

**MACROFAUNA COMO MEDIDA DE IMPACTO ASOCIADO CON
CUATRO SISTEMAS DE CULTIVO DE PLÁTANO, EJE CAFETERO
COLOMBIANO**

DIANA MARIA ROJAS MUNERA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA
PEREIRA 2019**

**MACROFAUNA COMO MEDIDA DE IMPACTO ASOCIADO CON
CUATRO SISTEMAS DE CULTIVO DE PLÁTANO, EJE CAFETERO
COLOMBIANO**

DIANA MARIA ROJAS MUNERA

**Tesis de Grado presentada como requisito para optar al título de
Magíster en Ecotecnología**

Director

ALEXANDER FEIJOO MARTINEZ PhD

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA
PEREIRA 2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA JURADO 1

FIRMA JURADO 2

FIRMA DIRECTOR

Pereira, junio 2019

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a la información suministrada por el grupo de Investigación Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos (GATA) de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira en el marco del macroproyecto “Servicios ecosistémicos generados por diversos arreglos del cultivo de plátano en el Eje Cafetero Colombiano” liderado por el Dr. Alexander Feijoo. Reconocimiento por el apoyo estadístico brindado por la Dra. Norma Patricia Durán y gratitud a los campesinos que participaron en el estudio y sus familias en el departamento del Quindío.

Especiales agradecimientos a los profesores y compañeros de la Maestría, principalmente al Dr. A. Feijoo ya que sin su paciente orientación este trabajo no hubiera sido posible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	13
2 CAPÍTULO ÚNICO. MACROFAUNA COMO MEDIDA DE IMPACTO ASOCIADO CON CUATRO SISTEMAS DE CULTIVO DE PLÁTANO, EJE CAFETERO COLOMBIANO.....	16
2.1 INTRODUCCIÓN.....	16
2.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE ESTUDIO	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
Hipótesis del Investigador.....	17
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1 Localización del área de trabajo y diseño del muestreo	17
3.2 Caracterización fauna edáfica por arreglo	19
3.3 Esquematización de la interacción de fauna edáfica y sistemas de cultivo	21
3.4 Análisis de datos	23
4. RESULTADOS.....	23
4.1 Riqueza, abundancia y biomasa de macrofauna terrestres por finca y por sistema de cultivo.....	23
4.2 Cambios en la macrofauna edáfica relacionados con los sistemas de cultivo y la altura.....	25
4.3 Población de lombrices de tierra en las fincas muestreadas	29
4.4 Análisis de macrofauna como indicadores de impacto basado en el esquema DPSIR	32
5. DISCUSIÓN	36

<i>5.1 Relación entre macrofauna del suelo y sistemas de cultivo de plátano</i>	36
<i>5.2 Efecto de la altura de los sistemas de cultivo en los macrofauna del suelo</i>	36
<i>5.3 Población de lombrices de tierra</i>	38
<i>5.4 DPSIR como herramienta conceptual</i>	39
6. CONCLUSIONES	42
7. DISCUSIÓN GENERAL.....	42
REFERENCIAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de las fincas estudiadas..	19
Figura 1 Muestreo de macrofauna en sistemas de cultivo de plátano, Quindío.....	21
Figura 3. Representación básica DPSIR donde las respuestas pueden estar dirigidas a las diferentes fases del esquema.....	22
Figura 4. Número promedio de Macrofauna/m ² en fincas de cultivos de plátano en los tres municipios. Barra de error estándar.....	24
Figura 5. Biomasa de macrofauna en fincas del departamento del Quindío. Barra de error estándar.....	25
Figura 6. Abundancia y biomasa promedio de grupos taxonómicos por sistema de cultivo en el departamento de Quindío.....	26
Figura 7. Abundancia de Oligoquetos por sistema de cultivo según la altura de la finca.	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Fincas seleccionadas para el muestreo de macrofauna en el departamento de Quindío.	20
Tabla 2. Biomasa promedio (g.p.f.m ⁻²) de la macrofauna en sistemas de cultivo de plátano en el departamento de Quindío. Error estándar entre paréntesis.	26
Tabla 3. Densidad y biomasa de macrofauna en diferentes sistemas de cultivo y distinta altura.....	28
Tabla 4. Especies de lombriz de tierra identificadas por sistemas de cultivo, categoría ecológica y frecuencia de ocurrencia en cultivos de plátano en el Eje Cafetero.....	30
Tabla 5. Número de individuos (ind. m ⁻²) de cada especie en cada uno de los muestreos para las 33 fincas.....	31
Tabla 6. Esquema DPSIR	33

GLOSARIO

Arreglo: Disposición del cultivo en el tiempo, espacio; que origina una estructura vertical de la vegetación compartida, arquitectura, especies y función al interior del sistema, presencia de sombra; con variaciones en la cantidad y la distribución espacial dentro de los lotes.

Conductor – Presión – Estado – Impacto - Respuesta (=en inglés Driver– Pressure–State– Impact–Response, DPSIR): Marco de referencia para ordenar y agrupar, de manera lógica, los factores que actúan sobre determinado aspecto ambiental de interés, los efectos producidos por las acciones humanas, el impacto que esto genera, así como las intervenciones planteadas para enfrentar los problemas generados. Permite construir un panorama general del estado situacional del tema en estudio y revelar sus tendencias, las dimensiones que generan su cambio y las perspectivas para proteger y mejorar su condición.

Macrofauna: Es una delimitación artificial de grupos de animales invertebrados que incluye individuos visibles, de diámetro superior a dos milímetros o longitud mayor a 10 mm usados comúnmente como indicadores de calidad de suelo y agua por sus características individuales y comunitarias.

Sistema de cultivo AA: Asociado con Aguacate y otros frutales, plátano asociado con aguacate y otros frutales, con manejo agronómico permanente, seis años de siembra, sin trazos y resiembras frecuentes.

Sistema de cultivo AC: Asociado con Café, plátano asociado con café, en barreras con distancias definidas y manejo agronómico significativo.

Sistema de cultivo MONO: Monocultivo, plátano monocultivo tecnificado, con manejo agronómico, trazo definido y renovación cada cinco o seis años.

Sistema de cultivo TA: Tradicional Arbóreo, plátano tradicional asociado con café tradicional y árboles dispersos, sin distancias ni trazos definidos, ni fertilización y pocas labores agronómicas.

RESUMEN

Se evaluó la composición de la macrofauna presente en cuatro diferentes sistemas de cultivo de plátano: a) Asociado con Árboles, b) Asociado a Café, c) Monocultivo y d) Tradicional, en los municipios de Armenia, Circasia y Calarcá, caracterizándolos a partir de la medición de la riqueza de especies, abundancia y biomasa; se analizó su comportamiento frente a variables como altitud y sistema de cultivo y se identificaron las poblaciones de lombrices de tierra en 33 fincas del departamento del Quindío, Eje Cafetero Colombiano; lo anterior se esquematizó bajo el modelo DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) con el fin de evaluar el impacto que ejercen las prácticas de manejo en los distintos sistemas de cultivo sobre la fauna edáfica y facilitar el diseño de respuestas a los principales efectos.

Se identificaron 14 órdenes, tres clases y ocho familias de macrofauna; los resultados indican que los sistemas de cultivo de plátano en el departamento de Quindío influyen en la fauna edáfica con diferencias significativas en la composición de las comunidades según las prácticas agrícolas aumentando, por ejemplo, la abundancia de macrofauna a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar en que se encuentre el cultivo.

Fueron halladas 15 especies de lombrices de tierra, de las cuales siete son exóticas y ocho son nativas incluyendo dos especies nuevas. El mayor número de especies (12) corresponde a las halladas en el sistema de cultivo de plátano asociado a Café (AC), seguido del sistema tradicional (TA) con 10 especies, plátano asociado con Árboles (AA) con nueve y monocultivo (MONO) con ocho especies.

La especie más abundante fue *P. corethrurus*, cuanto mayor es la intervención en el sistema de cultivo, mayor prevalencia del oligoqueto, encontrándose en mayor medida en el sistema AA y en menor porcentaje en TA, lo que la convierte en un indicador del impacto de los sistemas de cultivo sobre las especies nativas.

Los resultados, esquematizados con el modelo Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR), visibilizan los cambios en las comunidades de macrofauna según el sistema de cultivo, permite ampliar el conocimiento acerca de las presiones que ejercen las prácticas agrícolas, y sirve de base para la búsqueda de alternativas en la toma de decisiones a problemas reales.

Palabras clave: Andes, Musaceae, bioindicadores, macrofauna, prácticas agrícolas, DPSIR.

ABSTRACT

The composition of the macrofauna present in four different banana cultivation systems was evaluated: a) Associated with Trees, b) Associated with Coffee, c) Monoculture and e) Traditional, in the municipalities of Armenia, Circasia and Calarcá, characterizing them from the measurement of taxonomic diversity, abundance and biomass; their behavior was analyzed against variables such as altitude and cropping system and earthworm populations were identified in 33 farms of the department of Quindío, Colombian Coffee Region; this was outlined under the DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) model in order to assess the impact of management practices in different farming systems on the edaphic fauna and facilitate the design of response to main effects.

We identified 14 orders, three classes and eight families of macroinvertebrates; the results indicate that plantain cultivation systems, in the department of Quindío, influence the edaphic fauna with significant differences in the composition of the communities according to agricultural practices and the height above sea level in which the crop is located.

Fifteen earthworm species were found, of which seven are exotic and eight are native including two new species (Feijoo, Zuluaga and Molina, 2018). The largest number of species (12) corresponds to those found in the banana plantation system associated with coffee (AC), followed by the traditional system (TA) with 10 species, banana associated with trees (AA) with nine and monoculture (MONO) with eight species.

P. corethrurus is the most abundant species with 1255 individuals found, the greater the intervention in the culture system, the higher the prevalence of this species being found in the AA system and in a lower percentage in TA, which makes it an indicator of the impact of the farming systems on the native species.

The results, outlined with the Driver-Pressure-State-Impact-Response model (DPSIR), make visible the changes in the macrofauna communities according to the farming system, allowing us to expand the knowledge about the pressures exerted by agricultural practices, and it serves as a basis for the search for alternatives in decision making to real problems.

Key words: Andes, Musaceae, bioindicators, macrofauna, agricultural practices, DPSIR.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Los procesos de ocupación humana se manifiestan con la introducción de usos del terreno que modifican la biodiversidad, y se relacionan de forma directa con el funcionamiento ecológico. La dinámica de crecimiento urbano genera presión sobre las coberturas agrícolas y a su vez se considera una amenaza sobre los servicios ecosistémicos que ofrecen éstas coberturas en el territorio, lo cual vulnera el propósito de alcanzar el desarrollo rural productivo y sustentable (Molina, 2018).

Los sistemas de producción de alimento ocupan hoy cerca del 25% del planeta y se establecen en una transición desde agroecosistemas tradicionales hasta sistemas agrícolas industriales y aunque el cambio en la dieta y el aumento de la acuicultura son estrategias de mitigación importantes ante el aumento en la demanda, se reconoce que la producción agrícola debe aumentar a nivel mundial para suministrar los alimentos necesarios para más de nueve mil millones de personas en 2050 (Gabriel, Sait, Kunin y Benton, 2013), básicamente sobre dos ejes: la intensificación o a través de la producción extensiva incorporando nuevas tierras agrícolas de producción.

El sistema de cultivo determina una relación eficiente o deficiente en asocio con la fauna edáfica, el uso de maquinaria para la transformación del suelo, la labranza indiscriminada, el uso de agroquímicos y los cultivos intensivos son los principales referentes de impactos negativos sobre las comunidades edáficas (Juárez y Fragoso, 2014). En ese sentido, Feijoo, Zúñiga, Quintero y Lavalle (2007), determinaron que algunas especies como *P. corethrurus*, *O. elegans* y *Glossodrilus saina*, son potenciales indicadores de ambientes perturbados, dado el uso frecuente de agroquímicos, así como la incidencia de la carencia de sombra y la recurrencia de sistemas intensivos que repercuten en el cambio de la composición y estructura del suelo al faltar coberturas que regulen la humedad, el pH y la disponibilidad de fuentes alimenticias.

Las propiedades biológicas del suelo son dinámicas, por esto poseen la ventaja de ser indicadores tempranos de degradación o de mejoría del mismo, la función desempeñada por la biota edáfica tiene efectos directos e indirectos en el crecimiento y calidad de los cultivos, la incidencia de plagas y enfermedades y el ciclaje de agua y nutrientes (Lavelle et al., 1997). La fauna edáfica, especialmente moluscos y lombrices, también tienen un impacto en el suelo gracias a sus secreciones cutáneas, las cuales compactan el suelo, haciéndolo más estable. Estas secreciones, junto con las heces de los animales influyen la concentración de muchos de los nutrientes en el suelo, reduciendo la relación C/N en la hojarasca y promoviendo su descomposición. Adicionalmente, la ingesta de grandes

cantidades de suelo mineral está bien documentada en macrofauna - ingenieros del suelo (Lavelle et al. 1998).

Para el caso, la macrofauna es valiosa por la estrecha relación en la interpretación de la dinámica de la materia orgánica y los procesos de transformación de los residuos orgánicos. Además, dan rápida respuesta a los cambios en el manejo del suelo (Doran y Parkin, 1994), con eficaces dictámenes en la presencia o ausencia en algunos grupos tales como Diplopoda, Blattaria u Oligochaeta entre otros, que adicionalmente aportan múltiples servicios ecosistémicos.

La abundancia, biomasa y riqueza de especies de macrofauna se reconoce como un recurso potencial para diferenciar agroecosistemas debido a la frecuencia de uso y el tipo de vegetación de los usos del terreno, lo que indica cambios en las propiedades del suelo causado por las diferentes prácticas de manejo (Feijoo, 2001). La riqueza es mayor en zonas menos deforestadas, la abundancia disminuye en las especies a lo largo del gradiente de deforestación y la intensificación del uso excepto para algunas especies exóticas con alto potencial invasivo como *P. corethrurus*. Asimismo, la abundancia de los Diplopoda, Chilopoda y Gasteropoda frecuentemente está asociada con la cantidad de hojarasca y decrece con la deforestación (Marichal et al., 2014). En la lectura de éstas interacciones, es posible introducir indicadores que permiten obtener resultados cuantitativos que provean respuestas asociadas con actividades de uso, intervenciones (Imaz et al., 2010) y estilos de hacer agricultura.

Las lombrices de tierra, por ejemplo, son consideradas un buen indicador de impacto ambiental debido a que: a) son representativas en los sistemas edáficos en términos de la abundancia, b) responden a factores ambientales y ecológicos como cambios en la química del suelo y prácticas agrícolas y forestales y c) pueden ser consideradas como indicador de la funcionalidad del suelo debido a su fuerte impacto sobre el mismo (Lavelle and Spain 2001; Pérès et al., 2008). Se ha demostrado que, a nivel de comunidad, la abundancia de lombrices puede ser usada como indicador de uso del suelo (arable, praderas, forestal) y otras características como riqueza de especies y estructura ecológica (abundancia de grupos ecológicos) son indicadores de fertilización y tratamientos con plaguicidas (Cluzeau et al., 2009). Así mismo, que la abundancia y la biomasa de lombrices parecen ser buen indicador de sitios no contaminados mientras la estructura ecológica como epígeas vs endógeas y la proporción de especies no vulnerables pueden ser usadas como indicadores de suelos contaminados (Pérès et al., 2011).

En el suelo, las lombrices de tierra representan el mayor componente de biomasa animal, han sido llamadas comúnmente como “los ingenieros del suelo” por la formación de galerías, hoyos y depósitos de excremento, características importantes en la aireación y la

filtración de agua y nutrientes. Se han realizado estudios que evidencian la importancia de las mismas en la estructura del suelo como sustento de las actividades agrícolas y su aporte a la fertilidad de los mismos. Van Groenigen, et al. (2014) da cuenta del aporte en la productividad arrojando un incremento de 25% en la producción de granos, 23 % la biomasa de plantas y 20% de incremento en la biomasa de raíces; se pudo constatar además que la presencia de lombrices no incidió en el contenido de nitrógeno de las plantas por lo cual no se presentaron afectaciones en la calidad.

La acción de las lombrices produce efectos marcados no sólo en la estructura sino también en la composición química, porque la materia orgánica consumida es retornada en una forma usable fácilmente por las plantas, ellas cavan y comen suelo, crean túneles y canales tanto horizontales como verticales que permiten el intercambio de materia orgánica a lo largo del perfil del suelo (Wolters 2000). Las lombrices consumen gran cantidad de sustancias minerales que son mezcladas con materia orgánica y se expelen en forma de moldes ricos en nitrógeno y otros nutrientes como calcio, magnesio y potasio. También contiene una vasta cantidad de bacterias sin digerir, las cuales proliferan fácilmente en el suelo contribuyendo a la humificación y mineralización de materia orgánica. Al mismo tiempo, el consumo de microorganismos puede controlar patógenos específicos de las plantas (Menta y Pinto, 2016).

A pesar de que la fauna biótica ha sido ampliamente utilizada como indicador de la calidad del suelo, pocos estudios han evaluado directamente la relación entre los diferentes sistemas de cultivo y el comportamiento de las comunidades de macrofauna.

Por las consideraciones anteriores, y teniendo en cuenta que la ecotecnología busca el diseño de los ecosistemas usados por el hombre sin destruir el balance ecológico de manera que exista mutuo beneficio entre el ser humano y el ambiente natural (Mitsch y Jorgensen, 1989), se puede afirmar que el presente estudio pretende aumentar el entendimiento de principios del diseño ecológico como aquellos relacionados con la necesidad de defender la biodiversidad para mantener la capacidad de autodiseño de un ecosistema, la red formada por los componentes del ecosistema y sus interconexiones e interrelaciones con implicaciones directas e indirectas, así como la importancia de conocer e interpretar las interacciones de los procesos físicos y biológicos en el mismo.

2 CAPÍTULO ÚNICO. MACROFAUNA COMO MEDIDA DE IMPACTO ASOCIADO CON CUATRO SISTEMAS DE CULTIVO DE PLÁTANO, EJE CAFETERO COLOMBIANO

2.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos son ecosistemas complejos, descritos como sistemas multifuncionales debido a los múltiples componentes que interactúan en ellos, es así como los procesos antropogénicos de transformación de sistemas en agroecosistemas altera la habilidad del suelo para proveer diversas funciones (Levin et al., 2017) y conducen a variaciones en la presencia y abundancia de fauna edáfica. Esta perturbación antropogénica afecta a los organismos de forma diferente, en el caso de los macroinvertebrados, responden de manera variable al impacto que ocasionan las prácticas de manejo y la intensidad de los cultivos. Si esas variaciones se presentan de acuerdo con el tipo de cultivo, un enfoque basado en la respuesta de las comunidades de macrofauna del suelo sería un predictor efectivo del estado del ecosistema (Vincent, Leyval, Berguiristain & Auclerc, 2018).

Los macroinvertebrados son un eslabón clave en la prestación de servicios ecosistémicos del suelo, son organismos de tamaño superior a dos mm de diámetro, presentes en la capa superior, media y profunda del suelo y con movilidad activa a través de él; contribuyen con la transformación del mismo, realizan aportes para la estructura en forma de depósitos de carbono y afectan la fertilidad del suelo al condicionar la porosidad, aireación, infiltración y drenaje (Lavelle, Rodríguez, Argüello, Bernal y Botero, 2014). Además, regulan los procesos del suelo en funciones tales como la descomposición de la materia orgánica, el desarrollo de estructuras y ciclado de agua y nutrientes (Huot et al., 2018). Lavelle et al. (2006) y Liiri et al. (2012), reconocen el suelo como componente esencial de los ecosistemas para la generación de servicios ecosistémicos. Además, resaltan la importancia de la fauna edáfica como diversa, que representa el 23% de la riqueza de los organismos vivos, y que interviene activamente en un complejo de interacciones que afectan la dinámica de los procesos edáficos.

El impacto permanente en los sistemas con agricultura y los cambios de uso como deforestación, intensificación de cultivos (incluyendo monocultivos) en asocio a la fragmentación del hábitat, afecta y tiene impacto negativo en las comunidades de fauna edáfica (Barros et al., 2003), estas afectaciones pueden producirse a pesar de que durante algún tiempo los Agroecosistemas mantengan su apariencia externa. Algunos de estos cambios disminuyen la fertilidad y conducen a procesos erosivos, por lo tanto, el comparar

la fauna entre sitios cultivados bajo condiciones diferentes, provee una guía futura para el manejo de los sistemas de cultivo (Sanabria, Dubs, Lavalle, Fonte y Barot, 2016).

A pesar de que la fauna biótica ha sido ampliamente utilizada como indicador de la calidad del suelo, pocos estudios han evaluado directamente la relación entre los diferentes sistemas de cultivo y el comportamiento de las comunidades de macroinvertebrados.

2.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE ESTUDIO

Objetivo General

Valorar las comunidades de macrofauna del suelo en procesos de transformación y manejo en sistemas de cultivar plátano para la visualización de los impactos en materia de abundancia, biomasa y riqueza que introducen las prácticas culturales sobre ellas en el departamento del Quindío.

Objetivos Específicos

- Cuantificar la riqueza de unidades taxonómicas (UT), abundancia y biomasa de macrofauna en las 33 fincas de cuatro sistemas de cultivo de plátano en el departamento del Quindío.
- Muestrear las comunidades de lombrices de tierra en las fincas muestreadas en términos de presencia y categoría ecológica para validarlas como bioindicadores de acuerdo con las variaciones en los parámetros por sistema de cultivo.
- Construir indicadores que posibiliten la evaluación del impacto ambiental en sistemas de cultivo de plátano, a partir del uso del esquema DPSIR.

Hipótesis del Investigador

La intensificación de los sistemas de cultivo de plátano afecta a las comunidades de macrofauna de manera diferencial, de acuerdo con la localización, el tipo de manejo de la finca y el gradiente de transformación realizado por los seres humanos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Localización del área de trabajo y diseño del muestreo

El trabajo se llevó a cabo en los municipios de Armenia, Calarcá y Circasia, departamento del Quindío, centro-occidente de Colombia, con 250 km² de cobertura (6,2% del área total

del departamento) y densidad de población de 321.378 habitantes. Se sitúan entre 1000 a 3600 msnm, con precipitación entre 2000 mm a 2200 mm, temperatura media anual de 18 a 24 °C y evapotranspiración de 1100 mm a 1200 mm (IGAC. 2014). Los suelos en la región son profundos, bien drenados, fuertemente ácidos, con baja fertilidad y se sitúan en la Consociación El Cafetal, Typic Hapludands (IGAC, 2010). En Armenia, de las 12129,99 ha que ocupan las coberturas agrícolas, el 69,5% de la superficie está cubierta por los cultivares de plátano (3144.30 ha) (IGAC, 2010).

A través de salidas de campo a la zona rural para lograr el acercamiento con los agricultores y sus familias y definir las fincas objeto del macroproyecto titulado “Servicios ecosistémicos generados por diversos arreglos del cultivo de plátano en el Eje Cafetero Colombiano” realizado por el grupo de investigación Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos (GATA). En el municipio de Armenia se localizaron la mayoría de las fincas (28) de un total de 33, mientras que las restantes se localizaron en los municipios de Circasia (3) y Calarcá (2). En los predios, se escogieron cuatro sistemas de cultivo de acuerdo con la clasificación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) (2005): AA, Plátano asociado con aguacate y otros frutales, sin distancias ni trazos definidos, sin fertilización y pocas labores agronómicas (ocho fincas); AC, Plátano asociado con café, en barreras con distancias definidas y manejo agronómico significativo (ocho fincas); MONO, Plátano monocultivo tecnificado, con manejo agronómico permanente, trazo definido y renovación cada cinco a seis años (siete fincas) y; TA, Plátano tradicional con fertilización, sin distancias ni trazos definidos (10 fincas) (Figura 1).

Adicionalmente, para evaluar el efecto de la altura sobre el nivel del mar en la distribución de las comunidades de macrofauna en los sistemas de cultivo, se tuvo en cuenta la posición de las fincas, las cuales se situaron en la zona alta (11 predios por encima de 1301 msnm) y baja (22, en un rango entre 1000 - 1300 msnm) (Tabla 1).

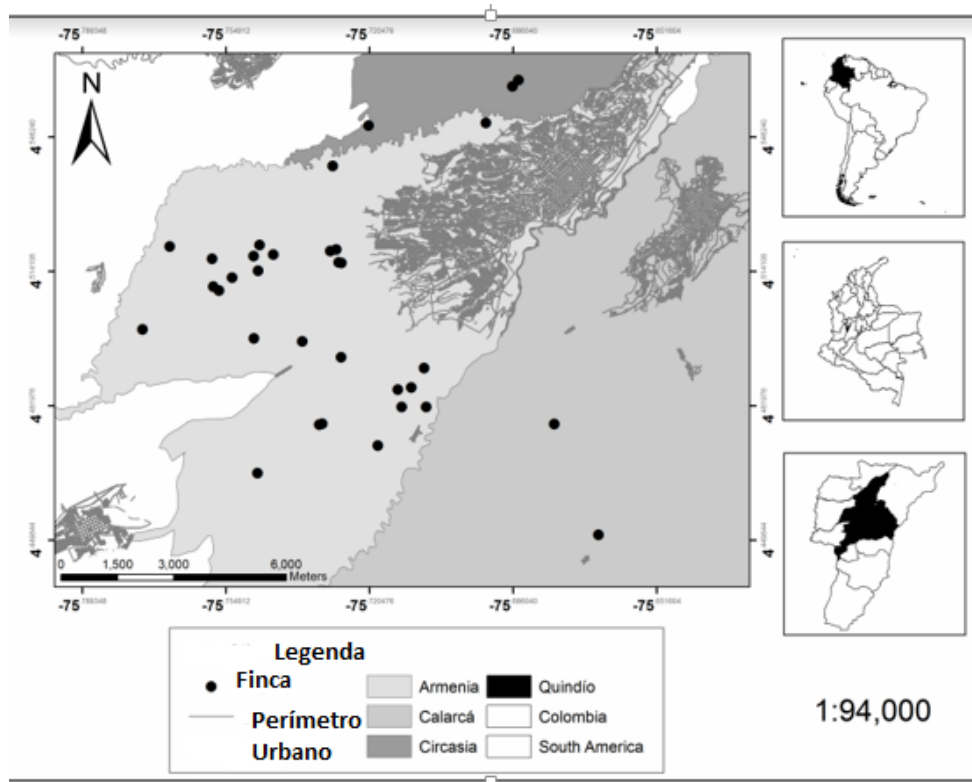


Figura 2 Ubicación de las fincas estudiadas. Fuente: Zuluaga, 2017

3.2 Caracterización fauna edáfica por arreglo

Posteriormente, en cada finca se localizaron seis puntos de muestreo con distancias entre 20 a 50 m en un transepto longitudinal diagonal en la misma dirección del surco de plátano. En cada punto se extrajeron tres monolitos, uno principal de 25 x 25 x 20 con profundidad de 0-20 cm y dos complementarios de 25 x 25 x 10 cm, ubicados a cinco metros del monolito central en las direcciones norte y sur, a una distancia de 50 cm de la planta.

En los 18 monolitos se colectaron los macrofauna por finca de acuerdo con el método del Programa Fertilidad Biológica de Suelos Tropicales TSBF (Anderson & Ingram, 1993), para un total de 594 muestras. El método se adaptó a una profundidad máxima de 20 cm debido a que el sistema radicular del plátano es superficial y por tanto la presencia de fauna edáfica se evidencia especialmente en esa franja de suelo (Figura 2).

Tabla 1 Fincas seleccionadas para el muestreo de macrofauna en el departamento de Quindío.

No. Finca	Altura m.s.n.m.	Zona	Tamaño - Área (ha)	Sistema de cultivo
1	1214	BAJA	7	TA
2	1222	BAJA	1	TA
3	1197	BAJA	9,1	MONO
4	1228	BAJA	10	TA
5	1243	BAJA	10	TA
6	1240	BAJA	5	AC
7	1214	BAJA	6	AA
8	1241	BAJA	12	MONO
9	1253	BAJA	8	TA
10	1290	BAJA	4,1	MONO
11	1293	BAJA	4,1	TA
12	1285	BAJA	10	AA
13	1288	BAJA	3,75	AA
14	1215	BAJA	60	MONO
15	1205	BAJA	3,5	AC
16	1245	BAJA	4	AA
17	1247	BAJA	6,25	AC
18	1294	BAJA	2,5	AA
19	1336	ALTA	1	MONO
20	1320	ALTA	2,5	AC
21	1310	ALTA	1,5	AC
22	1309	ALTA	3	AC
23	1244	BAJA	3	AA
24	1217	BAJA	45	TA
25	1270	BAJA	12	TA
26	1292	BAJA	20	AA
27	1436	ALTA	3	AC
28	1341	ALTA	5	MONO
29	1332	ALTA	23,3	MONO
30	1410	ALTA	25	AA
31	1479	ALTA	10	AC
32	1588	ALTA	5,8	TA
33	1576	ALTA	5.8	TA

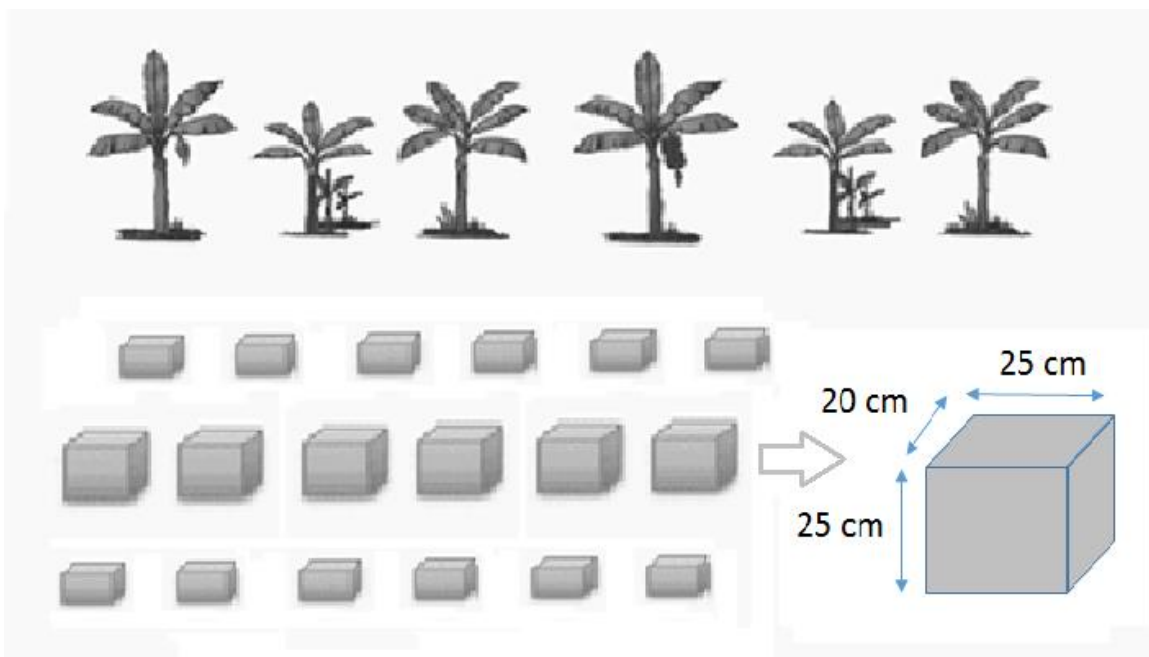


Figura 3 Muestreo de macrofauna en sistemas de cultivo de plátano, Quindío.

En cada muestreo se colectaron los macrofauna (diámetros mayores a 2 mm y longitudes mayores a 10 mm) y se separaron de forma manual. Las lombrices de tierra fueron fijadas y conservadas en alcohol al 96% y los demás individuos en alcohol al 70%, luego fueron identificados y agrupados, en la Universidad Tecnológica de Pereira, como unidades taxonómicas: Oligochaeta, Coleoptera, Miriápoda, Blattaria, Hemíptera y “Otros”. En “Otros”, se reunió aquellos macrofauna que presentaron valores iguales o inferiores al 5% del valor total de los morfotipos, tales como: Thricoptera, Quilopoda, Molusca, Isoptera, Crustacea y Diptera entre otros. Posteriormente se identificaron de acuerdo con las unidades taxonómicas, que hace referencia a la clasificación jerárquica entre orden y especie (No. de UT*Finca), se midió la abundancia (individuos por metro cuadrado) y biomasa (gramos de peso fresco por metro cuadrado) en los monolitos y en cada sistema de cultivo para analizar los efectos del cambio altitudinal en la distribución de la fauna edáfica en las fincas. Se realizó el conteo del número total de especies de lombrices de tierra en las 33 fincas, se describió la categoría ecológica de las lombrices de tierra y se calculó la frecuencia de ocurrencia de las especies y el número de individuos por finca.

3.3 Esquematización de la interacción de fauna edáfica y sistemas de cultivo

La definición de los elementos del esquema Driver o motor de cambio – Presión - Estado - Impacto - Respuesta (DPSIR) se derivan de una aproximación metodológica en tres fases: a) recolección de información en campo a través de entrevistas semi-estructuradas realizadas por el Grupo GATA, b) análisis del comportamiento de las comunidades de

macrofauna en relación con las prácticas agroalimentarias en los sistemas de cultivo, c) definición de los componentes a través de revisión bibliográfica, consulta de la normatividad aplicable y opinión de expertos o partes interesadas.

En el esquema Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) para el propósito del presente estudio, los elementos fueron entendidos como: “Driver o Motor de Cambio”, son cambios ambientales, económicos, sociales, culturales o de otra índole que ejercen presión sobre las comunidades edáficas en los sistemas de cultivo. “Pressure o Presión” son presiones como consecuencia de actividades humanas que tienen la capacidad potencial de modificar la estructura de las comunidades de macrofauna. “State o Estado” es el estado de las comunidades de macrofauna en los sitios de cultivo medidos en el presente trabajo en términos de riqueza, abundancia y biomasa. “Impact” o impacto, son cambios en las características del cultivo que afectan negativamente las dimensiones ambientales, económicas y/o sociales del entorno y que tienen relación causal con afectaciones en el “estado”. “Response” es una respuesta consistente en una acción política iniciada de forma personal, grupal o institucional que está directamente ligada a los “impactos” y encaminada a prevenir, eliminar, compensar, disminuir o adaptarse a las consecuencias de los “impactos” (Kuldna et al., 2009) (Figura 3).

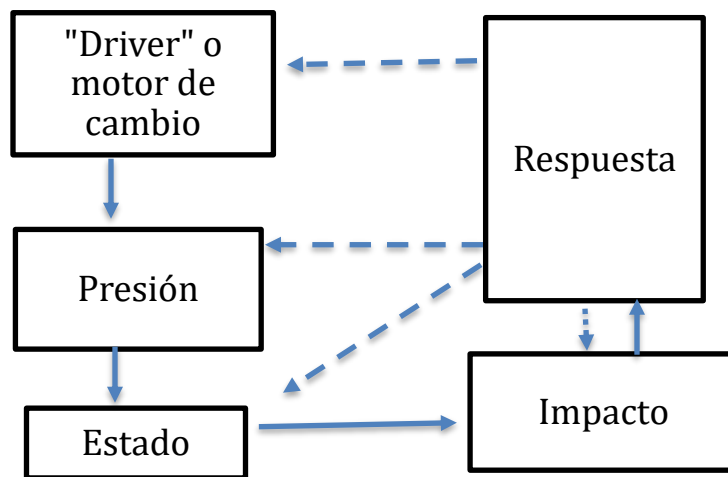


Figura 4. Representación básica DPSIR donde las respuestas pueden estar dirigidas a las diferentes fases del esquema.

La definición del Motor de cambio (Driver) marca el nivel en el cual se estructurará el esquema, aunque la intensificación de la agricultura y los cambios en el uso del suelo se han reconocido como los mayores motores de cambio para la pérdida de biodiversidad, en la propuesta del presente estudio se reconoce como motor de cambio el sistema de cultivo

de plátano: AA, AC, MONO o TA con todas las características implícitas y descritas en el marco del proyecto.

3.4 Análisis de datos

Se calcularon los valores promedio de riqueza (UT), abundancia (ind.m⁻²) y biomasa (g.p.f.m⁻²) de los macrofauna en cada una de las fincas y se consolidaron los datos por sistema de cultivo. La abundancia se determinó a partir del número de individuos y la biomasa sobre la base del peso húmedo en la solución preservante. Para determinar la normalidad de los datos se utilizó la prueba de Shapiro Wilks y la de Kolmogorov-Smirnov, además, para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. En el análisis de distribución de la macrofauna según la altura sobre el nivel del mar y los sistemas de cultivo se utilizó análisis de varianza con modelo de distribución binomial negativa y método residual. La correlación para variables específicas se analizó con el coeficiente de correlación de Pearson. En los casos donde se presentaron diferencias significativas entre los cultivos en las variables evaluadas, se utilizó una prueba posterior para datos no paramétricos. Para establecer si existía algún tipo de asociación y el grado de la misma, se aplicaron pruebas de correlación de Spearman entre todas las variables. Para todas las pruebas el nivel de significancia fue de 0,05. En los análisis estadísticos de los datos se utilizaron los programas SPSS versión 16 y SAS (Statistical Analysis Software, SAS Institute).

4. RESULTADOS

4.1 Riqueza, abundancia y biomasa de macrofauna terrestres por finca y por sistema de cultivo

Para las 33 fincas se colectaron un total de 49.486 macrofauna en 594 muestras de suelo, en una comunidad dominada por Oligochaeta con el 48.6% de los individuos, seguida de Coleoptera que representó el 19.1%, Miriapoda 14.5%, la categoría de otros con el 9.4% de los individuos y la menor representación está dada por Blattaria 5.5% y Hemiptera con 2.6% de la fauna colectada. La abundancia promedio de macrofauna fue de 249.92 ind. m⁻² en el total de fincas enmarcadas en un rango entre 50.66 y 735.66 ind. m⁻².

Al hacer la clasificación taxonómica se identificaron 14 Órdenes, 3 Clases y 8 familias de macrofauna. La mayor riqueza de UT se presentó en la UPS 6 (AC) con 17 UT, seguida por la UPS 1(TA) con 15 y las UPS 3(MONO) y UPS 19 (MONO) con 14; en tanto que valores inferiores de UT se hallaron en las UPS 23 (AA), 28 (MONO) y 18 (AA) con 7, 6 y 4 UT respectivamente.

La finca de mayor abundancia fue la No.26 ($\bar{x}=735.66$ ind. m^{-2} , $n=18$, $\sigma=296.9$), seguida de la 30 ($\bar{x}=485.33$, $n=18$, $\sigma=581.1$) y la 14 ($\bar{x}=480$, $n=18$, $\sigma=633.5$); algunas de las fincas que se encuentran en rango medio son la 6 ($\bar{x}=253.33$, $n=18$, $\sigma=134.02$), seguida de la 23 ($\bar{x}=253.33$, $n=18$, $\sigma=137.4$) y la 32 ($\bar{x}=248$, $n=18$, $\sigma=123.4$) y las de menor abundancia fueron las fincas 24 ($\bar{x}=93.33$, $n=18$, $\sigma=71.8$), 9 ($\bar{x}=61.33$, $n=18$, $\sigma=37.0$) y 28 ($\bar{x}=50.66$, $n=18$, $\sigma=67.4$) (Figura 4).

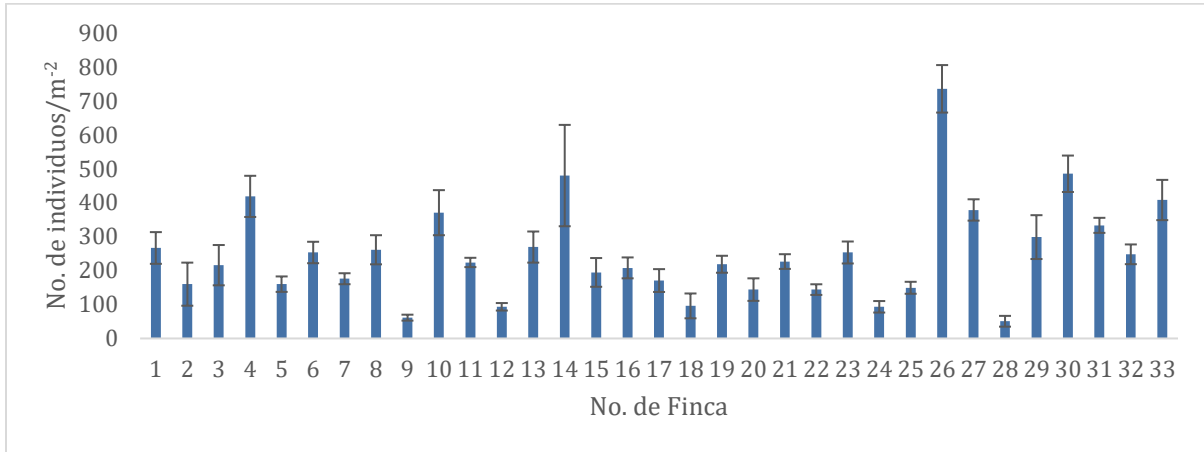


Figura 5. Número promedio de Macrofauna/ m^{-2} en fincas de cultivos de plátano en los tres municipios. Barra de error estándar.

La biomasa total colectada en las 33 fincas fue de 8618.64 g.p.f. m^{-2} en un rango entre 5.95 y 164.17 g.p.f. m^{-2} y un promedio de 43.52 g.p.f. m^{-2} en el total de muestras. En los predios predominaron los Oligochaeta (48.6%), siendo el grupo taxonómico más representativo, mientras que los de menor valor fueron los Hemiptera con 2.6% del peso colectado. Las fincas con mayor biomasa fueron la 26 ($\bar{x}=164.17$ g.p.f. m^{-2} , $n=18$, $\sigma=98.4$), la 33 ($\bar{x}=131.62$, $n=18$, $\sigma=216.3$), la 30 ($\bar{x}=96.86$, $n=18$, $\sigma=57.8$) y la 27 ($\bar{x}=86.84$, $n=18$, $\sigma=40.08$), mientras que las intermedias fueron la 13 ($\bar{x}=46.99$, $n=18$, $\sigma=38.1$), y la 4 ($\bar{x}=39.77$, $n=18$, $\sigma=18.7$) y las de menor biomasa la 18 ($\bar{x}=10.67$, $n=18$, $\sigma=14.4$), 12 ($\bar{x}=7.17$, $n=18$, $\sigma=10.1$) y 9 ($\bar{x}=5.95$, $n=18$, $\sigma=5.2$) (Figura 5).

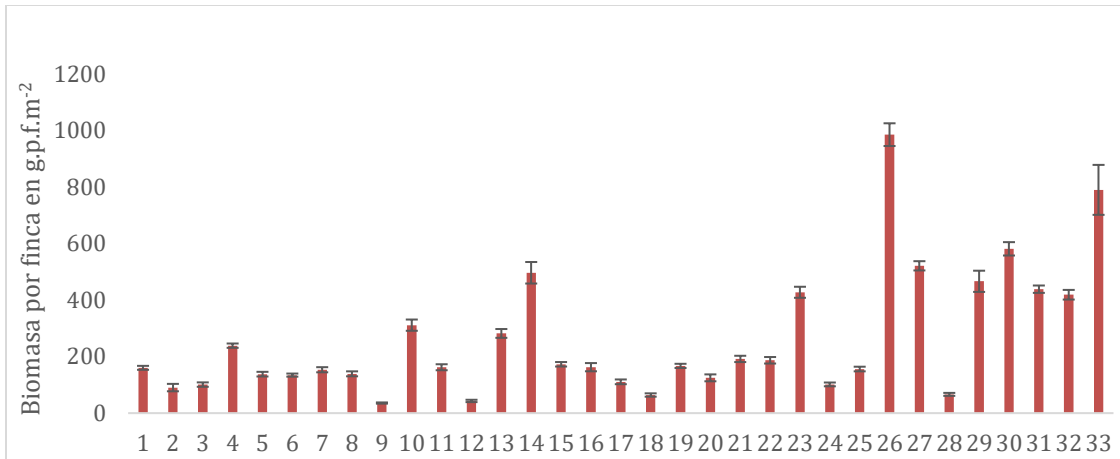


Figura 6. Biomasa de macrofauna en fincas del departamento del Quindío. Barra de error estándar

4.2 Cambios en la macrofauna edáfica relacionados con los sistemas de cultivo y la altura

La mayor riqueza promedio de unidades taxonómicas se halló en el sistema de cultivo MONO ($\bar{x}=11$), seguido de TA ($\bar{x}=10.7$), AC ($\bar{x}=10.12$) y la menor riqueza promedio se halló en AA ($\bar{x}=9.5$).

En la abundancia por arreglo se encontró que el cultivo con plátano asociado con árboles AA se presentaron los valores más altos ($\bar{x}=289.62 \text{ ind.m}^{-2}$, $n=48$, $\sigma=66.0$), seguido del Monocultivo MONO ($\bar{x}=270.85$, $n=42$, $\sigma=48.4$), el Plátano asociado con café AC ($\bar{x}=230.66$, $n=48$, $\sigma=35.2$) y con la menor abundancia el cultivo Tradicional TA ($\bar{x}=218.93$, $n=60$, $\sigma=28.2$).

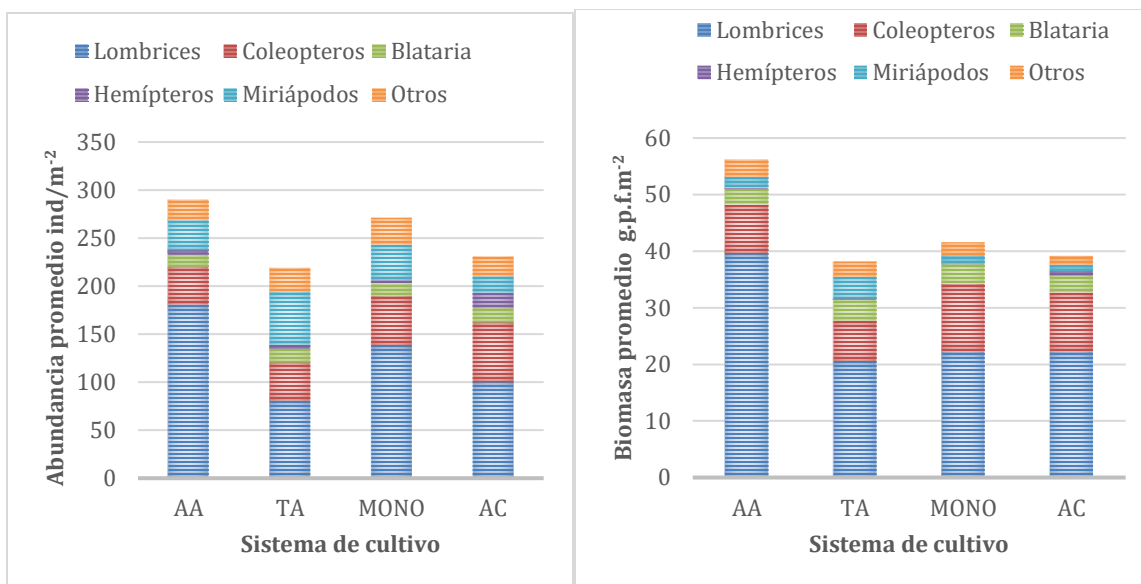


Figura 7. Abundancia y biomasa promedio de grupos taxonómicos por sistema de cultivo en el departamento de Quindío.

La abundancia, estuvo dominada por los Oligoquetos en todos los sistemas de cultivo seguida por los Coleópteros, excepto en el sistema tradicional (TA) donde los Miriápodos ocupan el segundo renglón. Los Hemípteros fueron el grupo con menores valores, excepto en el sistema AC, en el que Blattaria fue el de menor representación. (Figura 6). En todos los tipos de cultivo, la biomasa está dominada por los Oligochaeta con un 58.4% del peso colectado, seguidos por los Coleoptera 22.5%, Blataria 7.7%, Otros 5.4%, Miriapoda 4.9% y Hemiptera con el 0.86% (Tabla 2).

Tabla 2. Biomasa promedio (g.p.f.m⁻²) de la macrofauna en sistemas de cultivo de plátano en el departamento de Quindío. Error estándar entre paréntesis.

Fauna	Sistema de cultivo	AA (Asociado con árboles)	TA (Tradicional)	MONO (Monocultivo)	AC (Asociado con café)
Oligoquetos		1895.51 (8.79)	1225.63 (9.50)	934.20 (7.46)	1067.77 (4.51)
Coleópteros		419.77 (1.89)	436.65 (1.46)	504.07 (4.08)	501.83 (1.92)
Blataria		131.72 (0.79)	225.17 (0.86)	147.20 (1.00)	144.25 (1.07)
Miriápodos		90.98 (0.56)	232.66 (1.05)	63.70 (0.62)	49.66 (.035)
Hemípteros		11.96 (0.99)	13.78 (0.09)	3.35 (0.03)	42.03 (0.33)
Otros		148.82 (1.01)	157.37 (0.68)	94.90 (0.65)	75.54 (0.44)

En el caso de la ubicación geográfica de los sistemas de cultivo se encontró que tanto la abundancia como la biomasa de los macrofauna colectados presenta promedio superior en las fincas con mayor altura sobre el nivel del mar (\bar{x} =1601.45 ind.m⁻² y \bar{x} =359.32 g.p.f.m⁻²

² n=11) que aquellas por debajo de los 1300 m.s.n.m. (\bar{x} =1448.63 ind.m⁻² y \bar{x} =212.09 g.p.f.m⁻² n=22) excepto en el sistema de cultivo MONO en el que se encontraron mayor cantidad de individuos en las fincas de la zona Baja (Figura.7).

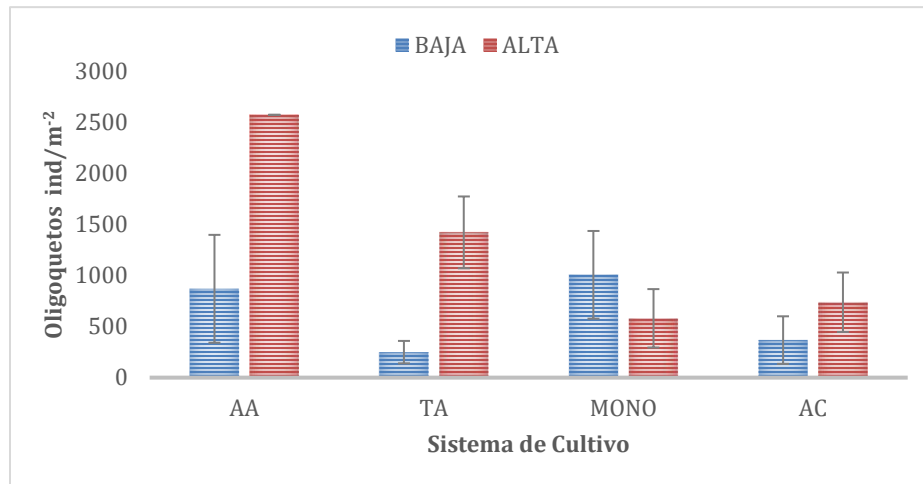


Figura 8. Abundancia de Oligoquetos por sistema de cultivo según la altura de la finca.

Los resultados del análisis de varianza con una distribución binomial negativa y método residual no arrojan diferencias significativas para la presencia de macrofauna según el tipo de cultivo, sin embargo evidenciaron que por la ubicación con relación a la altura sobre el nivel del mar, se presentan diferencias significativas en la distribución de las comunidades de macrofauna analizados, excepto por Blattaria y los grupos taxonómicos agrupados en la categoría de “Otros“ cuyo comportamiento no muestra diferencia significativa en términos de abundancia y biomasa entre fincas localizadas a una altura mayor a 1300 msnm (Zona Alta) con las fincas ubicadas entre los 1000 y 1300 msnm (Zona Baja) así como tampoco entre los cuatro sistema de cultivo (Tabla 3).

Se encontró diferencia significativa para la abundancia de Oligoquetos entre fincas localizadas en la zona alta con las fincas ubicadas en la zona baja ($p < 0.05$) (0.0137), en especial para los sistemas de cultivo AA ($p < 0.0063$) y TA ($p < 0.0402$) siendo mayor la presencia de Oligochaeta en la zona alta. También se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de cultivo: AA de zona alta presenta un promedio de 429.33 ind.m⁻² mientras el mismo cultivo en la zona baja tiene un promedio de 145,14 ind.m⁻² con diferencias significativas ($p < 0.0063$). TA de zona alta presenta un promedio de 237,33 ind.m⁻² mientras que en la zona baja fue de 41,66 ind.m⁻² ($p < 0.0402$).

En la biomasa de Oligoquetos se presentó diferencia significativa para las fincas de zonas alta y baja ($p < 0.0001$), así como entre los diferentes sistemas de cultivo de la zona baja. Se evidencian diferencias en un mismo sistema de cultivo dependiendo si se encuentra en zona

alta o baja, excepto para el sistema MONO donde no hay significancia en la abundancia de Oligochaeta según altura.

La abundancia de coleópteros no presentó diferencia significativa entre la zona alta y baja, tampoco entre los sistemas de cultivo excepto por la diferencia entre el número de Coleópteros en el cultivo AC de zona alta y el cultivo TA de zona baja ($p < 0.0152$) con promedios de 428.8 ind.m^{-2} y 216 ind.m^{-2} respectivamente. Para biomasa de Coleópteros se presenta diferencia significativa entre las fincas de zonas ALTA y BAJA ($p < 0.0204$), especialmente en el sistema de cultivo TA ($p < 0.0101$) cuyas fincas en zona baja presentan el menor promedio en biomasa de coleópteros con $38.26 \text{ g.p.f.m}^{-2}$ frente al mismo sistema de cultivo en zona alta con promedio de $65.26 \text{ g.p.f.m}^{-2}$ y los cultivos AC y MO en zona alta con promedios de $77,68 \text{ g.p.f.m}^{-2}$ y $88.2 \text{ g.p.f.m}^{-2}$ respectivamente.

La abundancia de Hemiptera presentó diferencia significativa en los sistemas de cultivo AC y MO (0.0480) con promedios de 752 y 128 ind.m^{-2} respectivamente, así como entre los sistemas de cultivo AC y TA, pero sólo en las fincas de zona baja con significancia de 0.0273 y promedios de 154 y 24 ind.m^{-2} respectivamente.

Tabla 3. Densidad y biomasa de macrofauna en diferentes sistemas de cultivo y distinta altura.

Fauna\Source of variation	HIGH				LOW			
	AA	AC	MO	TA	AA	AC	MO	TA
Abundancia Oligochaeta	5.941 ^a	4.813 ^a	4.663 ^a	5.102 ^a	4.107 ^{ba}	4.116 ^{ba}	5.190 ^a	3.805 ^a
Biomasa Oligochaeta	4.325 ^a	3.418 ^{ba}	2.967 ^b	4.037 ^{ba}	2.881 ^a	2.135 ^{ba}	3.257 ^a	1.588 ^b
Abundancia Coleopteros	3.434 ^b	4.269 ^a	3.828 ^{ba}	4.056 ^{ba}	3.802 ^a	3.852 ^a	4.101 ^a	3.465 ^a
Biomasa Coleopteros	2.126 ^a	2.560 ^a	2.612 ^a	2.610 ^a	2.193 ^a	1.840 ^a	2.285 ^a	1.519 ^a
Abundancia Blattadea	1.674 ^a	2.462 ^a	2.926 ^a	2.590 ^a	2.805 ^a	3.017 ^a	1.828 ^a	2.723 ^a
Biomasa Blattadea	0.265 ^a	0.809 ^a	1.618 ^a	0.496 ^a	1.283 ^a	1.451 ^a	0.374 ^a	1.538 ^a
Abundancia Hemípteros	-.15.70 ^a	2.261 ^a	1.204 ^a	1.961 ^a	2.010 ^{ba}	3.249 ^a	0.980 ^{ba}	0.826 ^b
Biomasa Hemípteros	-.14.67 ^a	-.0.22 ^a	-.2.21 ^a	-.0.94 ^a	-.0.91 ^{ba}	0.0091 ^a	-.3.21 ^b	-.1.82 ^b
Abundancia Miriapodos	2.184 ^a	2.415 ^a	3.619 ^a	3.519 ^a	3.080 ^a	3.316 ^a	3.595 ^a	4.158 ^a
Biomasa Miriapodos	0.723 ^a	-.0.24 ^a	0.461 ^a	0.005 ^a	0.585 ^b	0.372 ^b	0.353 ^b	1.631 ^a
Abundancia Otros	2.590 ^a	2.897 ^a	3.149 ^a	2.826 ^a	3.242 ^a	3.178 ^a	3.519 ^a	3.352 ^a
Biomasa Otros	1.178 ^a	0.392 ^a	0.836 ^a	1.047 ^a	1.102 ^a	0.547 ^a	0.786 ^a	0.926 ^a

Valores seguidos de diferentes letras representan diferencias significativas ($p < 0.05$) (Distribución Negativa Binomial).

La biomasa de Hemiptera presentó diferencia significativa por arreglo ($p < 0.0044$) siendo los promedios de 11.96, 42.03, 3.35 y 13.78 g.p.f.m^{-2} en los sistemas AA, AC, MONO y TA respectivamente. También se halló diferencia significativa en la biomasa de las fincas

ubicadas en zona BAJA independiente del sistema de cultivo utilizado ($p < 0.0225$) y entre el sistema AC con los sistemas MO y TA.

La abundancia de Miriapoda presentó diferencias significativas entre fincas de zona alta y baja ($p < 0.0253$), encontrando siempre mayor presencia en la zona baja con promedios de 34.28, 27.55, 57.33 y 65.33 ind.m⁻² para los sistemas AA, AC, MONO y TA respectivamente mientras la zona alta presenta en el mismo orden promedios de 10.66, 11.2, 9.77 y 13.33 ind.m⁻². Se presentó significancia en la diferencia de medias del sistema de cultivo AA de zona ALTA y BAJA ($p < 0.0215$), así como entre los arreglos AC y TA ($p < 0.0433$) con promedio de 17.33 y 54.93 ind.m⁻² respectivamente, siendo los sistemas donde se encontraron el menor y mayor número de miriápodos.

Se encontró diferencia significativa en la biomasa de Miriapoda del sistema de cultivo TA de zona alta y baja ($p < 0.0040$) así como también para el sistema de cultivo TA y los demás sistemas en las fincas de zona baja ($p < 0.0201$); el peso promedio de los miriápodos encontrados en el sistema de cultivo TA es de 0,0722 y 0,03897 g.p.f.m⁻² por individuo en las fincas de zona baja y alta respectivamente. En el sistema de cultivo TA se presentan miriápodos de las clases diplópodos y quilópodos, estos últimos son minoría con un 12.5% de presencia.

Para el grupo de Blattaria y para los grupos taxonómicos agrupados en la categoría de “Otros” no se encontraron diferencias significativas en términos de abundancia y biomasa por altura de las fincas ni por sistema de cultivo.

4.3 Población de lombrices de tierra en las fincas muestreadas

En las 33 fincas se encontraron 1603 individuos de lombriz de tierra, se clasificaron en 15 especies pertenecientes a cuatro familias (Glossoscolecidae, Rhinodrilidae, Acanthodrilidae, Megascolecidae), ocho géneros (*Glossodrilus*, *Martiodrilus*, *Aptodrilus*, *Periscoles*, *Pontoscolex*, *Dicogaster*, *Amynthas*, *Perionix*) y cuatro subgéneros (*Maipure*, *Pontoscolex*, *Amynthas*, *Diplotheodrilus*), de las cuales ocho son nativas y siete son exóticas (Feijoo, Zuluaga y Molina, 2018). El mayor número de especies (12) corresponde a las halladas en el sistema de cultivo de plátano asociado a Café (AC), seguido del sistema tradicional (TA) con 10 especies, plátano asociado con Árboles (AA) con nueve y monocultivo (MONO) con ocho especies (Tabla 4).

El mayor número de individuo se halló en las fincas 26 (AA de zona baja, con 354 individuos), 30 (AA de zona alta, con 196 individuos) y 27 (AC de zona alta, con 145 individuos). Así mismo, las fincas con menor presencia de Oligochaeta fueron la 28 (MONO de zona alta, con 5 individuos) y la 9, 12 y 24 (TA, AA y TA de zona baja respectivamente con 0 individuos).

La especie dominante en todos los arreglos independiente de la práctica de cultivo ligada al sistema fue *P. corethrurus* con 1255 individuos equivalentes al 78.29% de las lombrices identificadas, esta especie exótica se reproduce y convive con las especies nativas en todos los sistemas de cultivo analizados (Tabla 3). El sistema de cultivo AA registra 4 especies nativas y 5 exóticas, el sistema AC: 7 nativas y 5 exóticas, el MONO 3 nativas y 5 exóticas y el sistema TA: 4 nativas y 6 exóticas.

La mayoría de especies encontradas (ocho) corresponden a la categoría ecológica epígea y los siete restantes son endógeas; por tanto, la mayoría vive en la superficie del suelo (Feijoo, en preparación).

En cuanto a la frecuencia para los cuatro sistemas de cultivo, se presenta un porcentaje alto para la especie *Pontoscolex corethrurus* especialmente en el arreglo de tipo Monocultivo (54,8%), seguidamente la especie *Dichogaster (Diplotheodrilus) affinis* que tiene un porcentaje representativo dentro del arreglo AA (25,0%). La especie menos abundante fue *Periscolex coreguaje*, de la cual sólo se encontró un individuo (0.1%) (Tabla 5).

Tabla 4. Especies de lombriz de tierra identificadas por sistemas de cultivo, categoría ecológica y frecuencia de ocurrencia en cultivos de plátano en el Eje Cafetero.

ESPECIE	CS	N/E	EC	#IxS	#OS
Rhinodrilidae					
<i>Aptodrilus fuhrmanni</i> (Michaelsen, 1918)	AC	N	En	6	3
<i>Martiodrilus (Maipure) quimbayaensis</i> (Feijoo et al., 2011)	AC	N	E	4	1
<i>Periscolex columbianus</i> (Michaelsen, 1900a)	AC, TA	N	E	8	8
<i>Periscolex coreguaje</i> (Feijoo and Celis, 2011)	AA	N	E	1	1
<i>Pontoscolex corethrurus</i> (Müller, 1857)	AA, AC, MONO, TA	E	En	1255	99
Megascolecidae					
<i>Amyntas gracilis</i> (Kinberg, 1867)	AA, AC, MONO, TA	E	E	38	20
<i>Amyntas minimus</i> (Horst, 1893)	AA, MONO,	E	En	5	2
<i>Perionyx excavatus</i> (Perrier, 1872)	AC, TA	E	E	15	7
Glossoscolecidae					
<i>Glossodrilus griseus</i> (Zicsi and Feijoo, 1994)	AA, AC, MONO, TA	N	En	72	20
<i>Glossodrilus lacteus</i> (Zicsi and Feijoo, 1994)	AA, AC, MONO, TA	N	En	38	7

<i>Glossodrilus panikita</i> (Righi, 1995)	AC	N	En	13	7
<i>Glossodrilus chaguala</i> (Feijoo et al., 2011)	AA, AC, MONO, TA	N	En	8	3
Acanthodrilidae					
<i>Dichogaster (Diplotheodrilus) affinis</i> (Michaelsen, 1890)	AA, AC, MONO, TA	E	E	93	28
<i>Dichogaster (Diplotheodrilus) bolau</i> (Michaelsen, 1890)	TA	E	E	5	1
<i>Dichogaster (Diplotheodrilus) saliens</i> (Beddard, 1893)	AA, AC, MONO, TA	E	E	42	17

Tabla 5. Número de individuos (ind.m⁻²) de cada especie en cada uno de los muestreos para las 33 fincas.

ESPECIE	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<i>Pontoscolex corethrurus (ex)</i>	140	326	197	123	246	223
<i>Aptodrilus fuhrmanni</i>	4	0	0	2	0	0
<i>Amyntas gracilis (ex)</i>	3	4	15	5	5	6
<i>Dichogaster (Diplotheodrilus) affinis (ex)</i>	5	18	4	37	5	24
<i>Glossodrilus griseus</i>	31	5	1	6	6	23
<i>Periscolex coreguaje</i>	0	0	1	0	0	0
<i>Dichogaster (Diplotheodrilus) bolau (ex)</i>	0	0	0	0	0	5
<i>Perionyx excavatus (ex)</i>	8	1	1	1	0	4
<i>Dichogaster (Diplotheodrilus) saliens (ex)</i>	8	8	11	6	5	4
<i>Glossodrilus lacteus</i>	19	1	0	9	1	8
<i>Periscolex columbianus</i>	2	2	1	0	1	2
<i>Martiodrilus (Maipure) quimbayaensis (n)</i>	0	0	0	4	0	0
<i>Glossodrilus chaguala (n)</i>	3	0	0	3	2	0
<i>Amyntas minimus (ex)</i>	0	2	0	0	3	0

ESPECIE	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<i>Glossodrilus panikita</i>	0	9	0	0	0	4
TOTAL	223	376	231	196	274	303

(ex): especie exótica. (n) especie nueva (Feijoo, et al., 2018).

4.4 Análisis de macrofauna como indicadores de impacto basado en el esquema DPSIR

Con el fin de esquematizar los resultados de los componentes anteriores y la información recolectada sobre características propias de cada sistema de cultivo se consolida la propuesta de utilización del esquema DPSIR (Tabla 6), donde se propone lo siguiente:

- “Driver” o motor de cambio en el presente modelo es identificado como cada uno de los sistemas de cultivo de plátano estudiados: AA, Plátano asociado con aguacate y otros frutales; AC, Plátano asociado con café; MONO, Plátano monocultivo y; TA, Plátano tradicional.
- La “Presión” es entendida como las características propias de cada sistema incluyendo datos de producción, las cuales fueron descritas por el agricultor en cada caso.
- El “Estado” se constituye en los resultados de los muestreos en términos de riqueza, abundancia y biomasa, así como también el registro de especies de lombriz de tierra.
- El “Impacto” retoma los resultados hallados por Gómez y López (2016) determinados con base en el manejo, intensidad y frecuencia de los estilos de hacer agricultura.
- La “Respuesta” son medidas propuestas para mejorar el estado, en este caso de las comunidades de macrofauna, a través de cambios en las prácticas del sistema de cultivo.

Tabla 6. Esquema DPSIR

Driver o motor de cambio	Presión	Estado	Impacto	Respuesta
Sistema de cultivo AA	Densidad de siembra 1481 plantas/ha (Segunda menor)	Riqueza menor 7 UT, menor riqueza promedio (9.5 UT)	-Alteración en la estructura y composición del suelo -Disminución de la calidad del suelo -Pérdida de biodiversidad -Disminución de las ganancias al productor	- Incentivos a buenas prácticas de manejo.
	Desinfección de colinos con Furadan y cal	Mayor abundancia macrofauna con promedio de 289.62 ind.m ²		- Siembra de especies que aporten más nitrógeno como Leucaena.
	Frecuencia de “deshije” con la separación de los colinos vigorosos cinco veces por año.	Domina Oligochaeta y Coleópteros, menor presencia de Hemípteros.		- Transición a sistemas de café asociado.
	Frecuencia de “deshoje” o poda de las hojas dobladas, secas o enfermas 23 días.	Más individuos en zona Alta.		- Diversificación de especies arbóreas.
	Control de arvenses con azadón, guadaña y glifosato.	Diferencia significativa en abundancia de Oligochaeta según altura (mayor en zona alta que en baja).		- Disminución de las prácticas de arado.
	Fertilización con Drench, DAP, Plat y Úrea.	Diferencia significativa en abundancia de Miriápoda por altura (mayor en zona baja que alta).		
	Selección y recolección de los frutos cada 15 días. El peso promedio de los racimos es de 13 kg.	Se encontraron nueve especies de lombrices de las cuales el 86.64% son <i>P.corethrurus</i> . 4 especies nativas y 5 exóticas. En este sistema se encuentra la finca donde se halló el mayor número de lombrices. Sistema con presencia representativa de la especie <i>Dichogaster (Diplotheodorilus) affinis</i> .		
Sistema de cultivo AC	Densidad de siembra 1600 plantas/ha	Mayor riqueza con 17 UT, en promedio 10.2 UT.	-Alteración en la estructura y	- Incentivos a buenas prácticas de manejo.

	Desinfección de colinos con específico, Lorsban y yodo.	Abundancia promedio de 230.66 ind.m ²	composición del suelo	- Valor agregado al producto por favorecer la conservación de biodiversidad.
	Frecuencia de “deshije” con la separación de los colinos vigorosos 4 veces por año.	Dominancia de Oligochaeta y Coleópteros Menor representación de Blattaria	-Alteración del nicho de macrofauna	
	Frecuencia de “deshoje” o poda de las hojas dobladas, secas o enfermas 30 días.	Más individuos en zona alta. Mayor abundancia promedio de Coleópteros.	-Disminución de la fertilidad del suelo	
	Control de arvenses con guadaña, Glifosato y machete.	Diferencia significativa por mayor abundancia y biomasa promedio de Hemíptera con relación a los otros sistemas.		
	Fertilización con Úrea, Triple 15, DAP, KCl, PLAT.	Menor presencia de Miriápoda.		
	Selección y recolección de los frutos cada 15 días. El peso promedio de los racimos es de 13 kg.	Mayor diversidad de lombrices, se encontraron 12 especies (70.05% <i>P. corethrurus</i>). 7 especies nativas y 5 exóticas.		
Sistema de cultivo MONO	Densidad de siembra 1666 plantas/ha (Mayor densidad)	Riqueza 14 UT en promedio 11 UT.	-Variación de las condiciones biofísicas del suelo	- Incentivos a buenas prácticas de manejo.
	Desinfección de colinos con Específico, Lorsban, cal y yodo.	Dominancia de Oligochaeta y Coleópteros y menor presencia de Hemípteros	-Destrucción de la vegetación y pérdida de la biodiversidad	- Implementación de corredores arbóreos funcionales y/o diversificación de especies arbóreas.
	Frecuencia de “deshije” con la separación de los colinos vigorosos 6 veces por año.	Segunda en abundancia con un promedio de 270.85 ind.m ²		
	Frecuencia de “deshoje” o poda de las hojas dobladas, secas o enfermas 18 días.	Más individuos en zona baja. Único sistema donde no hay diferencia significativa entre biomasa de Oligochaeta en zona alta y baja.	-Compactación y desagregación del suelo	- Transición a sistemas de café asociado.
	Control de arvenses con guadaña y Glifosato.	Mayor promedio de biomasa de Coleópteros especialmente en zona alta.	-Pérdida de relevo generacional y continuidad de prácticas agrícolas	- Exigencia de algún tipo de compensación ambiental por parte de la autoridad
	Fertilización con Úrea, DAP, KCl, PLAT.			
	Selección y recolección de los frutos cada 15 días.			

	El peso promedio de los racimos es de 16 kg.	Menor abundancia y biomasa promedio de Hemíptera en zona baja.		
		Se encontraron ocho especies de lombrices, 82.03% <i>P. corethrurus</i> . De las cuales 3 son nativas y 5 exóticas.		
		En este sistema se encuentra la finca donde se halló el menor número de lombrices.		
Sistema de cultivo TA	Densidad de siembra 1001 plantas/ha (Menor densidad)	Segunda mayor riqueza 15 UT en promedio 10.7 UT.	-Variación en las condiciones biofísicas del suelo	- Incentivos a buenas prácticas de manejo.
	No realiza desinfección de colinos.	Dominancia de Oligochaeta seguida de Miriápodos y menor presencia de Hemípteros		- Diversificación de especies arbóreas.
	Frecuencia de “deshije” con la separación de los colinos vigorosos 6 veces por año.	Menor en abundancia con un promedio de 218.93 ind.m ²	-Destrucción de la vegetación y pérdida de la biodiversidad	- Siembra de especies que aporten más nitrógeno como Leucaena.
	Frecuencia de “deshoje” o poda de las hojas dobladas, secas o enfermas 40 días.	Más individuos en zona alta.		
	Control de arvenses con guadaña y machete.	Diferencia significativa en abundancia de Oligochaeta mayor en zona alta que en baja.	-Disminución en las ganancias del productor	
	Tipo de fertilizante sin precisar.	Menor biomasa promedio de Coleópteros, especialmente en zona baja.		
	Selección y recolección de los frutos cada 20 días.	Baja presencia comparativa de Hemíptera en zona baja.		
	El peso promedio de los racimos es de 14 kg.	Mayor abundancia y biomasa promedio de Miriápoda, especialmente en zona baja.		
		Diferencia significativa en peso de Miriapoda zona alta y baja siendo mayor en esta última.		
		Mayor presencia de Miriápodos diplópodos que quilópodos.		
		Se encontraron 10 especies de lombrices. (sólo el 64.09% <i>P. corethrurus</i>). 4 nativas y 6 exóticas.		

5. DISCUSIÓN

5.1 Relación entre macrofauna del suelo y sistemas de cultivo de plátano

En la relación entre macrofauna del suelo y sistemas de cultivo de plátano no se encontraron diferencias significativas en las categorías de macrofauna según el tipo de cultivo, excepto por la biomasa de Hemípteros con un marcado aumento en el peso promedio colectado en el sistema AC. El promedio de individuos/m⁻² fue superior en los sistemas de cultivo AA mientras el menor promedio fue hallado en los sistemas AC.

La abundancia de macrofauna del suelo aumentó de manera significativa con la altura sobre el nivel del mar resaltando el incremento de Oligochaeta de un promedio de 1448 ind. m⁻² en zona baja a 1601 ind. m⁻² en la zona alta. La temperatura puede explicar esta tendencia, también la exposición a la luz y la cantidad de materia orgánica; en ese sentido el presente estudio mostró afinidad de la fauna edáfica con los sistemas de cultivo ricos en vegetación arbórea; los sistemas tradicional y asociado con café muestran mayor abundancia y riqueza de fauna edáfica que el monocultivo y el asocio con árboles frutales (Santos et al., 2016), por tanto, pueden ser recomendados como sistemas más conservacionistas que minimizan el impacto de la agricultura.

El uso de la tierra muestra tener una influencia significativa en la riqueza de fauna edáfica (Keith et al., 2012); en todos los sistemas de cultivo, el grupo taxonómico predominante fue Oligochaeta seguido de Coleóptera y el de menor presentación fue Hemíptera, excepto en el sistema AC en el que Blataria se constituye como el grupo de menor presencia, este último aspecto puede deberse a que los detritívoros, como el caso de Blataria, son organismos desprotegidos en la superficie del suelo, se reducen por las variaciones bruscas en las condiciones de temperatura y humedad debido a la menor cobertura y cantidad de residuos y a una mayor exposición a la radiación solar en aquellos ecosistemas alterados (Cabrera, Robaina y Ponce, 2011) de ahí que se haya presentado una comunidad reducida en el sistema AC respecto a los otros sistemas de cultivo por mayor exposición solar.

El sistema de cultivo en asocio con café muestra las mayores cifras en riqueza taxonómica, mayor diversidad de lombrices, mayor número de especies de lombrices de tierra nativas, menor presencia de miriápodos y mayor abundancia de hemípteros. Éstos últimos corresponden al único grupo taxonómico que muestra diferencia significativa por cultivo.

5.2 Efecto de la altura de los sistemas de cultivo en los macrofauna del suelo

Se encontró que la abundancia y biomasa de macrofauna aumentó con la altura, por lo tanto, en las fincas situadas en la zona alta (por encima de los 1300 m.s.n.m), en todos los

sistemas de cultivo excepto en MONO, los valores fueron superiores; esto se debió al predominio de la especie *P. corethrurus*, la cual se adapta a espacios con alta intervención humana y en sistemas simplificados en los que se aplican insumos agrícolas tales como plaguicidas y fertilizantes.

En igual sentido, la presencia de Oligochaeta es significativamente superior en las fincas ubicadas en la zona ALTA con diferencias significativas entre los sistemas de cultivo tanto para abundancia como para biomasa, siendo los sistemas AA y Mono superiores en número de individuos y los sistemas AA y AC superiores en biomasa sobre TA y MONO.

Los Coleópteros no presentan diferencias significativas en la abundancia según sistemas de cultivo, pero sí para la biomasa siendo mayor en el sistema MONO y menor en AA lo que puede deberse a la competencia con la especie Oligochaeta que siendo un poco menos abundante en monocultivo, permite a los coleópteros alcanzar un mayor tamaño, tendencia contraria en sistema asociado a árboles frutales donde las lombrices alcanzan su mayor representatividad y por tanto impiden el crecimiento de coleópteros.

Para Miriápoda y Hemíptera se encontraron diferencias significativas más marcadas para la biomasa que para la abundancia según el sistema de cultivo y la altura de la finca, más peso encontrado en sistemas TA y AC respectivamente, esta tendencia puede estar influenciada por la menor prevalencia de la especie *P. corethrurus* en estos dos sistemas de cultivo, lo que permite un mayor crecimiento de éstos grupos taxonómicos contrario a sistemas como MONO y AA donde la especie exótica compite por el nicho. La abundancia y biomasa de los grupos agrupados en la categoría de Otros y Blattaria no presentaron diferencias significativas.

La macrofauna herbívora, como coleópteros y hemípteros, son el grupo más beneficiado de la ausencia de lombrices de tierra, especialmente en temperaturas cálidas, esto puede deberse a la actividad constante de las lombrices moviendo material a las capas más profundas del suelo, esto hace más difícil el acceso a especies mayores de herbívoros quienes viven principalmente cerca de la superficie. Esto sugiere que las estructuras creadas por las lombrices cobran importancia para los animales más pequeños, mientras especies mayores pueden tomar ventaja cuando las lombrices disminuyen (Siebert et al, 2019). En consecuencia, se puede afirmar que las prácticas agrícolas que soporta altas densidades de lombrices pueden mitigar parcialmente efectos climáticos sobre algunos de los componentes de la biodiversidad del suelo, a saber, suelo meso-y macrofauna, que son cruciales para el aprovisionamiento de producción agrícola sostenible.

Los resultados de este estudio en cuanto la relación entre altura del cultivo y abundancia de macrofauna contrasta con estudios previos: Roten et al. 2013 encontró una correlación negativa entre la abundancia y biomasa de lombrices con la elevación mientras Karungi et

al. 2018, halló que la abundancia de lombrices siguió una tendencia diferente según el tipo de cultivo. Algunos de estos resultados pueden ser explicados por la temperatura ambiente, la intensidad de luz y la conductividad eléctrica del suelo en los sistemas de cultivo.

5.3 Población de lombrices de tierra

Específicamente para el orden Oligochaeta, la presencia de lombrices de tierra pertenecientes a este orden se considera un buen indicador de la ausencia de disturbios como intensificación del uso del suelo y contaminación por metales (Nahmani and Lavelle, 2002; Pérès et al., 2011; Cluzeau et al., 2012). La distribución de lombrices de tierra (exóticas de común distribución en suelos intervenidos y especies nativas más comunes en suelos sin disturbios), ha sido observada previamente en los neotrópicos (Callaham, Richter, Coleman y Hofmockel, 2006), el mecanismo exacto tras la preferencia aparente de las lombrices exóticas por suelos intervenidos no es claro, pero puede estar relacionado con características asociadas al manejo de los suelos tales como fertilización, adición de cal, abonos orgánicos o en general a tolerancia a los disturbios, o disminución de la competencia con especies nativas desplazadas a raíz de los mismos.

La especie dominante en todos los sistemas de cultivo del presente estudio fue *P.corethrurus* por lo que se puede concluir que las prácticas de cultivo ligadas al tipo de arreglo no son limitantes para que esta especie exótica se reproduzca y se convierte en un indicador del impacto de la introducción de agroecosistemas de cultivo de plátano sobre las lombrices nativas, a quienes suele desplazar y ocupar sus nichos (García y Escobar, 2018).

El sistema de cultivo determina una relación eficiente o deficiente en relación con la fauna edáfica, el uso de maquinaria para la transformación del suelo, la labranza indiscriminada, el uso de agroquímicos y los cultivos intensivos son los principales referentes de impactos negativos sobre las comunidades de lombrices de tierra (Juárez y Fragoso, 2014), es así como el sistema Monocultivo (MONO), con una alta intervención antrópica, presenta la menor cantidad de lombrices en términos de abundancia y biomasa, así como el menor número de especies identificadas, un alto porcentaje de ellas correspondiente a *P.corethrurus* (82.03%). Por el contrario, el sistema de cultivo Tradicional (TA) muestra menor intervención por labranza y utilización de químicos y aunque no sobresale por la abundancia de lombrices de tierra, es el cultivo que conserva el mayor número de especies nativas y el menor porcentaje de dominancia de *P. corethrurus* con el 64.09%

Este estudio, al igual que los resultados del estudio de García y Escobar (2018) permitieron constatar que la especie dominante, no sólo en gran parte de las fincas sino también en

todos los sistemas de cultivo de plátano en el Quindío fue *P. corethrurus*, esta especie exótica vive en los primeros 20 cm del suelo, un medio más amortiguado en el que puede aumentar su densidad de población por la menor alteración de los estratos del suelo y mayor humedad, además no requiere grandes cantidades de carbono orgánico para subsistir ya que son geófagas (Marín y Feijoo 2005). Los resultados concuerdan también con lo obtenido por Sánchez et al. en el 2006, los cuales estudiaron agroecosistemas con sombra y a plena exposición solar y esta especie representó del 76 al 100% de la densidad de lombrices en todos los tratamientos estudiados. Otros agroecosistemas con altos grados de degradación también han estado dominados por esta especie hasta en un 96% (Huerta et al. 2005).

Cuanto mayor es la intervención en el sistema de cultivo, mayor prevalencia de esta especie encontrándose en mayor medida, para el presente estudio, en los sistemas asociado con árboles (AA), el monocultivo (MONO) y asociado a café (AC) y en menor porcentaje en el sistema tradicional (TA), como también fue hallado así por diversos autores (Rodríguez, 2000; Feijoo et al., 2007) donde el comportamiento de las lombrices de tierra indicó el nivel de intervención antrópica por la intensidad de uso de la tierra y el grado de perturbación del medio edáfico al evaluar el cambio de estas comunidades ante el impacto de diferentes usos de la tierra y el efecto de distintos manejos del terreno en el trópico.

La temperatura y la densidad de lombrices ejercen un efecto significativo en la riqueza de meso y macrofauna, las temperaturas elevadas aumentan la riqueza de taxones y disminuye la abundancia de lombrices. Esto puede ser debido a un detrimento en las condiciones del suelo para muchas especies, el calentamiento disminuye la humedad del suelo, aumenta la evapotranspiración y por ende menor abundancia de lombrices pueden reducir posteriormente la riqueza taxonómica por la simplificación de los microhabitats y la movilización de organismos escapando de condiciones desfavorables del suelo hacia capas inferiores (Siebert et al, 2019).

La más alta diversidad de macrofauna fue encontrada a elevadas temperaturas, la presencia de lombrices podría contribuir a revertir el efecto negativo del calentamiento en la riqueza taxonómica. Es necesario un estudio a mayor escala ya que el paisaje que rodea los sistemas de cultivo debe tenerse en cuenta para entender la variabilidad de la composición de las comunidades (Vincent et al., 2018).

5.4 DPSIR como herramienta conceptual

Para consolidar los resultados del estudio, el esquema DPSIR resultó ser una herramienta útil al momento de conceptualizar los cambios ocurridos a la macrofauna por las prácticas agrícolas de cada sistema de cultivo, facilitó la presentación de los resultados de investigación en una forma comprensible y accesible a todas las partes interesadas

(Tschering et al., 2012) y ayudó a organizar la generación de conocimiento sobre interacciones ecológicas y procesos sociales, predecir cambios y soportar las prácticas de manejo empleadas.

Numerosos métodos de conceptualización y esquemas han sido desarrollados para ser aplicados en el amplio campo de las evaluaciones ambientales, estas aproximaciones incluyen: diagramas de causa y efecto, diagramas de flujo y mapas mentales, esquemas institucionales de análisis y desarrollo entre otros (Ness et al, 2010). Muchos problemas ambientales tienen causas y soluciones que abarcan múltiples niveles, el presente esquema permite la manera de estructurar las relaciones multi-nivel mientras conduce a un análisis más detallado a través de la exploración de causas específicas para cada nivel, enfatizando en aspectos importantes tales como los motores de cambio e intentos de posibles soluciones que hayan tenido lugar.

El modelo DPSIR es general y aplicable a muchos campos de acción y su resultado será diferente según la aproximación definida. Existen críticas sobre este esquema y sus predecesores dirigidas a la simplificación, linealidad y la dificultad en el manejo de parámetros que pueden actuar tanto como motores de cambio así como respuesta (Klijin 2004), un ejemplo de ello es la predominancia de *P. corethrurus* como especie invasora, presentada en este trabajo como respuesta a las prácticas de cultivo pero que también podría corresponder a condición de motor de cambio si la aproximación del esquema DPSIR se quisiera presentar a escala diferente.

También se argumenta que hay una deficiencia en la capacidad del esquema para abarcar las relaciones multidimensionales y multi nivel de los problemas; muchos temas de sostenibilidad están caracterizados por dinámicas complejas de escala, espacio y tiempo exacerbadas por múltiples motores de cambio naturales y antropogénicos (Ness et al, 2010). Los sistemas de cultivo, por ejemplo, son ecosistemas complejos que están influenciados por motores de cambio directos e indirectos y actuando a diferentes escalas, debemos decidir cuando y donde de la red de causa y efecto, podemos y debemos intervenir. Teniendo en cuenta estas consideraciones, aun así, el modelo resulta bastante útil.

La esquemización presentada en este estudio, sigue una conceptualización similar a la propuesta por Rodríguez, Binimelis y Monterroso (2009) para presentar el análisis de las implicaciones de especies invasoras en múltiples niveles utilizando el DPSIR, al igual que dichos autores, la presión se presenta como respuesta a actividades humanas que actúan como motor de cambio, tiene el potencial de influir sobre el uso de los recursos, la intensidad y la frecuencia de los disturbios (densidad de siembra, frecuencia de deshoje, fertilización, etc.); el estado o indicadores del estado dan una idea de la condición del

ecosistema en términos biológicos como riqueza, abundancia, densidad etc.; el impacto con énfasis en la percepción humana con alto estrés ecológico aunque poco efecto socio-económico palpable y finalmente la respuesta que puede ser de mitigación o adaptación dependiendo del estado de afectación del sistema.

La respuesta, que básicamente corresponde a cambios estratégicos en dichas prácticas de manejo, podrá ser cuantificable con el paso de los años, incluye también normas y regulaciones para los agricultores y partes interesadas, así como incentivos a las buenas prácticas agrícolas que hagan sustentable la actividad en el campo, esto podría repercutir en impuestos, sanciones, subvenciones, etc. El uso de este esquema como instrumento puede soportar la decisión de asistir a los agricultores en la apropiación de respuestas positivas a impactos negativos (Smaling et al., 2006) a través de prácticas sustentables cambiando decisiones de producción y consumo.

6. CONCLUSIONES

La fauna edáfica muestra una dependencia de la vegetación arbórea existente en los cultivos y está influenciada por la altura de la finca y el sistema de cultivo. Los resultados presentados muestran como la conversión de sistemas de cultivo tradicionales a monocultivos disminuye la abundancia de macrofauna, así como la altura del cultivo sobre el nivel del mar y la presencia de vegetación arbórea incrementa su número.

La macrofauna se adapta a un amplio rango de condiciones ecológicas, por lo tanto, solo un alto gradiente ambiental puede tener efecto contundente en sus comunidades. Por eso, el conocimiento de las relaciones entre macrofauna y el ambiente es de crucial importancia en el entendimiento del funcionamiento de los ecosistemas.

La especie *P. corethrurus* fue la más representativa independiente del tipo de cultivo y ya que todas las fincas presentan algún grado de perturbación, se comprueba su utilidad como indicador de ecosistemas perturbados. La prevalencia de esta especie exótica evidencia también la presión sobre especies nativas resaltando la importancia de estudiar y anticipar las implicaciones de éste fenómeno sobre la biodiversidad.

Futuras investigaciones deberán relacionar la composición taxonómica y funcional de la macrofauna con factores climáticos y pedológicos; todo ello con la finalidad de identificar índices que puedan ser generalizados y aplicados en una gama más amplia de tipos de suelo y usos de la tierra. Es evidente que existen aún vacíos significativos en el conocimiento relacionado con la identificación de los efectos de la relación entre especies y sistemas de cultivo.

Se comprobó el potencial del esquema DSPIR para estructurar problemas cotidianos y presentar los resultados de estudios e investigaciones de forma accesible y fácil de utilizar. El mismo modelo conceptual debe diseñarse bajo diferentes escalas, modificando el motor de cambio según el nivel de análisis necesario.

7. DISCUSIÓN GENERAL

La macrofauna es a la vez actor e indicador de la calidad del suelo (Lavelle et al., 2006), ha sido ampliamente documentado como ejerce influencia sobre muchas propiedades del suelo, pero a su vez, la distribución de especies puede ser influenciada por las mismas. Por ejemplo, ha sido probada una relación entre la densidad de Formicidae e Isoptera con los niveles de agua utilizable por las plantas en el suelo y la macroporosidad lo que sugiere que estas taxas influyen de alguna forma, los servicios ecosistémicos en los que inciden estas propiedades (Cowan et al., 1985). Por el contrario, especies del orden Chilopoda o

Diplopoda toman ventaja de la existencia de condiciones de bosque, estas especies son consideradas más como indicadoras que como actoras en los servicios ecosistémicos del suelo.

Por otra parte, la invasión de *P. corethrurus*, encontrada también en el presente estudio, resulta en un incremento significativo de macroagregados del suelo debido a la elevada producción de heces sólidas (Lavelle et al., 1994), se encuentra también una relación significativa entre la densidad de lombrices y la macroporosidad del suelo consistente con los efectos conocidos de la excavación y actividades de bioturbación (Blouin et al., 2013). En contraste, la covariación con carbón de suelo superficial en la biomasa de plantas, pone de relevancia el hecho que la densidad de lombrices nativas es superior en bosques que en otros usos del suelo (Fragoso et al., 1997; Marichal et al., 2010).

Los resultados encontrados en la identificación de las especies de lombriz de tierra, pone en evidencia cómo especies exóticas aprovechan las condiciones de transformación para establecerse e incidir en el desplazamiento de especies nativas. La afectación a ciertas especies no es negativa directamente, pero en conjunto estas nuevas modificaciones tanto estructurales como en términos de especies, termina siendo perjudicial para las especies nativas (Feijoo et al., 2004).

El cambio, el tipo de uso de la tierra afecta la estructura y composición de las comunidades de macrofauna, así lo documenta también Feijoo (2001) al caracterizar la fauna en diez ecosistemas del sur de Colombia y el norte de Brasil donde se evidenció cómo actividades de crianza de ganado o sistemas de cultivo redujo drásticamente la diversidad de la macrofauna comparada con la Selva Secundaria, explica igualmente que la conversión de sistemas naturales en sistemas intensivos de producción, reducen la biodiversidad y favorecen la desaparición de grupos funcionales claves de descomponedores y de productores; al modificarse las coberturas aérea y superficial del suelo, se simplifican las fuentes alimentarias y la estructura del detrito proceso que se manifiesta como reducción en la riqueza de especies, densidad y biomasa.

En el mismo sentido, un estudio sobre abundancia y diversidad de macrofauna en huertas caseras de México, concluyó que la composición de la comunidad de macrofauna estaba determinada más por las propiedades generales del suelo y las características estructurales de la vegetación que por las especies de plantas en ellos. Se encontró una relación entre la composición forestal y la abundancia de especies de macrofauna (Huerta et al., 2012).

Adicionalmente, se confirmó el potencial del esquema DPSIR y las posibilidades de uso del modelo en investigaciones científicas con el fin de mostrar a los interesados de forma clara las relaciones causa-efecto que permita tomar decisiones basadas en hechos concretos

y evidencias. Ofrece la oportunidad de disminuir la brecha entre los descubrimientos científicos con aspectos de la vida real, así como investigadores con tomadores de decisión.

El uso de este esquema evidenció cómo las investigaciones pueden ayudar en la toma de decisiones, con esta propuesta, se integran los actores principales como agricultores, investigadores y responsables de decisión en todas las etapas del proceso. La participación de los usuarios finales, especialmente en el diseño del esquema, es de vital importancia para su aceptación y garantizar así que se ponga en práctica el producto final ya que permite a los investigadores participar activamente en la toma de decisiones y/o que los ciudadanos participen en las investigaciones.

Con estudios de esta naturaleza aumentamos el conocimiento de las complejas interacciones entre la fauna edáfica y los sistemas de cultivo, las contribuciones futuras, en esta línea de investigación y en estudios enfocados en los grupos funcionales de fauna edáfica, permitirán identificar posibles consecuencias en el funcionamiento del suelo y predecir la respuesta de la fauna edáfica a las influencias antropogénicas en este y otros campos.

REFERENCIAS

- Anderson J., Ingram, J. (1993). Tropical soil biology and fertility: A Handbook of methods. Wallingford, CAB. pp. 221.
- Barros, E., Neves, A., Blanchart, E., Fernandes, E.C.M., Wandelli, E., Lavelle, P. (2003). Development of the soil macrofauna community under silvopastoral and agrosilvicultural systems in Amazonia. *Pedobiologia* (47) 273-280.
- Blouin, M., Hodson, M., Aranda, E., Baker, G., Brussard, L., Butt, K., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J., Cluzeau, D., Brun J. (2013). Earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*. 161-182.
- Cabrera, G., Robaina, N., Ponce de León, D. (2011). Composición funcional de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes* (34) 331-346.
- Cabrera, G. (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes* (35) No 4.
- Callahan, M., Richter, Jr., Coleman, D., Hofmockel, M. (2006). Long-term land use effects on soil invertebrate communities in Southern Piedmont soils, USA. *European Journal of Soil Biology*. (42) 150-156.
- Cluzeau, D., Guernion, M., Chaussod, R., Martin-Laurent, F., Villenave, C., Cortet, J., Ruiz-Camacho, N., Pernin, C., Mateille, T., Philippot, L., Bellido, A., Rougé, L., Arrouays, D., Bispo, A., Pérès, G. (2012). Integration of biodiversity in soil quality monitoring: baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology*, (49) 63–72.
- Cotan, S. (2007). Valoración de Impactos Ambientales. Director de División del Medio Ambiente. INERCO. Sevilla.
http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48150/componente48148.pdf.
Consultado en 10.04.19.
- Cowan, J. Humphreys, G., Mitchell, P. (1985). An assessment of pedoturbation by two species of mound-building ants, *Camponotus intrepidus* and *Iridomyrmex purpureus*. *Australian Journal of Soil Research*. (22) 95-107.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario SIPSA. (2014). Boletín mensual. Insumos y factores asociados a la

producción agropecuaria. Colombia.
[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos factores de produccion abr 2014.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_abr_2014.pdf). Consultado en 14.09.18

- Domínguez, A., Jiménez, J., Ortíz, C., Bedano, J. (2018). Soil macrofauna diversity as a key element for building sustainable agriculture in Argentine Pampas. *Acta Oecológica* (92) 102-116.
- Doran, J., Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality for sustainable environment. *Soil Science Society of America*. 3-21.
- Feijoo, A. (2001). Impacto del uso de la tierra en áreas de ladera sobre comunidades de macrofauna del suelo (Caldono, Cauca – Colombia). Universidad Nacional de Colombia.
- Feijoo, A., Quintero, H., Fragoso, C., Moreno, A. (2004). Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (Annelida, Oligochaeta) en Colombia. Disponible en línea: <http://www.redalyc.org/pdf/575/57520213.pdf>
- Feijoo, A., Zúñiga, M.C., Quintero, H., Lavelle, P. (2007). Relaciones entre el uso de la tierra y las comunidades de lombrices en la cuenca del río La Vieja, Colombia.
- Feijoo, A., Zuluaga, L., Molina L. (2018). New species and records of earthworms (Annelida, Oligochaeta) in plantain cropping systems in Colombia's coffee-growing region. *Zootaxa* (online edition).
- Fragoso, C., Kanyonyo, J., Moreno, A., Senapati, B., Blanchart, E., y Rodríguez, C. (1999). A survey of tropical earthworms: taxonomy, biogeography and environmental plasticity. Pp 126.
- Frouz, J., Prach, K., Pizl, V., Hanel, L., Stary, J., Tajovsky, K., Materna, J., Balik, V., Kalcik, J., Rehoukova, K. (2008). Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology* (44) 109–121.
- Gabriel, D., Sait, S., Kunin, W., Benton, T. (2013). Food production vs. biodiversity: comparing organic and conventional agriculture. *Journal of Applied ecology*. (50) 355-364.
- García, L., Escobar, A. (2018). Procesos de cambio en la presencia de lombrices de tierra en cultivares de plátano, Eje Cafetero colombiano. Universidad Tecnológica de Pereira. (Tesis de grado).

- Huerta, E., van der Wal, H. (2012). Soil macroinvertebrates abundance and diversity in home gardens in Tabasco, México, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *European Journal of Soil Biology* (50) 68-75.
- Huot, H., Cortet, J., Watteau, F., Milano, V., Nahmani, J., Sirguey, C., Shwartz, C., Morel, J.L. (2018). Diversity and activity of soil fauna in an industrial settling pond managed by natural attenuation. *Applied Soil Ecology* (8) 20-31.
- Imaz, M., Virto, I., Bescansa, P., Enrique, A., Fernandez-Ugalde, O., Karlen, D. (2010). Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil & Tillage Research* (107) 17-25.
- ISO 23611-5. (2011). Soil quality – sampling of soil invertebrates – Part 5: sampling and extraction of soil macro-invertebrates.
- Jørgensen SE. y Mitsch, WJ. (1989). Chapter 3. Ecological Engineering Principles. In: Mitsch, WJ., Jørgensen, SE. 1989. Ecological Engineering. United States of America.
- Juárez, D. Fragoso, C. (2014). Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. Disponible en línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372014000300013
- Karungi, J., Cherukut, S., Ijala, A.R., Tumuhairwe, J., Bibababa-Wabbi, J., Nuppenau, M., Domptail, S., Otte, A. (2018). Elevation and cropping system as drivers of microclimate and abundance of soil macrofauna in coffee farmlands in mountainous ecologies. *Applied Soil Ecology* (132) 126-134.
- Keith, A., Boots, B., Hazard, C., Niechoj, R., Arroyo, J., Bending, G., Bolger, T., Breen, J., Clipson, N., Doohan, F., Griffin, C., Schmidt, O. (2012). Cross taxa congruence, indicators and environmental gradients in soils under agricultural and extensive land management. *European Journal of Soil Biology* (49) 55-62.
- Klijin, J.A. (2004). Driving Forces behind Landscape Transformation in Europe, from a Conceptual Approach to Policy Options. *Springer*, Dordrecht 203-218.
- Kuldna, P., Peterson, K., Poltimäe, H., Luig, J. (2009). An application of DPSIR framework to identify issues of pollinator loss. *Ecological Economics* (69) 32-42.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, W., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers, *European Journal of Soil Biology* (33) 159-193.

- Lavelle, P., Pashanasi, B., Charpentier, F., Gilot, C., Rossi, J.P., Derpuard, L., Andre, J., Ponge, J.F., Bernier, N. (1998). Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics. Edwards CA (ed) *Earthworm ecology*. St. Lucie Press, Boca Raton, pp 103–122.
- Lavelle, P., Spain, A. (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Scientific Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* (42) 3-15.
- Lavelle, P., Rodríguez, Argüello, O., Bernal, J., y Botero, C. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (185) 106-117.
- Levin, M., Kim, K., Morel, J., Burghardt, W., Charzyński, P., Shaw, R. (2017). Soils within cities, global approaches to their sustainable management. *Journal of Land Management, Food and Environmentf* (68) 71-72.
- Liiri, M., Hasa, M., Haimi, J., Setälä, H. (2012). History of land-use intensity can modify the relationship between functional complexity of the soil fauna and soil ecosystem services - A microcosm study. *Applied Soil Ecology* (55) 53-61.
- Marichal, R., Feijoo, A., Praxedes, C., Ruiz, D., Carvajal, A., Oszwald, J., Hurtado M., Brown, G., Grimaldi, M., Desjardins, T., Sarrazin, M., Decaens, T., Velasquez, E., Lavelle, P. (2010). Invasion of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta) in landscapes of the Amazonian deforestation arc. *Applied Soil Ecology* (46) 443-449.
- Marichal, R., Grimaldi, M. (2014). Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. *Applied Soil Ecology* (83) 177-185.
- Marichal, R., Praxedes, C., Decaens, T., Grimaldi, M., Oszwald, J., Brown, G., Desjardins, T., Lopes, M., Feijoo, A., Oliveira, M., Velasquez, E., Lavelle, P. (2017). Earthworm functional traits, landscape degradation and ecosystem services in the Brazilian Amazon deforestation. *European Journal of Soil Biology* (83) 43-51.
- Menta, C. García-Montero, L.G., Conti, F.D., Pinto, S. (2013). The role and diversity of soil fauna in different woodlands. Manzanares L. (ed) *Woodlands: structure, species diversity and sustainable management*. Nova, New York 43-74.

Menta, C., Pinto S. (2016). Biodiversity and Ecology of Soil Fauna in Relation to Truffle. Chapter 19.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2005). Competitividad de las cadenas agroproductivas en Colombia. Análisis de su estructura y dinámica. ObservatorioAgrocadenas.<https://books.google.com.co/books?id=niU32tEHs0C&pg=PA443&lpg=PA443&dq=La+Cadena+productiva+de+pl%C3%A1tano+cuenta+actualmente+con+tres+acuerdos+de+competitividad:+uno+firmado+a+nivel+nacional+en+el+2002&source=bl&ots=CaqZv9cKnH&sig=RSe6LVu9Gcmbs0137KMNkFFwLiE&hl=es19&sa=X&ei=WcXkVKWQLcqmNsegg9gH&ved=0CCYQ6AEwAQ#v=onepage&q=La%20Cadena%20productiva%20de%20pl%C3%A1tano%20cuenta%20actualmente%20con%20tres%20acuerdos%20de%20competitividad%20a%20uno%20firmado%20a%20nivel%20nacional%20en%20el%202002&f=false> . Consultado en 14.09.18

Mitsch, W., Jørgensen, S. (2003). Ecological engineering: A field whose time has come. *Ecological Engineering* (20) 363–377.

Molina, L. (2018). Servicios ecosistémicos de provisión, regulación y culturales en cultivo de plátano, Eje Cafetero colombiano. Universidad Tecnológica de Pereira. (Tesis doctoral).

Morales-Márquez J., Hernández-Hernández R., Sánchez G., Lozano Z., Castro I., Bravo C., Ramirez E., Jimenez-Ballesta R. (2018). Soil macroinvertebrates community and its temporal variation in a well drained savannah of the Venezuelan Llanos. *European Journal of Soil Biology* (84) 19-26.

Müller F., Burkhard, B. (2012). The indicator side of ecosystem services. *Ecosystem Services*, (1) 26-30.

Nahmani, J., Lavelle, P. (2002). Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France. *European Journal of Soil Biology* (38) 297-300.

Ness, B., Anderberg, S., Olsson, L. (2010). Structuring problems in sustainability science: The multi-level DPSIR framework. *Geoforum* (41) 479-488.

Odum, H., Odum, B. (2003). Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering* (20) 339-361.

OECD (2003). Environmental indicators – development and use, Report. Organization of Economic Co-operation and Development. 37 pp.

- Pérès, G., Piron, D., Bellido, A., Goater, C., Cluzeau, D. (2008). Earthworms used as indicators of agricultural managements. *Fresen. Environment Bull.* (17) 1181-1189.
- Pérès, G., Vandembulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L., Cluzeau, D. (2011). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment: an example from the national Bioindicator programme. *Pedobiol. International Journal of Soil Biology* (54) 77–87.
- Rodriguez-Labajos, B., Binimelis, R., Monterroso, I. (2009). Multi-level driving forces of biological invasions. *Ecological Economics.* (69) 63-75.
- Ruiz-Cobo, D. H., Feijoo, A., Rodríguez, C. (2010). Comunidades de marcoinvertebrados edáficos en diferentes sistemas de uso del terreno en la cuenca del Río Otún, Colombia. *Acta zoológica mexicana*, (26) 165-178.
- 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) 81-92.
- Santos D., Santos G., Lima I., Schossier T., Niva C., Marchao R. (2016). Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* (51) 1466-1475.
- Siebert, J., Eisenhauer, N., Poll, C., Marhan, S., Bonkow, M., Hines, J., Koller, R., Ruess, L., Thakur, M. (2019). Earthworms modulate the effects of climate warming on the taxon richness of soil meso and macrofauna in an agricultural system. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* (278) 72- 80.
- Smaling, E.M.A., Dixon, J. (2006). Adding a soil fertility dimension to the global farming systems approach with cases from Africa. *Agriculture. Ecosystems and Environment* (116) 15-26.
- Tsherning, K., Helming, K., Krippner, B., Sieber, S., Gomez, S. (2012). Does research applying the DPSIR framework support decision making? *Land Use Policy* (29) 102-110.
- Turney S., Altshuler L., Whyte L.G., Buddle C. (2018). Macroinvertebrate and soil prokaryote communities in the forest-tundra ecotone of the Subarctic Yukon. *Polar Biology* (41) 1619-1633.

- Van Groenigen, J., Lubbers, I., Vos, H., Brown, G., De Deyn, G. y Van Groenigen, K. (2014). Earthworms increase plant production: a meta-analysis. Disponible en línea: <https://www.nature.com/articles/srep06365>
- Vincent, Q., Leyval, C., Berguiristain, T., Auclerc, A. (2018). Functional structure and composition of Collembola and soil macrofauna communities depend on abiotic parameters in derelict soils. *Applied Soil Ecology*. (130) 32-42.
- Welemariam M., Kebede F., Bedadi B., Birhane E. (2018). The effect of community-based Soil and water conservation practices on abundance and diversity of soil macroinvertebrates in the Northern Highlands of Ethiopia. *Agriculture and Food Security* (7) 2-11.
- Wolters, V. (2000). Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biol Fert Soils* 31(1) 1–19.
- Zuluaga, L. (2017). Interacciones, compensaciones y sinergias entre servicios ecosistémicos en cultivos de plátano, Eje Cafetero Colombiano. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.
- Zúñiga, M.C., Feijoo A.M., Quintero H., Aldana N., Carvajal A. (2013). Farmers perceptions of earthworms and their role in soil. *Applied Soil Ecology* (69) 61-68.