termitas y el 12% cucarachas.

La abundancia de los invertebrados descomponedores de materia orgánica del suelo puede indicar el estado de intervención y perturbación de los ambientes en los cuales habitan (47). Por ejemplo, en el estudio de Cabrera y colaboradores (48), destacan que los milpiés y las lombrices de tierra son los organismos que presentan una mayor abundancia en los bosques secundarios, por otro lado, Lavelle y colaboradores (49), reportaron que las termitas, las hormigas, las lombrices de tierra y los coleópteros presentaron las mayores abundancias en ambientes en los cuales se tienen diferentes usos del suelo (plantaciones de palma, caucho, sabanas seminaturales, cultivos de arroz, soya y maíz). Estos resultados coinciden con los encontrados en el presente estudio ya que las abundancias relativas más altas de invertebrados en los suelos de las ocho fincas palmeras estuvieron lideradas por las hormigas, las termitas y los coleópteros (Figura 3).

Wong y colaboradores (50), reportaron que en plantaciones de palma de aceite de Malasia, las termitas presentaron las mayores abundancias debido a su alto grado de esclerotización especialmente en su cabeza y aparato bucal, haciéndolas más resistentes a ambientes perturbados, seguidas por las hormigas y las lombrices de tierra. Sin embargo, en los resultados encontrados en el presente estudio se encontraron más individuos de hormigas que de termitas (Figura 3).

Se ha caracterizado a las hormigas como uno de los grupos de insectos sociales más diversos y exitosos, con cerca de 12.500 especies descritas (51), divididas en 290 géneros y 21 subfamilias vivientes (52). Su notable diversidad taxonómica y funcional ha hecho que las hormigas colonicen todos los ecosistemas terrestres del planeta, los cuales han alcanzado su mayor diversidad y biomasa en los trópicos (51, 53).

En este estudio la mayor abundancia relativa del orden Hymenoptera estuvo en la finca HS representando un 84,88% del total de individuos de invertebrados encontrados en esta

finca) (figura 3). En diferentes estudios la riqueza y abundancia de hormigas se relaciona positivamente con la complejidad vegetal, asociado a una mayor cantidad de microhábitats (54) y de recursos disponibles (55), entre ellos la hojarasca (56). Una mayor disponibilidad de residuos de raquis en la finca HS pudo haber favorecido la abundancia de hormigas presentando los valores más altos en esta práctica agronómica (99,80 Ton/ha). La hojarasca influye directamente sobre las poblaciones de artrópodos del suelo (57) mediante la regulación del microclima (58, 59, 60) y la disponibilidad de nutrientes (57, 61). Estudios realizados en países como Brasil, Colombia y México el número de individuos de hormigas ocurre de forma muy variable e independiente del uso de suelo, encontrando en los cultivos de palma de aceite la mayor abundancia, con una alta cantidad de material vegetal en el suelo (62, 63).

El segundo orden más abundante fue Coleoptera, dentro de este grupo de organismos los escarabajos coprófagos tienen un aporte tanto de ingenieros del ecosistema como de mesorreguladores. En el proceso de transporte de excrementos, incorporan nutrientes al suelo luego de la formación de las bolas o “masas nido” (64), recurso que será principalmente digerido por las larvas y adultos, los residuos generados en esta actividad quedarán disponibles para otros invertebrados y para los microorganismos (65, 66).

La mayor abundancia de coleópteros reportados, fue encontrada en la finca EV (1562 individuos y representando un 53,78% del total de individuos de invertebrados encontrados en esta finca) (figura 3). Se ha registrado que existe una mayor riqueza y abundancia de coleópteros con ambientes con alta humedad y bajas temperaturas (67, 68, 69). Este resultado se relaciona con lo encontrado en este estudio, ya que en esta finca se obtuvo un alto porcentaje de humedad del suelo (1,58%) y una temperatura del suelo de 25,83 °C. En el caso de los escarabajos coprófagos, estas condiciones favorecen la conservación de su recurso alimenticio, debido a que altas temperaturas y poca humedad provocan la desecación rápida del excremento, factor que inhabilita el uso de este recurso, además de que afecta la mortandad de las larvas (64, 70, 71).

En el estudio realizado por Trujillo y colaboradores (72), encontraron una asociación entre la textura del suelo y la abundancia de los coleópteros. En suelos arcillosos y poco arenosos, se encontró un alto número de coleópteros, tanto de larvas como de adultos, en el caso de las larvas, aumenta su sobrevivencia en suelos de textura más fina (73,74). En la finca EV se encontró mayor número de individuos que en las otras fincas, además la

textura del suelo de esta finca presentó un alto contenido de arcilla (34,45%) y bajo contenido de arena (33,4%) (Anexo 2).

Dentro del orden Blattodea, las termitas registraron una alta abundancia en la finca DW, este cultivo presentó los valores de porosidad total (% volumen) más bajos (DW= 46,67%) y altos valores de contenido de arcilla (%) (DW= 20,43%) comparados con el resto de fincas. Este resultado se relaciona con lo reportado en el estudio de Sanabria y colaboradores (75), en el cual señalan que la mayor ocurrencia de termitas se da en hábitats con bajos valores de porosidad del suelo y altos valores de contenido de arcilla. La finca CX reporta altos valores de porosidad total (50,53% volumen), bajos de contenido de arcilla (13,72%) y una abundancia de termitas de 45 individuos, presentándose la situación contraria. Varios estudios han comprobado la importancia de la composición de los suelos en arcilla, limo y arena para estos organismos (75, 76).

En la finca BY se registró la abundancia más baja del orden Mesostigmata (ácaros), con tan solo 21 individuos y representando un 0,87% del total de individuos de los órdenes encontrados en esta finca (figura 3). En el estudio de Bedano y colaboradores (77), Bardgett y Cook (78) y Coleman y colaboradores (79), mostraron que la disponibilidad de materia orgánica del suelo tuvo una influencia significativa en la densidad total de ácaros, convirtiéndose en un factor limitante en paisajes agrícolas con bajos recursos orgánicos. En su estudio encontraron que, en la parcela agrícola, donde casi no quedaba ningún residuo de plantas en el suelo para ser utilizado por los ácaros como recurso alimentario, la abundancia de ácaros era menor que en la parcela de bosque natural (78,79). Estos resultados fueron congruentes con los encontrados en el presente trabajo, ya que la finca BY presentó el valor más bajo de contenido de materia orgánica (1,18%) (Anexo 2).

Vale la pena destacar la representatividad del orden Stylommatophora (caracoles terrestres). La mayoría de los moluscos se registraron en la finca HS (18 individuos), donde el valor de la aplicación de residuos de raquis fue el más alto que en el resto de las fincas (99,80 Ton/ha). El material vegetal y los residuos generados durante las actividades de limpieza del cultivo no se recogen, creando microhábitats que favorecen a estos invertebrados. En el estudio de Wong y colaboradores (50), también se registraron muy pocos individuos en los cultivos de palma que evaluaron (5 individuos), siendo encontrados en los microhábitats formados por la acumulación de los residuos de las palmas y a la vegetación presente en los bosques secundarios. Este grupo de organismos sería

interesante estudiarlo en una segunda fase de investigación dada su estrecha relación con altos contenidos de materia orgánica y a coberturas de bosques.

Un manejo adecuado de las prácticas agronómicas posiblemente podría mejorar la conectividad de las coberturas naturales remanentes, albergando una mayor diversidad y heterogeneidad de las áreas de coberturas naturales al interior del cultivo, por ende, contribuyendo a la diversificación de las comunidades de invertebrados transformadores de hojarasca y mesorreguladores.

5.2 Abundancia de microorganismos descomponedores de materia orgánica

La materia orgánica del suelo contiene la mayor cantidad de carbono de la superficie de la Tierra, principalmente es aportado por compuestos como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina proveniente de las plantas superiores (30). La materia orgánica juega un papel fundamental en la fertilidad de los suelos ya que proporciona la fuente de nutrientes para las plantas, microorganismos y diversos animales que allí residen (80). Es por ello que los microorganismos descomponedores de la materia orgánica, pueden ser considerados como indicadores del estado y comportamiento del carbono en los suelos de los ecosistemas palmeros.

En este estudio, los suelos palmeros evaluados presentaron valores bajos a medios del porcentaje de materia orgánica (1,3% - 2,5%), en comparación con los suelos de bosques en Colombia (81). Las fuentes de materia orgánica que se tuvieron en cuenta en las fincas estudiadas, fueron únicamente las que procedían de la adición de material vegetal como resultado de las prácticas agronómicas en el cultivo (hojas y raquis de la palma). Existen diversos factores que pueden influir en las abundancias y actividad de las poblaciones de microorganismos descomponedores de materia orgánica, por ejemplo, la presencia y complejidad del recurso orgánico, las diferentes variables fisicoquímicas y las prácticas de manejo agronómico (82).

5.2.1 Relación entre las Bacterias Aerobias Mesófilas (B.A.M) y las variables fisicoquímicas

Hubo una alta abundancia de las B.A.M en todas las fincas evaluadas. Estos organismos se relacionan principalmente por degradar materia orgánica de baja complejidad (25). La finca FU obtuvo las mayores abundancias (valor logarítmico: 8,28 UFC/g suelo), mientras que la finca EV obtuvo la abundancia más baja (valor logarítmico: 6,98 UFC/g suelo).

En los resultados de la figura 6, se puede observar que el logaritmo de las B.A.M y el contenido de nitrógeno mineral se encuentran en el mismo cuadrante. En general, el desarrollo de las bacterias se ve más favorecido por la presencia de los compuestos nitrogenados, ya que son muy demandantes de este elemento para la síntesis de las proteínas (25). La finca EV presentó suelos con alto contenido de arcilla y muy compactos, pero una baja abundancia de bacterias aerobias mesófilas en comparación con el resto de las fincas (Densidad aparente= 1,29 g/cm³; Arcilla= 34,45%) (Anexo 2). Estos factores pueden estar afectando el metabolismo aerobio de las bacterias en los suelos de esta finca, al reducir el flujo y disponibilidad de oxígeno. Se ha documentado que el aumento en la densidad aparente está relacionado con una mayor compactación del suelo causada por ejercer presión sobre el sustrato, como por ejemplo, el pisoteo del ganado o el uso de maquinaria pesada como sucede en los cultivos de palma de aceite (83, 84). El impacto directo del peso del animal o la maquinaria, y el impacto generado por los diferentes tipos de equipos operados, afecta el grado de perturbación del suelo en términos de la compactación y alteración de los nichos donde la biota del suelo se establece (34).

5.2.2 Relación entre los microorganismos celulolíticos y las variables fisicoquímicas

Se encontraron abundancias altas de microorganismos celulolíticos, en las fincas GT, FU y DW con recuentos de 1×10^5 - 1×10^6 UFC/g, comparadas con las reportadas en un estudio donde se evaluaron diferentes microorganismos, dentro de ellos los celulolíticos, en suelos con tres cultivos de cobertura (*Brachiaria sp*, mijo y *Crotalaria sp*) (85) y en el bosque seco tropical, donde no se superaron los recuentos de 1×10^3 UFC/g (86).

La mayor abundancia de microorganismos celulolíticos se registró en la finca GT (valor logarítmico: 5,56 UFC/g suelo) (figura 4) al igual que el mayor contenido de carbono total (1,39%), de nitrógeno total (0,24%) y de materia orgánica (2,12%) (Anexo 2). Varios

estudios señalan que las altas abundancias de estos microorganismos están relacionadas principalmente con la mayor disponibilidad de celulosa y de nitrógeno, además la materia orgánica del suelo contiene macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano (87). Son de suma importancia en los sistemas como el cultivo de palma, donde se recomienda realizar adiciones de los residuos de material vegetal, como las hojas y el raquis, para favorecer su ciclaje y la entrada de los nutrientes provenientes de estos materiales al suelo (88). En contraste, en las fincas EV, HS y BY se encontraron los valores más bajos de microorganismos celulolíticos (valores logarítmicos: 1,77 UFC/g, 3,733 UFC/g, 4,47 UFC/g respectivamente) (figura 4). La calidad del sustrato es determinante para el crecimiento y desarrollo de las comunidades bacterianas, lo que coincide con los resultados del presente estudio ya que las cantidades más bajas de materia orgánica se reportaron en las fincas donde hubo bajas abundancias de microorganismos celulolíticos.

Macdonald y colaboradores (89), en su estudio, demostraron que la densidad aparente, la porosidad del suelo, la cantidad de carbono y nitrógeno total, son factores de gran importancia que influyen directamente en las comunidades bacterianas del suelo. García y colaboradores (90), reportaron que suelos conservados, presentaron bajos valores de densidad aparente y por el contrario alta porosidad total, además de las mayores abundancias de microorganismos, dentro de los cuales se encontraban los celulolíticos.

Estas condiciones favorecen el intercambio gaseoso al haber mayor entrada de oxígeno, además de permitir el fácil acceso de microorganismos aerobios a diferentes sustratos que se encuentran en el suelo, como por ejemplo la celulosa presente en los residuos aplicados por los agricultores. En contraste, los celulolíticos presentaron una correlación negativa con el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se ha reportado que estas dos variables se encuentran relacionadas, suelos con un alto contenido de arcilla, presentan mayor CIC. Este resultado puede estar asociado ya que suelos con alto contenido de arcilla, pueden dificultar la disponibilidad de oxígeno, pues normalmente se hace recuento de microorganismos celulolíticos aerobios, y de la materia orgánica ya que puede ser absorbida o incrustada sobre las partículas de arcilla (91,92).

5.2.3 Relación entre los hongos mesófilos y las variables fisicoquímicas

Las abundancias de hongos encontrados presentaron un rango medio ($1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$ UFC/g), reflejando suelos con poca vegetación natural (93). Este resultado puede estar relacionado con una disponibilidad limitada de los recursos necesarios para su óptimo crecimiento y multiplicación. A pesar de que en suelos ricos en carbono, los hongos son más abundantes, comparado con las bacterias que prefieren ambientes ricos en nitrógeno, en este estudio no se vio ninguna relación entre el contenido de carbono y las abundancias de hongos. Bajas abundancias de los hongos pueden afectar la velocidad de la descomposición de la materia orgánica ya que, la actividad metabólica de estos microorganismos es más lenta comparada con la de las bacterias (25).

En la figura 7, los hongos mesófilos presentaron una correlación con el aluminio (Al). Se pudo observar que una alta abundancia de hongos estuvo presente en la finca AZ donde se encontró las menores concentraciones de aluminio (Anexo 2). En suelos ácidos, el aluminio juega un papel importante en el complejo de intercambio del suelo constituyendo la acidez intercambiable del mismo. Además de ser un factor limitante para el crecimiento y la producción de los cultivos (94, 95) generando la disminución de la solubilidad del fósforo, también reduce la concentración de macronutrientes del suelo (96, 97). En este caso, al haber menores concentraciones de aluminio, este elemento pudo no haber interferido en el proceso de mineralización de elementos indispensables para la actividad fúngica como el nitrógeno, el azufre y el fosforo y haber favorecido su abundancia (98).

5.2.4 Relación entre los microorganismos amonificantes y las variables fisicoquímicas

La materia orgánica nitrogenada representa para los microorganismos amonificantes la principal fuente de recurso. En suelos con baja a media disponibilidad de materia orgánica nitrogenada se han encontrado abundancias de microorganismos amonificantes entre 1×10^4 y 1×10^7 UCF/g (93), siendo valores muy cercanos a los encontrados en este trabajo.

Estos microorganismos se relacionan positivamente con el mayor contenido de carbono total y de materia orgánica disponible. La adición de materia orgánica compleja en el cultivo de palma de aceite, como el raquis y las hojas podadas, podrían representar un beneficio de liberación constante de nutrientes y una reducción en la velocidad de lixiviación de los mismos (25).

Las fincas que presentaron las mayores abundancias de microorganismos amonificantes fueron AZ, CX, HS, FU y GT con valores entre 1×10^5 y 1×10^6 UFC/g (valores logarítmicos: 6,29 UFC/g; 6,08 UFC/g; 5,97 UFC/g; 5,78 UFC/g y 5,75 UFC/g respectivamente) (figura 4); las fincas EV y DW abundancias medias 1×10^5 UFC/g (valores logarítmicos: 5,19 UFC/g y 5,14 UFC/g respectivamente) y la finca BY la menor abundancia (valor logarítmico: 3,79 UFC/g).

Estos rangos de abundancia de microorganismos amonificantes se encuentran en sistemas de paisaje de pastizales con bajos contenidos de materia orgánica, al igual que en los datos de este estudio presentados en el anexo 2. Un bajo contenido de materia orgánica y suelos con pH ácidos característicos de las ocho fincas evaluadas, puede afectar la disponibilidad de fuentes nitrogenadas orgánicas, el proceso de amonificación y por lo tanto la abundancia de estos microorganismos, teniendo en cuenta que en los suelos de bosques secundarios o suelos con buenas prácticas de manejo agronómico pueden encontrarse abundancias superiores a 1×10^7 UFC/g (93, 99,100).

5.2.5 Relación entre los actinomicetos y las variables fisicoquímicas

Las fincas con las abundancias más altas fueron AZ, DW, BY, EV y GT (valores logarítmicos: 5,6247 UFC/g; 5,3759 UFC/g; 5,3633 UFC/g; 5,1804 UFC/g y 5,1505 UFC/g respectivamente) (figura 4), abundancias similares a las encontradas en los suelos de bosque natural (1×10^6 UFC/g) (93,101).

Los actinomicetos se correlacionaron negativamente con el hierro (Fe). Esto puede deberse a la posible toxicidad causada por el aluminio, interfiriendo en la absorción de magnesio, fósforo y de hierro, limitando la disponibilidad de estos elementos y afectando directamente la actividad microbiana además de influir en el crecimiento, el intercambio gaseoso (102), el desarrollo radical y la concentración de ácidos orgánicos en palma de aceite (97,103).

5.3 Relaciones entre las prácticas de manejo agronómico y las abundancias de los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica

El uso de pesticidas y herbicidas impacta negativamente todas las poblaciones biológicas asociadas al suelo. La aplicación de agroquímicos en general, junto a un incremento en la intensidad del uso de suelo, provoca notables alteraciones en el mismo como hábitat (34). Se estima que cerca del 30% de los costos totales anuales para el mantenimiento por hectárea de sistemas productivos palmeros convencionales, están asociados a prácticas de fertilización inorgánica (104). La fertilización en los cultivos de palma de aceite es una de las prácticas más costosas, también una de las más influyentes en la calidad de los suelos y dinámicas ecológicas que allí tienen lugar. En las fincas evaluadas se aplican fertilizantes de síntesis química como N (Kg elemento/año), P_2O_5 (Kg elemento/año), K_2O (Kg elemento/año), MgO (Kg elemento/año) y B (Kg elemento/año) como se muestran en el anexo 1.

En las ocho fincas palmeras evaluadas usan con frecuencia glifosato para la limpieza de platos (más de una aplicación anual) (ver valores en Anexo 1). Este compuesto es uno de los herbicidas no selectivos más utilizado en el mundo. Se ha encontrado una disminución de la diversidad biológica del suelo a raíz de los residuos que quedan en el suelo por la aplicación de glifosato, ya que cerca del 90% de sus desechos quedan inmersos en los primeros 15 cm del suelo (principalmente en la materia orgánica), estos residuos pueden quedar retenidos entre 8 y 60 días afectando tanto ecosistemas terrestres como acuáticos (105). Además, compete con algunos fertilizantes, principalmente fosfatados y con elementos como el Fe y Mn, viéndose posibles deficiencias nutricionales en los suelos (106). A pesar de que la aplicación de estos productos de síntesis química (fertilizantes y glifosato) tiene repercusiones sobre la biota edáfica no se pudo establecer relaciones con los indicadores biológicos estudiados.

En un estudio realizado en Indonesia (107) se evaluó el efecto de la adición de residuos vegetales de la palma, específicamente de los materiales generados por las actividades de extracción del aceite, comparado con los efectos de la fertilización química. Como resultado, obtuvieron que la adición de biomasa tuvo una notable mejora en las propiedades químicas del suelo, reflejado en una distribución más homogénea de la materia orgánica y un aumento en la disponibilidad de los nutrientes. Aunque se ha reportado que la adición de enmiendas orgánicas, usando los residuos del cultivo como las hojas, los estípites y el

raquis (racimos de fruta vacíos), es una práctica benéfica para la biodiversidad de los suelos (108,109), en los resultados de este trabajo (figura 8), no se logró identificar ninguna relación directa entre la práctica de adición de biomasa y la abundancia de los invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica de los suelos de las fincas evaluadas.

6. CONCLUSIONES

- Las hormigas fueron los invertebrados más abundantes en los suelos de las ocho fincas evaluadas.
- La edad de los cultivos de palma de aceite influyó en la abundancia de hormigas y termitas.
- La abundancia de cochinillas que se encontró en las fincas fue más baja a la esperada.
- Las bacterias aerobias mesófilas fueron el grupo de microorganismos descomponedores de materia orgánica más abundante en las fincas evaluadas. Su representatividad se vio favorecida por la presencia de compuestos nitrogenados.
- El porcentaje de materia orgánica en los suelos analizados fue un factor determinante en las abundancias encontradas de microorganismos descomponedores de materia orgánica.
- A pesar de que se ha documentado que la aplicación de agroquímicos tiene repercusiones en las poblaciones biológicas de suelo; en este estudio no se pudo establecer relaciones directas con los indicadores biológicos estudiados.

7. RECOMENDACIONES

A pesar de que en este estudio no se evaluó la composición presente en las áreas de cobertura natural colindantes con los cultivos de palma de aceite, es importante abordar el estudio de la diversidad en estos paisajes para futuras investigaciones, con el fin de conocer y establecer posibles beneficios que estos sistemas ofrecen a los cultivos de palma de aceite y con ello a toda la edafofauna que allí habita.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Rands, M. R., Adams, W.M., Bennum, L., Butchart, S.H., Clements, A., et al. (2010). Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science* 329:1298-1303.
2. Fedepalma. (2016). Balance económico del sector palmero colombiano en 2015. *Boletín Económico*.
3. Fedepalma. (2015). Anuario Estadístico 2015. *Anuario Estadístico*.
4. Lim, K.H., Leng, T. (1994). Oil Palm - An Environment Friendly Crop. *International Planters Conference. Proceedings. Kuala Lumpur. Malasia*, pp, 24-26, 555558.
5. Munévar, F. (1998). Problemática de los suelos cultivados con palma de aceite en Colombia. *Rev Palmas* 19 (especial): 218–228.
6. Arias, NA. (2007). Impacto del alza de los precios de fertilizantes en el sector agropecuario. 32–33.
7. Rodríguez B. M, Van Hoof B (2003). El desempeño ambiental del sector palmicultor Colombiano : una década de avances y un futuro promisorio. *Rev Palmas* 24(33): 69–87.
8. Gómez-Cuervo, P. L., Mosquera-Montoya, M., & Castilla, C. E. (2005). The oil palm: a sustainable agroindustry in Colombia. *Oleagineaux crops et lipides*, 2, 121-124.
9. Mosquera M, et al. (2016) Costos de producción de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia en 2014. *Palmas* 37(2):37–53.
10. Owen, E. (1992). Fertilización de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Rev Palmas* 13(2):39–64.
11. Guerrero R., R. (1991). Bases técnicas para la fertilización de cultivos. En: R. Guerrero R. (De.). *Fertilización de cultivos en clima cálido. Monómeros Colombo-Venezolanos S.A...* Barranquilla 45-63.
12. T, Galindo. (2010). Palmas, Microbiología del suelo cultivado con palma. *Palmas* 31(2):49–60
13. Swift, MJ., Bignell, DE., Moreira, FMS., Huising, EJ. (2006). El inventario de la biodiversidad biológica del suelo : conceptos y guía general. *Man Biol suelos Trop*: 29–52.
14. Bignell, D. (2006). Termites as soil engineers and soil processors. En: H König & A Varma (eds). *Intestinal Microorganisms of Termites and Other Invertebrates*. pp. 183- 220. *Soil Biology Series 6*. Springer.

15. Hättenschwiler, S., Tiunov, A.V., Scheu, S., (2005). Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 36:191-218.
16. Diaz, Porres, M. (2009). Producción-descomposición de hojarasca y macroinvertebrados fragmentadores en cuatro agroecosistemas de la cuenca del río la Vieja. *J Chem Inf Model* (9):118
17. Moreira, F., Huising E. J. y Bignell D. E. 2012. Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo. Instituto Nacional de Ecología. México. pp 337
18. Barrios, E., (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64 (2): 269-285.
19. Cárdenas, R. E., Donoso, D. A., Argoti, A., & Dangles, O. (2017). Functional consequences of realistic extinction scenarios in Amazonian soil food webs. *Ecosphere*, 8(2), 1–32.
20. Bignell, D. E. (2009). Towards a universal sampling protocol for soil biotas in the humid tropics. *Pesquisa agropecuaria brasileira*. 44(8): 825-834.
21. Swift M. y Bignell D. (2001). Standard Methods for Assessment of Soil Biodiversity and Land Use Practice. ASB Lecture Note 6B. World Agroforestry Centre - ICRAF, SEA Regional Office, Bogor. Indonesia.
22. Lavelle, P., Bignell, D. E., Lepage, M., Wolters, W., Roger, P., Ineson, P., Dhillon. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(May), 156–193.
23. Kurzatkowski, D., Martius, C., Höfer, H., Garcia, M., Förster, B., Beck, L., Vlek, P., (2004). Litter decomposition, microbial biomass and activity of soil organisms in three agroforestry sites in central Amazonia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 69: 257-267
24. Bignell, D., Giller, K.E., Lavelle, P., Swift, M.J., Barrios, E., Moreira, F., van Noordwijk, M., Barois, I., Karanja, N., Huising, J., (2005). Soil biodiversity in rapidly changing tropical landscapes: scaling down and scaling up. In: Bardgett, R., Usher, M.B., Hopkins, D.W. (Eds.), *Biological Diversity and Function in Soils*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 295–318

25. Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., Spain, A., Toutain, F., Schaefer, R. (1993). A Hierarchical Model for Decomposition in Terrestrial Ecosystems - Application to Soils of the Humid Tropics. *Biotropica*, 25(2), 130–150.
26. Dangerfield, A.J.M., Milner, A.E., Dangerfield, J.M. (2013). Millipede Fecal Pellet Production in Selected Natural and Managed Habitats of Southern Africa: Implications for Litter Dynamics in Selected Natural and Millipede Fecal Pellet Production of Southern Africa : Implications for Managed Habitats Lifter. 28(1):113–120.
27. Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amézaga, I., & Garbisu, C. (2003). Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. *Reviews on Environmental Health*, 18(1), 65–73.
28. Yesid, J., Guerrero, M., & Fonseca, N. P. (2006). La importancia del uso de los indicadores biológicos en los estudios de impacto ambiental, 134 pp.
29. Hunt, H. W., Coleman, D. C., Ingham, E. R., Ingham, R. E., Elliott, E. T., Moore, J. C., Morley, C. R. (1987). The detrital food web in a short grass prairie. *Biology and Fertility of Soils*, (3), 57–68.
30. Wild, A. (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Versión Española de P. Urbano Terrón y C. Rojo Fernández. Mundi-Prensa. Madrid. España, 1045 p.
31. Swift, M.J., (1997). Soil biodiversity, agricultural intensification and agroecosystem function. *Special Issue Applied Soil Ecology* 6 (1), 1–108.
32. Wall, D. H. (2012). *Soil Ecology and Ecosystem Services*. (R. D. Bardgett, V. Behan-Pelletier, J. E. Herrick, T. H. n Jones, K. Ritz, J. Six, W. H. van der Putten, Eds.) (First). Oxford: Oxford University Press
33. De Boer, W., Folman, L. B., Summerbell, R. C., & Boddy, L. (2005). Living in a fungal world: Impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews*, 29(4), 795–811.
34. Moreira, F. M. S., Huising, E. J., & Bignell, D. E. (2012). *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo*. (F. M. S. Moreira, E. J. Huising, & D. E. Bignell, Eds.) (First). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) Instituto Nacional de Ecología (INE).
35. Phosri, C.; Rodríguez, A.; Sanders, I.; Jeffries, P.; Ramamoorthy, V.; Viswanathan, R.; Raguchander, T.; Prakasam, V.; Samiyappan, R. (2001). Induction of systemic

resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases. *Crop Protection* 20:1-11.

36. Audenaert, K.; Pattery, T.; Cornelis, T.; Höfte, M. (2002). Induction of Systemic Resistance to *Botrytis cinerea* in Tomato by *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2: Role of Salicylic Acid, Pyochelin, and Pyocyanin. *MPMI* 15(11): 1147–1156.
37. Jetiyanon, K.; Kloepper, J. (2002). Mixtures of plant growth-promoting rhizobacteria for induction of systemic resistance against multiple plant diseases. *Biological Control* 24: 285–291.
38. Cárdenas, R.E., Donoso, D.A., Argoti, A., Dangles, O. (2017). Functional consequences of realistic extinction scenarios in Amazonian soil food webs. *Ecosphere* 8(2). doi:10.1002/ecs2.1692.
39. Chew, P, S. (2007). Soil resources and plantation agricultura in Malaysia. In: *Proceedings of Soils 2007: Peat and other Soil Factors in Crop Production* (Hamdan et al, eds.), Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, pp 1-41.
40. Brown, S., Anderson, J.M., Woomer, P.L., Swift, M.J., Barrios, E., (1994). Soil biological processes in tropical agroecosystems. In: Woomer, P.L., Swift, M.J. (Eds.), *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 15–46.
41. Wall, D.H., Virginia, R.A., (2000). The world beneath our feet: Soil Biodiversity and Ecosystem Functioning. In: Raven, P.H., Williams, T. (Eds.), *Nature and Human Society: The quest for a Sustainable World*. Committee for the Second Forum on Biodiversity, National Academy of Sciences and National Research Council, Washington D.C., pp.225–241.
42. Brussaard, L., Kuiper, T.W., Didden, W.A.M., de Goede, R.G.M., Bloem, J., (2004). Biological soil quality from biomass to biodiversity - importance and resilience to management stress and disturbance. In: Schonning, P., Emholt, S., Christensen, B.T. (Eds.), *Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture*. CAB International, Wallingford, pp. 139–161.
43. Johnson, N.F. Triplehorn, C.A. (2004). *Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects* (Cengage Learning, Australia). 7 edition.
44. Ribera, I., Melic, A., Torralba, A. (2015). *Introducción y guía visual de los artrópodos*. 2:pp.1–30.

45. Stehr, F. (2005). *Immature insects* (Kendall Hunt Publishing, Dubuque, Iowa). 1 edition.
46. Hammer O. (2019) Reference manual PAleontological STatistics Version 3.25. Natural History Museum. University of Oslo.
47. Bueno, J y P. Rojas. (1999). Fauna de milpiés (Arthropoda: Diplopoda) edáficos de una selva de los Tuxtlas, Ver. México. *Acta Zoológica Mexicana*. 76: 59-83.
48. Cabrera, G., Robaina, N., & de León, D. P. (2011). Riqueza y abundancia de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos Y Forrajes*, 34(3), 313–330.
49. Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., Fonte, S. J. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco river basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 185, 106–117.
50. Wong, M. K., Tsukamoto, J., Yusuyin, Y., Tanaka, S., Iwasaki, K., & Tan, N. P. (2016). Comparison of soil macro-invertebrate communities in Malaysian oil palm plantations with secondary forest from the viewpoint of litter decomposition. *Forest Ecology and Management*, 381, 63–73.
51. Bolton, B. (2007). Taxonomy of the Dolichoderine ant genus *Technomyrmex* Mayr (Hymenoptera: Formicidae) based on the worker caste. *Contributions of the American Entomological Institute* 35 (1):1-150.
52. Ward, P. S. 2007. Phylogeny, classification, and species-level taxonomy of ants (Hymenoptera: Formicidae). *Zootaxa* 1668: pp.549-563.
53. Fernández, F. (Ed.). 2003. *Introducción a las hormigas de la región neotropical*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D. C. Colombia. Pp.398.
54. Rivas C. R. & J. H. Schoederer. 2007. Ant communities, environmental characteristics and their implications for conservation in the Brazil Pantanal. *Biodiversity and Conservation*, 16: 1511-1520.
55. Blüthgen, N., M. Verhaagh, W. Goitía, F. Jaffé, W. Morawetz & W. Barthlott. 2000. How plants shape the ant community in the Amazonian rainforest canopy: the key role of extrafloral nectaires and homopteran honeydew. *Oecologia*, 125: 229-240.
56. Kaspari, M., M. N. Garcia, K. E. Harms, M. Santana, S. J. Wrigth & J. B. Yavitt. 2008. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. *Ecology Letters*, 11: 35-43.

57. Sayer, E. J. 2006. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 81: 1-31.
58. Bradford, M. A., G. M. Tordof, T. Eggers, T. H. Jones & J. E. Newington. 2002. Microbiota, fauna, and mesh size interaction in litter decomposition. *Oikos*, 99: 317-323.
59. González, G. & T. R. Seatedt. 2001. Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forest. *Ecology*, 82: 955-964.
60. Vasconcelos, H. L. & W. F. Laurance. 2005. Influence of habitat, litter type, and soil invertebrates on leaf-litter decomposition in a fragmented Amazonian landscape. *Oecología*, 144: 456-462.
61. Evetts, E. A. 2008. Above-and below-ground litter manipulation: effect on retention and release of DOC, DON and DIN in the sikfokut forest, Hungary. Thesis, Texas A&M University
62. Brown, G., C. Fragoso, I. Barois, P. Rojas, J.C. Patrón, J. Bueno, A.G. Moreno, P. Lavelle, V. Ordaz & C. Rodríguez. 2001. Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana*, 1: 79-110.
63. Barros, E., B. Pashanasi, R. Constantino & P. Lavelle. 2002. Effects of land use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*, 35: 338-347
64. Halffter, G., & Edmonds, W. D. (1982). The nesting behavior of dung beetles (Scarabaeinae). An ecological and evolutive approach. México: Instituto de Ecología.
65. Bang, H. S., Lee, J. H., Kwon, O. S., Young, E. N., Yong, S. J., & Won, H. K. (2005). Effects of paracoprid dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) on the growth of pasture herbage and on the underlying soil. *Applied Soil Ecology*, 29(2), 165–171.
66. Yamada, D., Imura, O., Shi, K., & Shibuya, T. (2007). Effect of tunneler dung beetles on cattle dung decomposition, soil nutrients and herbage growth. *Japanese Society of Grassland Science*, 53(2), 121– 129.
67. Percino-Figueroa, S. M. y Morón, M. A. (2013). Región de Zacatlán. En M. A. Morón, A. Aragón y H. Carrillo-Ruiz (Eds.), *Fauna de escarabajos del Estado de Puebla* (pp. 189–206). Coatepec: Publicado por Morón MA.

68. Pérez-Torres, B. C., Aragón, A. y Tapia, A. M. (2013). Región del valle de Puebla. En M. A. Morón, A. Aragón y H. Carrillo-Ruiz (Eds.), Fauna de escarabajos del estado de Puebla (pp. 55–82). Coatepec: Publicado por Morón MA
69. Yanes-Gómez, G. y Morón, M. A. (2010). Fauna de coleópteros Scarabaeoidea de Santo Domingo Huehuetlán, Puebla, México. Su potencial como indicadores ecológicos. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, 26, 123–145
70. Escobar, F. (1997). Estudio de la comunidad de coleópteros coprófagos (Scarabaeidae) en un remanente de bosque seco al norte de Tolima, Colombia. *Caldasia*, 19, 419–430.
71. Fincher, G. T. (1973). Nidification and reproduction of *Phanaeus* spp. in three textural classes of soil (Coleoptera: Scarabaeidae). *Coleopterist Bulletin*, 27, 33–37
72. Trujillo-miranda AL, Carrillo-ruiz H, Rivas-arancibia SP, Andrés-Hernández AR (2016) *Revista Mexicana de Biodiversidad. Enfermería Univ.* doi:10.1016/j.rmb.2015.08.008.
73. Regniere, J., Rabb, R. L. y Stinner, R. E. (1981). *Popillia japonica*: effect of soil moisture and texture on survival and development of eggs and first instar grubs. *Environmental Entomology*, 10, 654–660.
74. Escobar, F. (2000). Diversidad de coleópteros coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) en un mosaico de hábitats en la Reserva Natural Nukak, Guaviare, Colombia. *Acta Zoológica Mexicana*, 79, 103–121.
75. Sanabria, C., Dubs, F., Lavelle, P., Fonte, S. J., & Barot, S. (2016). Influence of regions, land uses and soil properties on termite and ant communities in agricultural landscapes of the Colombian Llanos. *European Journal of Soil Biology*, 74(April), 81–92.
76. Luke, S. H., Fayle, T. M., Eggleton, P., Turner, E. C., & Davies, R. G. (2014). Functional structure of ant and termite assemblages in old growth forest, logged forest and oil palm plantation in Malaysian Borneo. *Biodiversity and Conservation*, 23(11), 2817–2832.
77. Bedano, C., Cantu, MP., Edmundo, M. (2006). Influence of three different land management practices on soil mite (Arachnida: Acari) densities in relation to a natural soil. 32:293–304.
78. Bardgett, R.D., Cook, R., (1998). Functional aspects of soil animal diversity in agricultural grasslands. *Appl. Soil Ecol.* 10, 263–276.

79. Coleman, D., Fu, S., Hendrix, P., Crossley Jr., D., (2002). Soil foodwebs in agroecosystems: impacts of herbivory and tillage management. *Eur. J. Soil Biol.* 38, 21–28.
80. Nielsen, M. N., & Winding, A. (2002). Microorganisms as indicators of soil health. NERI technical report. Denmark.
81. Malagón Castro, D. (2003). Ensayo Sobre Tipología De Suelos Colombianos - Énfasis En Génesis Y Aspectos Ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(104), 319–341.
82. Vásquez Polo, J. R., Macías Vázquez, F., & Menjivar Flores, J. C. (2012). Soil organic carbon forms with different uses in the department of Magdalena (Colombia). *Acta Agronómica*, 60(4), 361–369.
83. Arshad, M.A., Lowery, B., Grossman, B., 1996. Physical tests for monitoring soil quality. in: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Spec. Publ. 49. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA, pp. 123–141
84. Murphy, C.A., Foster, B.L., Ramspott, M.E., Price, K.P., 2004. Grass-land management effects on soil bulk density. *Trans. Kans. Acad. Sci.* 107, 45–54.
85. Rodrigues, G. I., Lemes, E. M., Mendes de Paula, A. D., Lima, D. T. de, & Torres, J. L. R. (2016). Quantification of soil microorganisms under several cover crops managed with no-tillage system for fifteen years in the Brazilian Cerrado. *Australian Journal of Crop Science*, 10(11), 1511–1515.
86. Montaña, N., Sandoval-Pérez, A., Nava-Mendoza, M., Sánchez-Yañez, J., & García-Oliva, F. (2013). Variación espacial y estacional de grupos funcionales de bacterias cultivables del suelo de un bosque tropical seco en México. *Revista de Biología Tropical*, 61(1), 439–453.
87. Sylvia. D.P. Hartel. J. Fuhrmann. & Zuberer. D. (2005). Principles and applications of soil microbiology. Segunda Edición. New Jersey. Prentice Hall-Inc. pp.640.
88. Galindo Castañeda, T., & Romero, H. (2010). Microbiología del suelo cultivado con palma de aceite en Colombia: Elemento clave para la competitividad y sostenibilidad del cultivo. *Palmas*, 31(2), 49–59.
89. Macdonald, C., Thomas, N., Robinson, L., Tate, K., Ross D., Dando, J., Singh B. (2009). Physiological, biochemical and molecular responses of the soil microbial community after afforestation of pastures with *Pinus radiata*. *Soil Biology and Biochemistry*. 41: 1642-1651.

90. García, D., Cárdenas, J. & Silva, A. (2018). Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades fisicoquímicas y microbiológicas en un inceptisol. *Rev.Cienc. Agr.* 35(1): 16-25.
91. Tisdall, J. M. and Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal Soil Science.* 33: pp.141-163.
92. Golchin, A.; Oades, J. M.; Skjemstad, J. O. and Clarke, P. (1994). Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal Soil Research.* 32: pp.1043-1068 .
93. Instituto Geográfico Agustín Codazzi Departamento Agrológico, I. (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras : Departamento de Meta. (L. A. Burgos Revelo, H. Diaz Avila, & E. Á. Ávila Pedraza, Eds.). Bogotá: IGAC.
94. Tang, Y., Garvin, D., Sorrells, M., & Carver, B. (2002). Physiological genetics of aluminum tolerance in the wheat cultivar Atlas 66. *Crop Science*, 42(5), 1541-1555.
95. Álvarez I., Sam, O., & Reynaldo, I. (2005). Cambios inducidos por el aluminio en la morfogénesis radicular del arroz. *Cultivos Tropicales*, 26(1), 21-25.
96. Liao, H., Wan, H., Shaff, J., Wang, X., Yan, X., & Kochian, L. (2006). Phosphorus and Aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance. Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system. *Plant Physiology*, 141, 674-684
97. Cristancho, J., Hanafi, M., Syed, R., & Rafii, M. (2010). Variations in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) progeny response to high aluminum concentrations in solution culture. *Plant Biology*, 13(2): 33-42.
98. Rout, G., Samantara, S., & Das, P. (2001). Aluminum toxicity in plants: A review. *Agronomie*, 21(1), 3-21.
99. Cañón-Cortázar, R., Avellaneda-Torres, L., & Torres-Rojas, E. (2012). Microorganismos asociados al ciclo del nitrógeno en suelos bajo tres sistemas de uso: cultivo de papa, ganadería y páramo, en el Parque Los Nevados, Colombia Associated. *Acta Agronómica*, 61(4), 1–6
100. Calvo-Vélez, P.; Meneses, L. R.; y Zúñiga-Dávila, D. 2008. Estudio de las poblaciones microbianas de la rizósfera del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en zonas altoandinas. *Ecol. Apl.* 7(1 - 2):141 - 148.
101. Chavan, D. V, Mulaje, S. S., & Mohalkar, R. Y. (2013). A Review on actinomycetes and their biotechnological applications. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 4(5), 1730–1742.

102. Moreno, A., Camperos, J., Rivera, Y., & Romero, H. M. (2014). Cambios fisiológicos y bioquímicos en genotipos de palma de aceite como respuesta a dos saturaciones de aluminio en el suelo. *Palmas*, 35(2), 11-21.
103. Rivera, Y., Moreno, L., & Romero, H. M. (2014). Oil palm OxG interspecific hybrids (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*) response to aluminum toxicity. *Australian Journal of Crop Science*, 8(11), 1526-1533.
104. Mosquera, M., Valderrama, M., Ruíz, E., López, D., Castro, L., Fontanilla, C., & González, M. A. (2017). Costos de producción para el fruto de palma de aceite y el aceite de palma en 2015: estimación en un grupo de productores colombianos. *Palmas*, 38(2), 10–26.
105. Sc M, Agr I, Civeira, G. (2012). Recopilación sobre los efectos del Glifosato en agroecosistemas. Instituto de Suelos, INTA Castelar. Buenos Aires, Argentina. Informe 19 (1-13).
106. Bott, S., Tesfamariam, T., Kania, A., Eman, B., Aslan, N., Römheld, V., & Neumann, G. (2011). Phytotoxicity of glyphosate soil residues re-mobilised by phosphate fertilisation. *Plant and Soil*, 342(1–2), 249–263.
107. Frouz, J., Elhottová, D., Pižl, V., Tajovský, K., Šourková, M., Pícek, T., & Malý, S. (2007). The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: A laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 37(1–2), 72–80.
108. Carron, M. P. A., Pierrat, M. A., Snoeck, D. A., Villenave, C. C., & Ribeyre, F. D. (2015). Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. *Soil Research*, 53, 205– 215.
109. Carron, M. P., Auriac, Q., Snoeck, D., Villenave, C., Blanchart, E., Ribeyre, F., Caliman, J. P. (2015). Spatial heterogeneity of soil quality around mature oil palms receiving mineral fertilization. *European Journal of Soil Biology*, 66, 24–31.