

**Análisis de la concentración de C, N, su relación C/N en suelo, y su influencia  
sobre el contenido de nitratos en aguas superficiales del municipio de Zona  
Bananera (Magdalena)**

Dayana Vanessa Escorcía Ospino



Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería  
2021

**Análisis de la concentración de C, N, su relación C/N en suelo, y su influencia<sup>ii</sup>  
sobre el contenido de nitratos en aguas superficiales del municipio de Zona  
Bananera (Magdalena)**

Dayana Vanessa Escorcía Ospino

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director  
*SONIA ESPERANZA AGUIRRE FORERO*  
Doctor en Ciencias Agropecuarias (*Área Agraria*)



Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería  
2021

---

---

---

---

---

Evaluador 1  
Comité de evaluación

---

Evaluador 2  
Comité de evaluación

---

Evaluador 3  
Comité de evaluación

## Declaratoria de originalidad

iv

Yo, *Dayana Vanessa Escorcía Ospino*, declaro que este trabajo de grado para optar al título de magíster de la Universidad del Magdalena no ha sido presentado para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad.



---

Dayana Vanessa Escorcía Ospino

## **Dedicatoria**

v

A Dios, porque sin él nada de esto hubiera sido posible. Por cumplir a diario su propósito en mi vida, por guiar mis pasos y sostener mi mano aún en los momentos más difíciles.

A mis padres, Olga y Edgardo, por el apoyo y amor incondicional que me demuestran todos los días que me impulsa a seguir cumpliendo mis sueños.

A mi hermana, Angelis, por todos los momentos vividos y aprendizajes adquiridos durante toda la vida. Porque a su lado aprendo constantemente el significado de la paciencia.

A mis tías Indira y Tharvys, y a mi tío Delmides por ser como mis segundos padres y por sus valiosos consejos. A mis abuelas Elena y Celestina, y a mi abuelo Martín porque con su ejemplo me enseñan a actuar sabiamente.

A mis familiares y amigos más cercanos, gracias por las buenas energías y por creer en mí.

## **Agradecimientos**

vi

A Sonia Esperanza Aguirre Forero PhD, asesora de este trabajo, por su apoyo y contribución a mi crecimiento profesional y personal con la realización de este proyecto.

Al programa de Maestría en Ingeniería, en especial al director Jorge Gómez Rojas PhD, a la ingeniera Dailys Castro (antigua coordinadora del programa) y al actual coordinador el ingeniero Alexis Mercado, por su importante y valiosa gestión durante el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad del Magdalena, como entidad financiadora del proyecto.

Al Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, organización de carácter investigativo que llevó a cabo la caracterización analítica de los parámetros químicos seleccionados para este estudio.

A Jaime Rodríguez Curcio y Arturo Rozo Celemín, por todas las experiencias y conocimientos compartidos durante este proceso y por el apoyo recibido en el desarrollo de la investigación.

El presente informe tiene como objetivo analizar la concentración de C, N y su relación C/N en suelo, así como su influencia sobre el contenido de nitratos en aguas superficiales de la Zona Bananera (Magdalena), a través de una investigación cuantitativa con alcance correlacional-explicativo. En el estudio se seleccionaron 24 puntos de muestreo para suelo y 12 sitios de muestreo para aguas superficiales dentro de los límites del municipio, las muestras recolectadas en cada uno de ellos fueron caracterizadas analíticamente en el Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT. Los resultados obtenidos fueron comparados con los estándares de referencia a nivel nacional y sometidos a la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney de comparación de medias para muestras independientes la cual permitió conocer el grado de asociación de las variables estudiadas. De acuerdo a esto se observaron altos contenidos de nitratos en suelo especialmente en aquellos cultivados con banano, lo que evidencia la necesidad de definir estrategias de manejo sostenible para regular las concentraciones de dicho nutriente en el área; además, se encontró una relación estadísticamente significativa entre las variables, comprobando la influencia que tienen las concentraciones de carbono y nitrógeno en suelo sobre los contenidos de nitratos en aguas con medias mayores en el suelo, lo cual indica que el aporte de nutrientes debido a las actividades agrícolas al sistema agua es bajo.

INTRODUCCIÓN .....	1
JUSTIFICACIÓN .....	6
Capítulo 1 Problema de investigación, objetivos y diseño metodológico .....	11
1.1. Situación de interés .....	11
1.2. Objetivos .....	18
1.2.1. General .....	18
1.2.2. Específicos .....	18
1.3. Metodología .....	19
1.3.1. Fase 1: Caracterización de la zona de estudio.....	20
1.3.2. Fase 2: Determinación de los contenidos y niveles de C, N en suelo y agua .....	30
1.3.3. Fase 3: Detección de las afectaciones en el ambiente .....	31
1.3.4. Fase 4: Regulación de las concentraciones de C y N en la zona de estudio .....	33
Capítulo 2 Marco referencial de la investigación .....	34
2.1. Antecedentes y estado del arte .....	34
2.2. Marco teórico o conceptual.....	48
2.2.1. Qué es el suelo y su importancia.....	48
2.2.2. Ciclos de nutrientes.....	49
2.2.3. Implicaciones del cambio climático.....	62
2.2.4. Alternativas de manejo sostenible .....	63
2.2.5. Pruebas no paramétricas .....	64
2.3. Marco contextual .....	68
2.4. Estándares de referencia .....	77
Capítulo 3 Resultados: análisis y discusión.....	79
3.1. Fase 1: Caracterización de la zona de estudio.....	79
3.1.1. Identificación de particularidades del municipio Zona Bananera.....	79
3.2. Fase 2: Determinación de los contenidos y niveles de C, N en suelo y agua .....	120
3.3. Fase 3: Detección de las afectaciones en el ambiente.....	127
3.3.1. Análisis estadístico de los datos de suelo y agua .....	127
3.4. Fase 4: Regulación de las concentraciones de C y N en la zona de estudio .....	141
CONCLUSIONES .....	143
RECOMENDACIONES.....	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo para aguas superficiales .....	21
Tabla 2. Método de recolección y envío de muestras de agua.....	23
Tabla 3. Localización de los sitios de muestreo para suelo (banano, palma y frutales) .....	24
Tabla 4. Localización de los sitios de muestreo para suelo con vegetación de rastrojo .....	25
Tabla 5. Método de recolección y envío de muestras de suelo.....	27
Tabla 6. Parámetros y métodos en agua.....	30
Tabla 7. Parámetros y métodos en suelo.....	30
Tabla 8. Importancia relativa de las fuentes difusas de contaminación por nitrógeno antropogénico. Tomado y adaptado de Eugercios et al. (2017).....	55
Tabla 9. Conformación de la Unidad de suelos RWA.....	73
Tabla 10. Conformación de la Unidad de suelos RWB .....	73
Tabla 11. Conformación de la Unidad de suelos RWG.....	74
Tabla 12. Caracterización analítica de parámetros químicos en aguas superficiales de la Zona Bananera durante la época lluviosa.....	92
Tabla 13. Caracterización analítica de parámetros químicos en suelo de la Zona Bananera en la profundidad de 0-10 cm durante la época lluviosa .....	118
Tabla 14. Caracterización analítica de parámetros químicos en suelo de la Zona Bananera en la profundidad de 10-20 cm durante la época lluviosa .....	119
Tabla 15. Caracterización analítica de parámetros químicos en suelo de la Zona Bananera en las zonas de ladera durante la época lluviosa .....	120
Tabla 16. Rangos de pH definidos para suelo.....	121
Tabla 17. Rangos de materia orgánica (MO) definidos para suelo.....	121
Tabla 18. Rangos de nitrógeno total (N-total) definidos para suelo .....	121
Tabla 19. Niveles de formas de C y N obtenidos a partir de los estándares de referencia en suelo del IGAC (2014) para la profundidad 1 de 0-10 cm.....	123
Tabla 20. Niveles de formas de C y N obtenidos a partir de los estándares de referencia en suelo del IGAC (2014) para la profundidad 2 de 10-20 cm.....	124
Tabla 21. Niveles de formas de C y N obtenidos a partir de los estándares de referencia en suelo del IGAC (2014) para las zonas de ladera .....	125
Tabla 22. Prueba U de Mann-Whitney aguas superficiales vs suelos en zonas de ladera .....	139
Tabla 23. Prueba U de Mann-Whitney aguas superficiales vs profundidad de 0-10 cm en suelo .....	140
Tabla 24. Prueba U de Mann-Whitney aguas superficiales vs profundidad de 10-20 cm en suelo .....	140

Figura 1. Georreferenciación de los sitios de muestreo para aguas superficiales en el municipio de Zona Bananera .....	22
Figura 2. Georreferenciación de los sitios de muestreo para suelo.....	25
Figura 3. Mapa de uso del suelo del municipio de Zona Bananera, departamento del Magdalena .....	26
Figura 4. Mapas de representatividad del muestreo en la zona de estudio .....	27
Figura 5. Puntos de muestreo en suelo y aguas superficiales del municipio Zona Bananera.....	30
Figura 6. El ciclo del nitrógeno, procesos y transformaciones del nitrato.....	52
Figura 7. Ciclo del carbono en los sistemas atmósfera, suelo y agua.....	59
Figura 8. Zona de influencia de las estaciones meteorológicas en el Municipio Zona Bananera.. ..	70
Figura 9. Unidades de suelos identificadas en la zona de estudio .....	72
Figura 10. Plantaciones de <i>Musa sp.</i> en fincas del municipio de Zona Bananera .....	80
Figura 11. Cultivo de <i>Elaeis guineensis</i> en el municipio Zona Bananera .....	81
Figura 12. Vegetación nativa Bs-T y Bms-T cerca Santa Rosalía.....	81
Figura 13. Árboles frutales (limón y mango) cerca Santa Rosalía .....	82
Figura 14. Vegetación de rastrojo en zonas de ladera .....	82
Figura 15. Taponamiento de ríos por planta invasora ‘Jacinto de agua’ .....	83
Figura 16. Taponamiento de caños por maleza acuática .....	84
Figura 17. Influencia de la ganadería en la zona de estudio y cultivos de palma de aceite.....	84
Figura 18. Presencia de aves fuera del municipio de Zona Bananera .....	85
Figura 19. Presencia de manglares en río Sevilla cerca CGSM .....	85
Figura 20. Actividades de dragado de ríos y caños .....	86
Figura 21. Recolección de muestras de suelo cultivado con <i>Elaeis guineensis</i> .....	88
Figura 22. Recolección de muestras de suelo cultivado con <i>Musa sp.</i> .....	88
Figura 23. Recolección de muestras de suelo en zonas de ladera.....	89
Figura 24. Secado de muestras de suelo .....	90
Figura 25. Tamizado de muestras de suelo.....	90
Figura 26. Pesaje de muestras de suelo.....	91
Figura 27. Rotulado y empacado de muestras de suelo .....	91
Figura 28. Envases utilizados para toma de muestras de agua .....	92
Figura 29. Recolección de muestras de agua en ríos y quebradas del municipio Zona Bananera	93
Figura 30. Encharcamiento y condiciones de eutrofización del suelo en fincas cultivadas con <i>Musa sp.</i> .....	127
Figura 31. Resumen numérico de los datos obtenidos para las zonas de ladera.....	128
Figura 32. Resumen numérico de los datos obtenidos para la profundidad de 0-10 cm .....	129
Figura 33. Resumen numérico de los datos obtenidos para la profundidad de 10-20 cm .....	129
Figura 34. Comportamiento del carbono oxidable en ambas profundidades de muestreo .....	130
Figura 35. Comportamiento de la materia orgánica en ambas profundidades de muestreo .....	131
Figura 36. Comportamiento del nitrógeno total en ambas profundidades de muestreo .....	132
Figura 37. Comportamiento del amonio en ambas profundidades de muestreo.....	133
Figura 38. Comportamiento del nitrato en ambas profundidades de muestreo .....	134
Figura 39. Comportamiento de la materia orgánica en zonas de ladera .....	135
Figura 40. Comportamiento del carbono oxidable en zonas de ladera .....	135

Figura 41. Comportamiento del nitrógeno total en zonas de ladera .....	135xi
Figura 42. Comportamiento del nitrato en zonas de ladera .....	136
Figura 43. Comportamiento del amonio en zonas de ladera.....	136
Figura 44. Resumen numérico de los datos obtenidos para aguas superficiales .....	137
Figura 45. Comportamiento del amonio en el agua.....	137
Figura 46. Comportamiento del nitrito en el agua .....	137
Figura 47. Comportamiento del nitrato en el agua .....	138

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema que conecta factores bióticos y abióticos del ambiente, y contiene sustancias inorgánicas de vital importancia en el desarrollo agrícola. El agua, los nutrientes minerales, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), entre otros, son elementos absorbidos por las plantas para el proceso de fotosíntesis. Los nutrientes presentes en el suelo se dividen en macronutrientes y micronutrientes teniendo en cuenta las concentraciones en las que estos son requeridos; los del primer grupo: Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Azufre (S), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Silicio (Si) son necesarios en mayores proporciones, mientras que los del segundo grupo: Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Molibdeno (Mo), Boro (B), Cloro (Cl), Níquel (Ni) y Sodio (Na) son requeridos en menores concentraciones. De hecho, el desarrollo de las raíces de los cultivos, la productividad y dinámica de los ecosistemas terrestres se encuentran altamente relacionadas y algunas veces limitadas por la disponibilidad y distribución de estos nutrientes en el perfil del suelo (Celis, 2011; Cerón y Aristizábal, 2012).

Por un lado, el nitrógeno presente en el suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica distribuidas heterogéneamente en el perfil, y se estima que más del 90% de dicho elemento corresponde a N orgánico obtenido a partir de la degradación de material vegetal y restos de animales (Zapata y Osorio, 2010). Por ello, una amplia variedad de microorganismos interviene sobre su dinámica en la biosfera (Klotz y Stain, 2008) abarcando los procesos de fijación de  $\text{N}_2$ , mineralización, nitrificación, desnitrificación (Hayatsu et al., 2008) y oxidación anaeróbica del amonio (Hu et al., 2011). Según Perea

(2003), este nutriente es fundamental para el desarrollo y productividad de los cultivos, es absorbido como nitrato, nitrito y amonio; siendo el nitrato la forma más móvil en el suelo y también la que se pierde con mayor facilidad por lixiviación (Celis, 2011).

Por otra parte, existen procesos como la erosión del suelo y la deposición de macronutrientes que son de especial importancia para el caso del Carbono Orgánico del Suelo (COS) (Lal, 2004). El carbono que no es transportado por la erosión normalmente es emitido a la atmósfera en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o metano ( $\text{CH}_4$ ) (Colqué y Sánchez, 2007; FAO, 2015a), ocasionando un aumento de los efectos producidos por el cambio climático debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). De hecho, la agricultura intensiva actual es responsable del 25% de las emisiones de  $\text{CO}_2$ , el 50% de emisiones de  $\text{CH}_4$  y el 70% de  $\text{N}_2\text{O}$  a nivel mundial (FAO, 2019). También es importante resaltar que cuando las cantidades de COS se encuentran en niveles bajos genera afectaciones a la agricultura y por lo tanto a la productividad a causa de la baja fertilidad del suelo (FAO, 2015a).

La producción agrícola depende principalmente de la capacidad que tienen los suelos para producir cultivos con un buen rendimiento, es decir, de la fertilidad del suelo. Para lograr una buena fertilidad resulta indispensable que estos dispongan de los contenidos adecuados de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de la planta (Cruz, 2014); no obstante, las cantidades que se encuentran en ellos no son suficientes para suplir los requerimientos nutricionales de los cultivos y por esta razón se utilizan fertilizantes naturales orgánicos y químicos, en especial nítricos y amoniacales, a fin de cumplir con dicha condición (Pacheco y Cabrera, 2003; Sánchez y Mira, 2013; Torres,

2016). Estas fuentes nitrogenadas generan importantes cambios químicos sobre el recurso y dependen de la dinámica del elemento nutriente, la dosis y fuente utilizada, el sistema de aplicación, las características del suelo y las condiciones climáticas. Así mismo, el aumento en los niveles de determinado nutriente, su persistencia y residualidad en el tiempo pueden modificar las reacciones que tienen lugar en él y también la disponibilidad de otros elementos esenciales para la nutrición, influyendo sobre la productividad de las cosechas y afectando la calidad del medio ambiente (Sadeghian, 2003).

El municipio de Zona Bananera presenta alta dependencia económica de la agricultura, el 75% de los empleos se generan a partir de esta actividad (Alcaldía Municipal de Zona Bananera, 2016-2019); de ahí que los agricultores desempeñen un papel fundamental, teniendo en cuenta los diversos enfoques agrícolas encaminados a la gestión sostenible con miras a mejorar la productividad de los cultivos (FAO, 2015a).

El adecuado manejo de los nutrientes se convierte en un desafío, que hace necesario mantener la calidad del recurso y la productividad agrícola de los suelos en el municipio a través de la implementación de prácticas de manejo sostenible que favorezcan la retención de carbono orgánico y otros nutrientes esenciales para los cultivos con el fin de producir suelos fértiles, ricos en materia orgánica, con abundante vegetación, que requieran menos insumos químicos y con una amplia biodiversidad. Para ello resulta indispensable optimizar el uso de fertilizantes (manteniendo niveles adecuados) y al mismo tiempo reducir su utilización para regular las concentraciones de dichos elementos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero que acentúan los efectos del cambio climático en la zona, evitando graves afectaciones al ambiente (Intergovernmental Panel on Climate

Change [IPCC], 2007; FAO, 2015a). Es claro que la aplicación de nitrógeno y materia orgánica debe dosificarse en el cultivo teniendo en cuenta factores condiciones climáticas, etapas fenológicas de la especie y el comportamiento del material vegetal (Torres, 2017).

Por lo anterior, se propuso con este trabajo **realizar un análisis de la concentración de carbono y nitrógeno en suelos de la Zona Bananera y conocer su influencia sobre el contenido de nitratos en las principales fuentes de agua superficial del municipio**, con miras a definir las alternativas de manejo sostenible que mejor se adapten al área de estudio y permitan regular las concentraciones de dichos nutrientes.

El **informe de investigación** se estructuró de la siguiente manera: en el primer capítulo se presenta la descripción de la situación de interés enfocada en la contaminación del suelo y agua por diferentes formas de nitrógeno y carbono en la Zona Bananera, así mismo se precisan los objetivos del estudio que definen el alcance de la investigación y la metodología de trabajo explicada en **cuatro** fases que responden a cada objetivo planteado. En un segundo capítulo se presentan los antecedentes y estado del arte del tema de investigación, y el **marco teórico o conceptual**. El análisis y la discusión de los resultados obtenidos a partir de la caracterización analítica y revisión bibliográfica se recogen en el capítulo 3; que consta de la descripción de la zona de estudio, el proceso de preparación de las muestras recolectadas, comparación de las concentraciones de nitrógeno y carbono obtenidas con los estándares de referencia, cartografía del municipio con zonas de máxima concentración y aplicación de la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes. Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones a tener en cuenta para futuras investigaciones en la zona.

## JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial la producción de fertilizantes nitrogenados para la agricultura crece de manera constante, siendo superiores los niveles aplicados en los países desarrollados (120-550 kg N/ha de suelo cultivable) en comparación con las cantidades empleadas en los países en vía de desarrollo, de 30 kg N/ha en promedio (García et al., 1994 citado por Pacheco y Cabrera, 2003).

La agricultura contribuye de manera importante a la emisión de gases de efecto invernadero e incrementa los efectos producidos por el cambio climático. Esta actividad es responsable del 25% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el 50% de emisiones de CH<sub>4</sub> y el 70% de N<sub>2</sub>O (FAO, 2019). Los fertilizantes nitrogenados usan una fuente sustancial de óxido nitroso y su uso trae consigo problemas ambientales. Se estima que la aplicación anual de nitrógeno en los cultivos es próxima a 70 millones de toneladas y que esta genera el 10% de 22 millones de toneladas de dicho contaminante, que posteriormente son emitidas a la atmósfera (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], Delegación Regional de Cooperación [DRC] para América del Sur, Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura [IICA] y FAO, 2011). Además, en los países en desarrollo la adaptación al cambio climático costará decenas de miles de millones de dólares en las próximas décadas (FAO, 2019).

Anualmente, las actividades humanas alteran el ciclo del carbono, emitiendo 8,6 Pg de carbono de los cuales 3,3 Pg son absorbidos por la atmósfera y 2,2 Pg por los océanos. Estos flujos entre el COS y la atmósfera revisten de gran importancia y pueden ser tanto positivos como negativos para el caso de captura o como emisión de CO<sub>2</sub>; respectivamente

(Castañeda y Montes, 2017). De hecho, el suelo constituye un reservorio importante de dicho elemento, actuando como fuente o sumidero del dióxido de carbono atmosférico, razón por la cual desempeña un papel fundamental en el cambio climático a nivel mundial y en las funciones propias del recurso suelo. Así mismo, en los últimos 150 años se ha observado un incremento del 31% en las emisiones de CO<sub>2</sub> como consecuencia de la degradación del suelo por actividades agrícolas las cuales reducen gradualmente el contenido de materia orgánica, lo cual aumenta la aplicación de agroquímicos para mantener los requerimientos comerciales (Aguirre, Piraneque y Vásquez, 2018a).

Fuenzalida (2007) citado por CEPAL et al. (2011) argumenta que América Latina genera un 9% de las emisiones de GEI producidas a nivel mundial, y que, a su vez, el 72% de dichas emisiones provienen de las actividades de deforestación y cambio en el uso del suelo; representando una parte importante del total de emisiones globales no solo en América Latina sino también en el Caribe, muestra una baja sostenibilidad de la actividad agrícola por lo que se hace necesario un manejo razonable de los recursos a fin de reducir dichas emisiones; ocasionando afectaciones sobre los recursos naturales (CEPAL, 2015). Algunos estudios indican que la mitad de la agricultura de América Latina podría sufrir desertificación y/o salinización en el 2050 (FAO, 2019). En el departamento se reportan aportes limitados de biomasa que afectan directamente el contenido de materia orgánica presente en los suelos, evidenciándose contenidos de carbono orgánico entre 0,5 y 1%, y solo el 5% de los suelos de la región con altos contenidos de este elemento (Vásquez, Macías y Menjivar, 2011).

Por otro lado, según CEPAL et al. (2011) el Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT ha llevado a cabo estudios en el país relacionados con los principales 28 cultivos en todos los departamentos de Colombia, con el fin de conocer cuáles serán beneficiados o no por el cambio climático; es decir, cuales tendrían ganancias y cuales pérdidas para el escenario a futuro del año 2050. Dicho análisis concluye que los cultivos permanentes que representaban el 66,4% del PBI en el 2007 serían los más afectados. Es importante anotar que Colombia emite el 0,25% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y el 45% de estas son provenientes de la agricultura (Vásquez et al., 2011). Así mismo, de acuerdo con el IGAC y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, 2002) en el departamento del Magdalena se hace evidente esta realidad, teniendo en cuenta su vocación agropecuaria y que dispone de 1.084.860 ha potencialmente cultivables que corresponden a 46,74% del área total (Vásquez, Macías y Menjivar, 2014).

A nivel local, según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MinAgricultura (2013), el municipio de Zona Bananera del departamento del Magdalena por sus características climáticas y topográficas tiene una vocación agrícola que corresponde al 73% de todo el territorio, concentrándose especialmente en la agroindustria, con cultivos de banano (*Musa* sp.) (Cabeza, 2014) y palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Además, el 75% de los empleos se generan en la agricultura, ocasionando una alta dependencia económica (Alcaldía Municipal de Zona Bananera, 2016-2019).

Por su parte, el banano es un alimento básico, importante producto de exportación y la principal fuente de ingresos para los agricultores en muchos países. En Colombia, se cultivan alrededor de 48.325 ha (Aguirre, Piraneque y Ramírez, 2018b), de las cuales

34.267 se encuentran en la zona del Urabá Antioqueño y 13.140 al norte del departamento del Magdalena y sur de la Guajira. Esta producción genera cerca de 60.000 empleos directos e indirectos. En 2016 se exportaron cerca de 93,4 millones de cajas de banano, por un valor de 811 millones de dólares (Asociación de Bananeros de Colombia-AUGURA, 2016).

Así mismo, este presenta una alta demanda (por hectárea cada año) de nutrientes entre los que se mencionan el potasio (400 kg), nitrógeno (125 kg) y fósforo (15 kg) (López y Espinosa, 1995) que son esenciales para un adecuado balance nutricional durante la producción de los cultivos, especialmente en el crecimiento y desarrollo del fruto (Cruz, 2014). No obstante, en los suelos de la Zona Bananera destinados a la agricultura no es posible cubrir la demanda y por ello se realizan aplicaciones de fertilizantes que permiten obtener el balance necesario de nutrientes (Torres, 2016); adicionalmente estas áreas presentan bajos contenidos de materia orgánica (Lahav y Turner, 1992; Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2009).

El suelo no solamente es un medio de anclaje para los cultivos, también cumple otras funciones importantes como la absorción y disponibilidad de nutrientes, la regulación de los ciclos biogeoquímicos y ciclaje de la materia orgánica (MO) y el flujo gaseoso (Aguirre, Piraneque y Menjivar, 2012). Por ello, se hace necesario conocer el estado actual y prospectar actividades que incluyan cambios en las labores agrícolas (prácticas sostenibles) y que ofrezcan oportunidades para mitigar los potenciales efectos del cambio climático, contribuyendo a la conservación del recurso edáfico (Aguirre et al., 2018a).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, a nivel global y local, es válido anotar que la investigación tiene una importancia socioambiental directamente relacionada con la sostenibilidad del municipio y de las comunidades que en él se encuentran (Plan Básico de Ordenamiento Territorial [PBOT], 2001). Desde el perfil del profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, se contribuye al fortalecimiento de la actividad investigativa en el programa de Maestría en Ingeniería, así como también a la generación de conocimiento a través de la identificación, comprensión y solución de problemas medio ambientales empleando conocimiento científico y tecnológico con miras a alcanzar un mejor desarrollo en la región optimizando procesos y reduciendo los costos ambientales.

## Capítulo 1

### Problema de investigación, objetivos y diseño metodológico

#### 1.1. Situación de interés

Las cualidades esenciales del recurso suelo están determinadas por sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, las cuales gobiernan todas las funciones que se dan en él. Dichas cualidades, le proporcionan la capacidad de cumplir con los roles ecológicos y de producción que benefician la conservación de la vida; por esta razón, el uso y manejo sostenible del suelo permite el equilibrio entre sus atributos y las actividades humanas para disfrutar adecuadamente de sus servicios (Brammer y Nachtergaele, 2015).

No obstante, a nivel global el suelo ha sufrido una desmesurada alteración antrópica sin tener en cuenta los impactos. De hecho, algunos estudios han identificado que durante los últimos 50 años la conversión de tierras para la agricultura y ganadería han ocasionado graves afectaciones sobre la abundancia, composición y actividad de los microorganismos del suelo, deteriorando la disponibilidad de nutrientes y la productividad de los cultivos, además de tener fuertes consecuencias sobre el ambiente y disminuir la calidad de vida de las personas (Montenegro et al., 2019).

De acuerdo con Bringezu et al. (2014), para el 2050 aproximadamente 849 millones de hectáreas de terrenos naturales estarían en riesgo de sufrir degradación si se continúa con el uso insostenible de los suelos. Este proceso implica cambios y deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas; así como también la reducción de la capacidad para prestar bienes y servicios a la población (FAO, 1996). Actualmente, el 33% de los suelos del planeta están degradados y esto se debe a diversos factores como el crecimiento

demográfico, la industrialización y el cambio climático, que no solamente contribuyen con la pérdida de la capa arable sino también con el agotamiento de los nutrientes esenciales, pérdida del carbono orgánico, sellado y erosión del suelo (FAO, 2015b).

La producción agrícola **depende** principalmente de la fertilidad de los suelos, es decir, de la capacidad que tienen de producir cultivos con un buen rendimiento. Para lograr la fertilidad adecuada es necesario que estos dispongan de los contenidos adecuados de nutrientes esenciales en donde elementos como el nitrógeno y el potasio juegan un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo del fruto (Cruz, 2014). No obstante, es importante anotar que la interacción de otros factores relacionados con la genética de la planta y el medio ambiente influyen en el rendimiento. Un manejo adecuado implica uso eficiente de nutrientes, esto incrementa la absorción y reduce pérdidas, al mismo tiempo mejora el rendimiento y calidad de los cultivos (Marouani y Harbeoui, 2016); al disminuir las pérdidas se reduce costo y daño ambiental (Romero et al., 2016).

En la actualidad, se busca obtener una máxima producción, razón por la cual se aplica sobre el suelo un exceso de fertilizantes, en especial nítricos y amoniacales. Esta aplicación excesiva causa contaminación, especialmente por nitrógeno (Camargo y Alonso, 2007; Robinson y Galán, 2012; Eugercios, Álvarez y Montero, 2017; Benimeli et al., 2019). Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) son formas reactivas del nitrógeno inorgánico que pueden encontrarse de manera natural en el medio acuático por diversos procesos como la deposición atmosférica, la escorrentía superficial, la descomposición de materia orgánica y la fijación biológica del nitrógeno. Sin embargo, actividades antrópicas han ocasionado alteraciones en el ciclo global de este nutriente,

dando origen a consecuencias/impactos ambientales graves debido al aumento de su disponibilidad en el planeta como resultado de las fuentes de contaminación de tipo puntual y difusa (González, Mosquera y Trujillo, 2015; Limbozzi y Galantini, 2018).

La anterior situación produce fuertes impactos entre los que se mencionan el cambio climático, el proceso de acidificación de los océanos, la pérdida de biodiversidad y el desbalance en los ciclos biogeoquímicos como carbono, nitrógeno y fósforo, entre otros (Sanclemente, 2015) que traen consigo aumento y arrastre de dichos nutrientes a las fuentes hídricas por procesos de lixiviación y lavado a través de las aguas de escorrentía (Organización Panamericana de la Salud [OPS] y Organización Mundial de la Salud [OMS], 1980; Benimeli et al., 2019).

Muchos factores influyen sobre la lixiviación del nitrógeno de campos agrícolas, es importante tener en cuenta el régimen pluviométrico y la región climática, las prácticas agrícolas utilizadas, la especie cultivada, tipo de suelo, relieve, contenido de materia orgánica, etc. (Eugercios et al., 2017).

Según la European Environment Agency (EEA, 2005) citado por Camargo y Alonso (2007), el nitrógeno transportado por medio de la escorrentía a las aguas superficiales puede generar concentraciones elevadas de los iones  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en ecosistemas acuáticos y trae como consecuencia procesos de eutrofización con la afectación sobre la fauna acuática por toxicidad directa de dichos compuestos nitrogenados (Robinson y Galán, 2012; Dechmi y Isidoro, 2018).

Así mismo, Gruber y Galloway (2008) citado por Eugercios et al. (2017) exponen que los cambios ocurridos en el ciclo del nitrógeno por la acción humana no solo provocan

su acumulación en los sistemas atmósfera, suelo y agua; sino que además afecta procesos importantes en los ciclos de otros elementos esenciales como el fósforo y el carbono. Según la Food and Agriculture Organization (FAO, 2016), todo esto representa un gran problema ambiental y genera impactos negativos tales como la escasez de agua, pérdida de biodiversidad, inundaciones, pérdida de la fertilidad de los suelos, erosión, desequilibrio de nutrientes, pérdida del Carbono Orgánico del Suelo (COS), entre otros (González et al., 2015).

Lal (2004) llama la atención sobre la erosión del suelo y la deposición de macronutrientes en terrenos con fuertes pendientes y también en los sistemas acuáticos. Así mismo resalta que cuando el COS se encuentra en niveles bajos afecta la agricultura y por lo tanto la productividad a causa de la baja fertilidad del suelo. Es por esto que el hombre ha optado por el uso y manejo de este recurso proporcionando materiales orgánicos beneficiosos con el ánimo de lograr un equilibrio y al mismo tiempo satisfacer las demandas de este nutriente (FAO, 2015a).

No obstante, el carbono que no se incorpora y se estabiliza en el suelo, es emitido a la atmósfera en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o metano ( $\text{CH}_4$ ), debido a los procesos de mineralización y metanogénesis; respectivamente. De hecho, el uso de productos perjudiciales como herbicidas, plaguicidas y pesticidas también afecta el ciclo de regulación del carbono, ocasionan aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera (incluyendo el óxido nitroso), que traen consigo un significativo aporte al cambio climático (Colqué y Sánchez, 2007; CEPAL et al., 2011; FAO, 2015a).

Según PNUMA-ORPALC/FS-UNEP CENTRE (2014) y Equihua et al. (2016) citados por Burbano (2018), los efectos del cambio climático sobre el planeta traen como consecuencia fuertes impactos a escala global, entre los que se mencionan: cambios en los ecosistemas, en la disponibilidad y calidad del agua, en la producción agrícola y la fertilidad del suelo (Adger, 2007; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2007; Tierramerica, 2009); amenazando elementos indispensables para la vida tales como el acceso al agua, la producción de alimentos, el uso de la tierra y los ecosistemas (Ocampo, 2011).

La FAO (2002a) expone que en el 2030 existirá una menor aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo en comparación con los años pasados y que podría observarse una reducción hasta del 37%. De hecho, en China que es el país que más utiliza este tipo de fertilizantes, se presentan pérdidas por volatilización y del 5 al 10% se infiltran en el suelo. Además, en los últimos 35 años se ha venido incrementando el uso de plaguicidas alcanzando tasas de crecimiento del 4 al 5,4% en algunas regiones. En otros países como Francia, Alemania, Reino Unido, y la India durante los años noventa se observó una reducción del uso de insecticidas.

Las cantidades de nutrientes que se encuentran naturalmente en los suelos no son suficientes para suplir los requerimientos nutricionales de los cultivos y por ello se emplean fertilizantes naturales orgánicos y químicos, a fin de suplir dicha demanda (Pacheco y Cabrera, 2003; Sánchez y Mira, 2013; Torres, 2016). En Colombia los suelos cultivados con banano no logran cubrir la demanda de nutrientes, por lo que es necesario suplirla por medio de los fertilizantes (Guerrero y Gadban, 2002). El hecho de que las plantas no

utilizan completamente el nitrógeno del suelo, genera un grave problema, la aplicación de un exceso de fertilizantes sobre el suelo, la que trae un aumento en el arrastre de nitrógeno por efecto de la escorrentía a las aguas superficiales o por volatilización (OPS y OMS, 1980; Benimeli et al., 2019).

Por otro lado, la fertilidad de los suelos colombianos es característicamente baja en términos de nutrición vegetal; el 85% de los suelos son ácidos, siendo el 57,6% de los suelos de un pH menor a cinco, el 98% muestra deficiencias en fósforo asimilable para las plantas y el 68,1% cuenta con bajo contenido de materia orgánica. En algunos casos esto se debe al uso inadecuado de las tierras destinadas para la agricultura donde las técnicas de manejo del suelo empleadas generan graves problemas de degradación (IGAC, 2016; Montenegro et al., 2019).

Para el caso específico de la Zona Bananera del Magdalena, esta se encuentra en un área situada entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Ciénaga Grande, destacándose por ser una zona agrícola cuyos principales cultivos son el banano para exportación, la palma de aceite, arroz, cacao y café, entre otros (Cabeza, 2014). Además, sus suelos son en su mayoría de origen aluvial, profundos de más de 1,2 m, con drenaje de pobre a bueno, texturas francas, franco arcillosas y arenosas, con pH entre 6 y 7, con buena fertilidad y contenidos variables de materia orgánica con tendencia a ser bajos en algunas zonas con problemas de salinidad (IGAC, 2009).

La mayoría de los suelos bananeros poseen bajos contenidos de materia orgánica, razón por la cual se hace necesario realizar aportes por medio de residuos orgánicos y desechos de las plantas en el suelo, optimizando la disponibilidad de dicho elemento

(Lahav y Turner, 1992). La aplicación de nitrógeno y materia orgánica debe dosificarse a lo largo de todo el cultivo teniendo en cuenta factores importantes, como las condiciones climáticas, etapas fenológicas y el comportamiento del material vegetal (Torres, 2017). Aguirre, Piraneque y Rodríguez (2015) mencionan que en el cultivo del banano se presenta un desafío relacionado con el adecuado manejo de los nutrientes utilizados para aumentar la productividad agrícola, satisfacer la demanda de alimentos y mantener la calidad de los recursos. Por su parte, Torres (2017) expone que es necesario optimizar el uso de nitrógeno en zonas bananeras, debido a que se incrementaría en unas seis toneladas para mantener la producción, y además se requiere reducir la utilización de fertilizantes nitrogenados por afectación al medio ambiente.

Las actividades antrópicas han causado un gran impacto en el ciclo global del nitrógeno, producen entradas de nitrógeno antropogénico en el sistema terrestre que ocasiona devastadores impactos ambientales. Además, la emisión de gases en forma de óxidos de nitrógeno genera problemas asociados a la lluvia ácida y constituye una fuente importante de nitrógeno en los ecosistemas naturales hasta entonces no perturbados, así como la fijación biológica de nitrógeno por campos de leguminosas (Eugercios et al., 2017).

FAO-ITPS (2015) citado por Burbano (2016) mencionan que un informe sobre el estado de los suelos del mundo, llevado a cabo por un grupo conformado por 200 científicos del suelo de 60 países, expone que aunque en algunas regiones los suelos presentan buenas propiedades fisicoquímicas y biológicas, la mayor parte de este recurso se encuentra en el límite o en muy malas condiciones y también expresa que las amenazas más fuertes para

la función del suelo son la erosión, la compactación, sellado y anegamiento, la acidificación y salinización, la contaminación, el desequilibrio de nutrientes (por exceso y por deficiencia), la pérdida del carbono orgánico del suelo que se asocia a la producción de gases de efecto invernadero y, finalmente, la pérdida de la biodiversidad.

Teniendo en cuenta la situación expuesta anteriormente, se planteó el siguiente interrogante: ¿Cómo influye la concentración de carbono y nitrógeno del suelo sobre el contenido de nitratos en las aguas superficiales del municipio Zona Bananera del Magdalena?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

Analizar la concentración de C, N y su relación C/N en suelo, así como su influencia sobre el contenido de nitratos en aguas superficiales del municipio de Zona Bananera (Magdalena).

### 1.2.2. Específicos

Determinar la concentración de C y N en suelo y agua del municipio de Zona Bananera.

Relacionar la concentración de C y N y sus formas (nitrato, nitrito, amonio) en suelo y agua.

Discutir los resultados de los parámetros obtenidos en suelo y agua utilizando la revisión bibliográfica en el contexto de la Zona Bananera y explorar las posibles afectaciones en el área de estudio.

Seleccionar las posibles alternativas de manejo sostenible con el ánimo de regular las concentraciones de N y C en la zona de estudio.

### 1.3. Metodología

Para analizar el contenido de N y C en suelo, y su influencia sobre el contenido de nitratos en aguas superficiales del municipio Zona Bananera, se planteó una investigación de tipo cuantitativo con alcance correlacional-explicativo. De acuerdo con lo planteado por Hernández, Fernández y Baptista (2014), el enfoque correlacional busca conocer la relación o grado de asociación entre dos o más variables a través de la medición de cada una de ellas y la posterior cuantificación y análisis de dicha vinculación. Así mismo, el hecho de saber cómo las variables se relacionan aporta un valor explicativo (parcial) a la investigación. El alcance explicativo del estudio está dirigido a responder por las causas de ciertos fenómenos o eventos; es decir, explicar por qué ocurren y bajo qué condiciones se presentan o a que se debe la relación entre las variables definidas.

El desarrollo del trabajo de investigación se enfocó en el análisis de la concentración de formas de carbono y nitrógeno, así como también en conocer su nivel de asociación en suelo y aguas superficiales del municipio de Zona Bananera. Esta metodología se estructuró en cuatro fases a través de las cuales se logró el cumplimiento de los objetivos específicos definidos en la sección anterior para dar respuesta a la pregunta de investigación planteada; estas son descritas a continuación:

### 1.3.1. Fase 1: Caracterización de la zona de estudio

Mediante la revisión de información secundaria se identifica particularidades del municipio de Zona Bananera. Estos soportes bibliográficos facilitaron la selección de los sitios de muestreo (teniendo en cuenta fisiografía, tipo de vegetación, manejo agrícola, facilidad de acceso para la recolección de las muestras con el barreno o palín en suelos), aspectos que facilitan la representatividad de las muestras, siguiendo un zig-zag a lo largo de la zona de estudio, se fue georreferenciando los puntos para luego caracterizarlos con relación a las formas químicas de los parámetros carbono y nitrógeno.

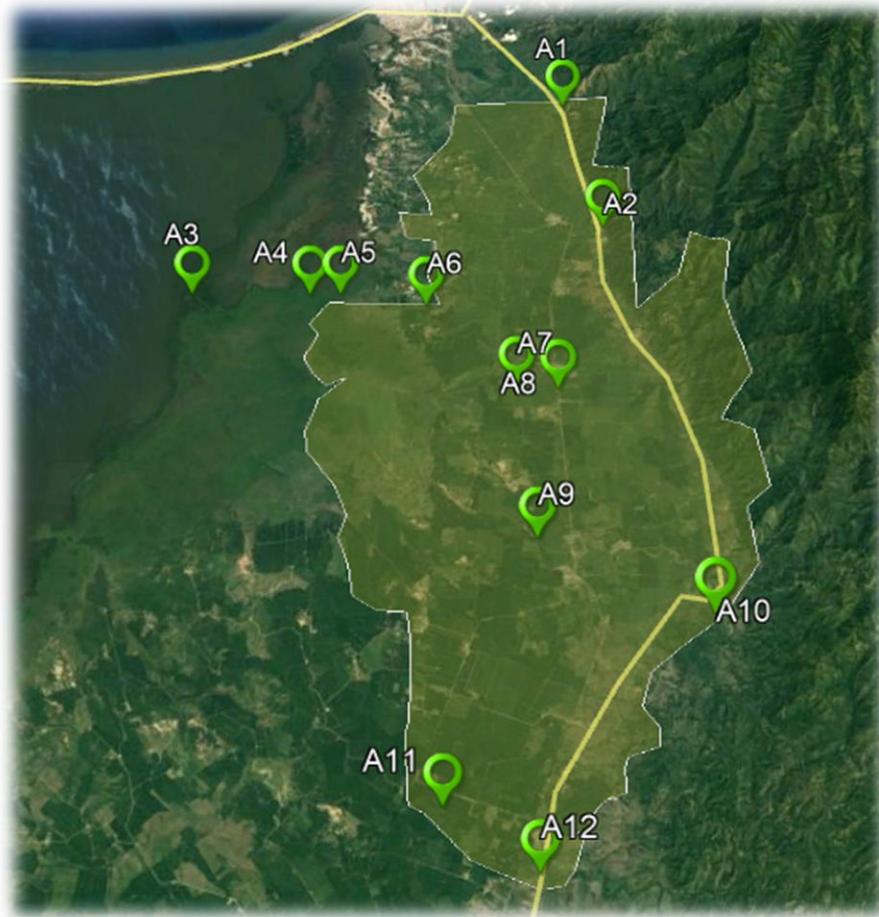
Para la selección de los sitios de muestreo en aguas superficiales se tuvieron en cuenta los siguientes criterios (Escuela de Ingeniería y Medio Ambiente [EIMA], s. f.; CELEC, s. f.): 1) Accesibilidad. Los puntos de muestreo se definieron en lugares fácilmente accesibles, con vías de acceso vehicular y peatonal para facilitar la toma/obtención de las muestras, el transporte de los equipos y material de muestreo; 2) Afluentes de la zona. Se seleccionaron los principales ríos y quebradas del municipio y 3) Seguridad. Los puntos de muestreo, las áreas aledañas y condiciones meteorológicas se seleccionaron garantizando la seguridad de los responsables del muestreo.

Para el muestreo de aguas, se llevó a cabo un muestreo aleatorio simple con recolección de muestras simples de agua superficial en los puntos presentados en la tabla 1 para los ríos: Sevilla, Frío y Tucurinca; y las quebradas: La Aguja y Orihueca. Los sitios muestreados fueron identificados con sus coordenadas geográficas utilizando GPS.

*Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo para aguas superficiales*

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>
A1	Quebrada La Aguja (puente)	-74,1716556	10,9568083
A2	Río Frío inicial (balneario)	-74,1518167	10,8999611
A3	Desembocadura CGSM	-74,3241694	10,8698861
A4	Unión río Sevilla-río Frío	-74,2742694	10,869675
A5	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	-74,2613611	10,8683889
A6	Río Frío final (La Candelaria)	-74,2247861	10,8645778
A7	Quebrada Orihueca final (finca Cecilia Limón)	-74,1848694	10,8284667
A8	Quebrada Orihueca inicial (puente)	-74,1673306	10,8278583
A9	Río Sevilla (medio)	-74,1727889	10,7650444
A10	Río Sevilla inicial (puente)	-74,10045	10,7433417
A11	Río Tucurínca final	-74,2040333	10,66
A12	Río Tucurínca inicial (puente)	-74,1650944	10,6353306

Los puntos presentados en la tabla anterior se encuentran georreferenciados en la figura 1, obtenida a partir de Google Earth Pro.



*Figura 1. Georreferenciación de los sitios de muestreo para aguas superficiales en el municipio de Zona Bananera (elaborado con Google Earth Pro)*

Así mismo, se definió el método de recolección y envío de muestras de agua teniendo en cuenta la guía de muestreo para suelo y agua del IGAC (s. f.), presentado en la tabla 2.

Tabla 2. Método de recolección y envío de muestras de agua (Adaptado de IGAC, s. f.)

<i>Actividad</i>	<i>Método</i>
Recolección de muestras de agua	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se rotularon los envases para las muestras de agua.</li> <li>2. Previo a la toma de la muestra, se enjuagó cada envase de 2 a 3 veces con el agua a muestrear.</li> <li>3. El muestreo se realizó en sitios donde el agua se encontraba en circulación (preferiblemente en el centro de la corriente a una profundidad media).</li> <li>4. En cada punto de muestreo seleccionado a lo largo de cada río, se recolectó una muestra de agua a contracorriente con un volumen igual a 500 ml.</li> <li>5. La muestra fue recogida dejando un espacio aproximado del 1% de la capacidad del envase para permitir la variación de volumen debido a diferencias térmicas y facilitar la mezcla por agitación antes de realizar el análisis.</li> <li>6. Se evitó la excesiva manipulación de las muestras para reducir el riesgo de deterioro o contaminación.</li> <li>7. Las muestras fueron guardadas en una cava con hielo seco y bolsas de gel para mantener una temperatura cercana a los 4°C.</li> <li>8. Herramientas utilizadas para el muestreo: envases o botellas plásticas rotuladas con marcador indeleble, cava, hielo seco, bolsas de gel y planillas de registro.</li> </ol>
Envío de muestras de agua	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Antes del envío se evitó el congelamiento de las muestras.</li> <li>2. Las muestras fueron enviadas en las mismas condiciones de refrigeración manejadas durante el proceso de recolección.</li> <li>3. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio considerando un tiempo máximo de 2 días, para asegurar que las determinaciones analíticas fueran rápidas y confiables, correctamente refrigeradas en lugar oscuro.</li> </ol>

El muestreo de identificación tiene por objetivo investigar la concentración del elemento en estudio en el suelo o agua a través de la obtención de muestras representativas con el fin de establecer cantidad y referenciarla con un parámetro. Se realizó de forma aleatoria tratando de cubrir un zigzag, patrón irregular.

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado con recolección de muestras simples en áreas cultivadas con banano, palma de aceite y árboles frutales a diferentes profundidades (estratos: 0-10 y 10-20 centímetros), tal como se presenta en la tabla 3; y

muestras compuestas (tres submuestras) en áreas de rastrojo como se muestra en la tabla 4, siguiendo los puntos definidos para muestreo. Cada sitio muestreado fue identificado con sus respectivas coordenadas geográficas utilizando GPS.

*Tabla 3. Localización de los sitios de muestreo para suelo (banano, palma y frutales)*

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>
S2	El Reposo	-74,1676361	10,93645
S3	Vereda La Mira (punto 1)	-74,2074722	10,922
S4	Vereda La Mira (punto 2)	-74,2076222	10,9224778
S5	Límite Zona Bananera	-74,1446833	10,8828
S6	San Pablo	-74,1490667	10,8812167
S7	La Unión	-74,1935833	10,8770083
S8	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	-74,2613611	10,8683889
S9	La Candelaria	-74,2343944	10,8557556
S10	Finca María Luisa	-74,2018444	10,8505167
S11	Entrada a fincas (cerca Orihueca)	-74,1936444	10,8460944
S12	Finca Plantación	-74,1354361	10,8497722
S13	La Gran Vía (punto 1)	-74,1320722	10,8520333
S14	La Gran Vía (punto 2)	-74,1309556	10,8527333
S15	La Gran Vía (punto 3)	-74,1306167	10,8531417
S16	Cerca Santa Rosalía (punto 1)	-74,0983611	10,8322778
S17	Cerca Santa Rosalía (punto 2)	-74,1119722	10,8251389
S18	Finca Vijagual	-74,1635944	10,7784222
S19	Finca Porvenir	-74,1221778	10,7517028
S20	Soplador	-74,2124417	10,7313944
S21	Tucurinca	-74,1908222	10,6648667

Tabla 4. Localización de los sitios de muestreo para suelo con vegetación de rastrojo

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>
L1	Finca Julio Zawady	-74,1539139	10,9072028
L2	Vía San Pedro de la Sierra	-74,1444889	10,8809472
L3	Desembocadura CGSM	-74,3255167	10,8709917
L4	Guamachito	-74,1438167	10,698875

Los puntos presentados en las tablas 3 y 4 se encuentran georreferenciados en la figura 2, obtenida a partir de Google Earth Pro.

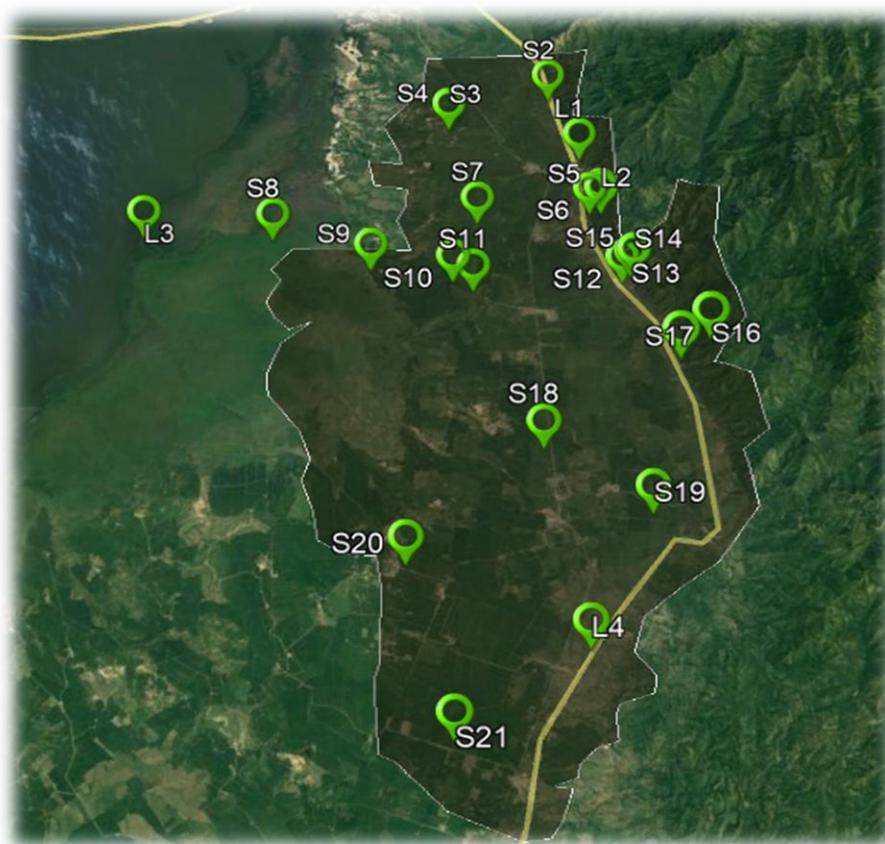


Figura 2. Georreferenciación de los sitios de muestreo para suelo (elaborado con Google Earth Pro)

Para la selección de los puntos de muestreo se tuvieron en cuenta antecedentes de la zona de estudio relacionados con el uso del suelo del municipio tal como se presenta en la figura 3.

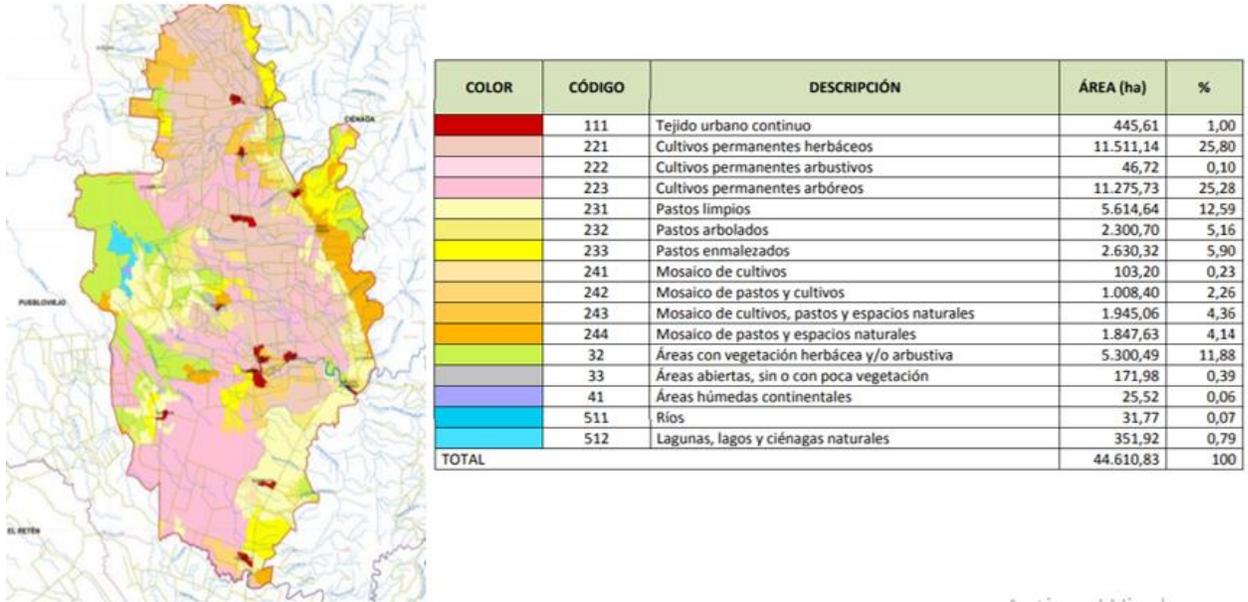


Figura 3. Mapa de uso del suelo del municipio de Zona Bananera, departamento del Magdalena (tomado de MinAgricultura, 2013)

Para que el muestreo en suelo, fuese representativo de la zona de estudio, además de los anteriormente enunciados se tuvieron en cuenta (figura 4): 1) Unidades fisiográficas (pie de monte, planicie); 2) Cobertura vegetal (banano, palma de aceite, rastrojo y frutales); 3) Característica de textura y color (cualitativo – homogeneidad, para seleccionar los puntos de recolección de muestras compuestas); 4) Recorrido en zig-zag y facilidad de acceso en la toma de muestras; 5) Localización de afluentes representativos de la zona de estudio; 6) Asociaciones de suelos y 7) Presupuesto.

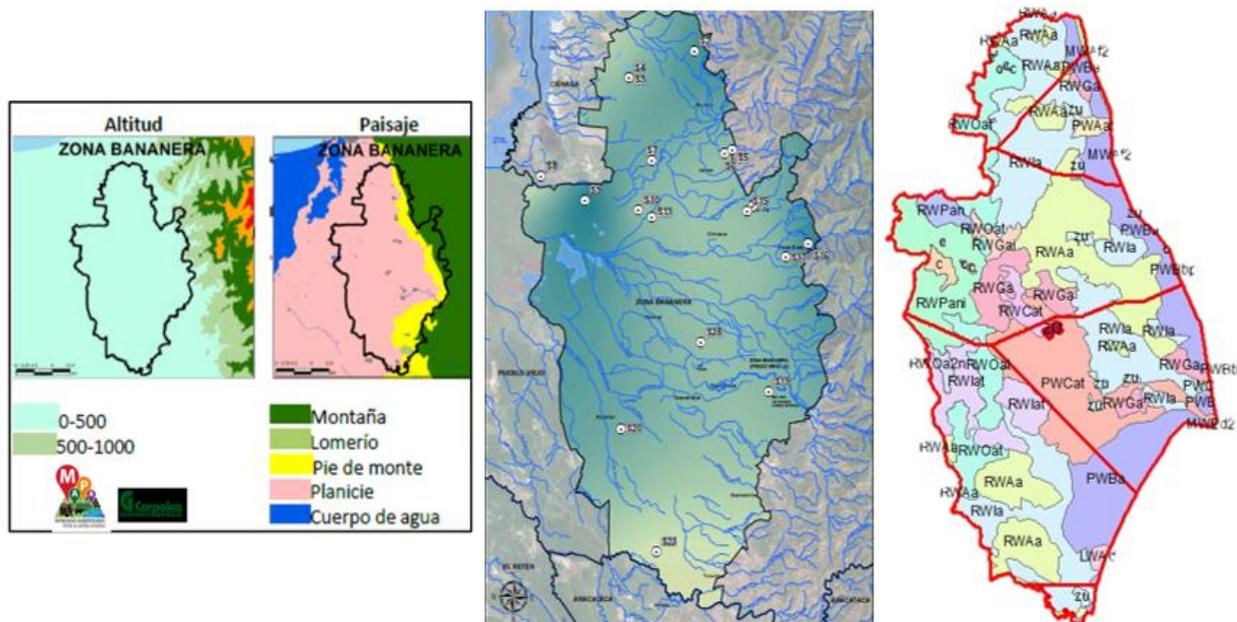


Figura 4. Mapas de representatividad del muestreo en la zona de estudio (adaptado de IGAC, 2009)

Los métodos de recolección y envío de muestras se presentan en la tabla 5 y están basados en la guía de muestreo para suelo y agua del IGAC (s. f.).

Tabla 5. Método de recolección y envío de muestras de suelo (Adaptado de IGAC, s. f.)

<i>Actividad</i>	<i>Método</i>
Recolección de muestras de suelo	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fue eliminada la cobertura vegetal del suelo en cada punto de muestreo.</li> <li>2. Se abrió un hoyo en forma de V, con medidas aproximadas de 25x25 cm de lado y a las profundidades seleccionadas.</li> <li>3. Antes de tomar la muestra se retiraron los primeros 2 cm de suelo.</li> <li>4. Se recolectó aproximadamente 1 kg de suelo en cada punto de muestreo y para cada profundidad.</li> <li>5. Para las muestras compuestas ubicadas en áreas con vegetación de rastrojo, se recolectaron tres submuestras siguiendo un zigzag y fueron mezcladas en un balde hasta obtener una muestra compuesta homogénea en cada punto de muestreo definido.</li> <li>6. Las muestras fueron empacadas en bolsas plásticas no utilizadas previamente.</li> </ol>

<i>Actividad</i>	<i>Método</i>
Envío de muestras de suelo	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. Se identificó cada muestra de forma concisa y exacta mediante un rótulo; definiendo el nombre de la finca o sector, profundidad, cultivo y tipo de muestra.</li> <li>8. Se tuvo en cuenta que el rótulo de identificación no estuviera en contacto directo con el suelo a analizar.</li> <li>9. Herramientas utilizadas para el muestreo: Pala jardinera o palín, balde, bolsas plásticas y planilla de registro.</li> <li>1. Las muestras de suelo (1kg) fueron secadas y tamizadas antes del envío al laboratorio.</li> <li>2. Posteriormente, las muestras (600 gr) se empacaron en bolsas de plástico resellables resistentes al transporte y se identificaron con marcador de tinta indeleble.</li> <li>3. Estas se enviaron en una caja previamente sellada y rotulada con la siguiente información: Número de muestras, códigos, fecha de recolección y responsable.</li> <li>4. Antes del envío se evitó que las muestras estuvieran expuestas directamente al sol o a otras fuentes de calor, reduciendo también el riesgo de contaminación externa.</li> </ol>

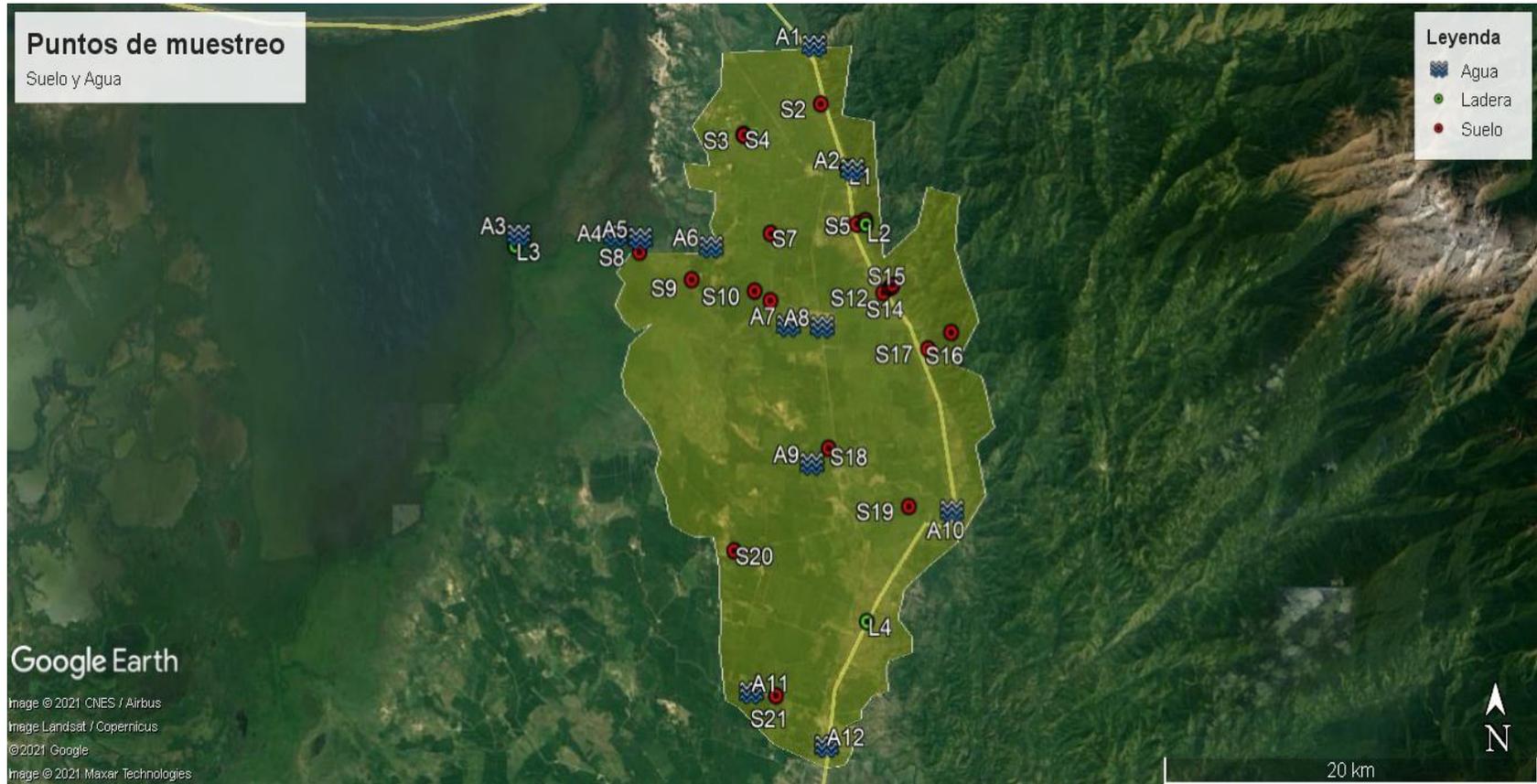


Figura 5. Puntos de muestreo en suelo y aguas superficiales del municipio Zona Bananera (elaborado con Google Earth Pro)

### 1.3.2. Fase 2: Determinación de los contenidos y niveles de C, N en suelo y agua

La caracterización analítica de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Palmira (laboratorio certificado y reconocido) con el método estándar para la evaluación del agua y del agua servida de la American Public Health Association (APHA), la American Water Works Association (AWWA) y la Water Environment Federation (WEF) (2017).

Para las muestras de agua se determinaron los valores de los siguientes parámetros (tabla 6): pH, conductividad eléctrica, nitrito, nitrato y amonio.

*Tabla 6. Parámetros y métodos en agua*

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Método</i>
Nitrito	NO <sub>2</sub>	mg/l	
Nitrato	NO <sub>3</sub>	mg/l	Espectrofotometría UV-VIS
Amonio	NH <sub>4</sub>	mg/l	
pH			pH-metro
Conductividad eléctrica	CE	mS/cm	Conductímetro

Así mismo, para las muestras de suelo se determinaron los parámetros: pH, carbono oxidable, materia orgánica, nitrógeno total, amonio y nitrato presentados en la tabla 7, por medio de análisis en el Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT.

*Tabla 7. Parámetros y métodos en suelo*

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Método</i>
pH			pH Agua 1:1
Nitrógeno total	N-total	g/kg	
Nitrato	NO <sub>3</sub>	mg/kg	Espectrofotometría UV-VIS (Equipo – Skalar)
Amonio	NH <sub>4</sub>	mg/kg	

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Método</i>
Carbono oxidable	C oxidable	g/kg	Carbono Oxidable W-Black
Materia orgánica	MO	g/kg	Materia Orgánica Walkley-Black Espectrometría

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización analítica de los parámetros químicos en suelo del municipio fueron comparados con los valores de referencia y estándares nacionales/internacionales vigentes con el propósito de definir rangos de concentraciones de nutrientes (alto, medio, bajo).

### 1.3.3. Fase 3: Detección de las afectaciones en el ambiente

La definición de los rangos de concentraciones de los parámetros nitrógeno y carbono permitió identificar las áreas del municipio con mayor afectación (zonas rojas).

Para el análisis de los resultados se realizó estadística descriptiva de cada variable en suelo y agua, además de la prueba no paramétrica Wilcoxon (U de Mann-Whitney) que permitió determinar la influencia de las concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo sobre el contenido de nitratos en las aguas superficiales del municipio mediante la comparación de medias de dos muestras independientes, en otras palabras, la asociación entre las variables definidas para cada recurso. En ambos casos se empleó el software estadístico InfoStat versión 2008 y R versión 3.5.2.

#### **1.3.3.1. Prueba Wilcoxon (U de Mann-Whitney)**

La prueba U de Mann-Whitney es completamente equivalente a la prueba de la Suma de rangos de Wilcoxon. Esta es alternativa a la prueba *t* de Student sobre diferencia

de medias en los siguientes casos: 1) cuando no se cumplen los supuestos de normalidad y homocedasticidad o 2) cuando no es apropiado utilizar la prueba  $t$  porque el nivel de medida de los datos es ordinal. En otras palabras, permite evaluar variables ordinales de libre distribución que no presentan el comportamiento de una distribución normal, y determinar si existen diferencias entre grupos independientes (Rivas, Moreno y Talavera, 2013). Cuando la muestra es pequeña ( $n \leq 30$ ) la prueba ofrece el nivel crítico bilateral (2 colas) exacto asociado al estadístico  $U$ , el cual se obtiene multiplicando por 2 la probabilidad de obtener valores menores o iguales que  $U$  (Pardo, s. f.).

No obstante, no hay que olvidar que dicha prueba no está exenta del cumplimiento de los siguientes supuestos: 1) la muestra debe ser representativa de la población objeto de estudio y 2) las observaciones deben ser independientes, es decir, que los datos de cualquier caso en las variables medidas no estén condicionados por los datos de otros casos en la muestra. La prueba contrasta si es estadísticamente significativa la relación entre una variable categórica dicotómica y una variable cuantitativa (u ordinal), haciéndose operativo este contraste a través de la comparación de una estimación basada en rangos de la posición de los dos subgrupos de casos definidos por la variable categórica. De esta manera se obtienen las siguientes hipótesis:  $H_0$ : Media A=Media B y  $H_a$ : Media A $\neq$  Media B. Rechazar la hipótesis nula equivale a afirmar que existen diferencias significativas entre los grupos independientes, y esto es posible cuando el  $p$  valor obtenido en la prueba es menor al nivel de significancia estadística  $\alpha=0,05$  (Molina y Rodrigo, 2014).

#### 1.3.4. Fase 4: Regulación de las concentraciones de C y N en la zona de estudio

Los aspectos cualitativos de las fases 1 y 2, y cuantitativos de la fase 3 permitieron realizar el análisis de las posibles alternativas de manejo sostenible para regular las concentraciones de carbono y nitrógeno en el área de estudio. A partir de esto se elaboró el listado de las alternativas más adecuadas de acuerdo al contexto de Zona Bananera.

Como herramienta para dicho análisis se plasmaron en la cartografía de la zona las concentraciones obtenidas en la caracterización analítica de cada parámetro químico mediante el Método Kriging de interpolación espacial en el programa QGIS 2.14 Essen, el cual arrojó mejores resultados de visualización de los datos en comparación con los métodos IDW (ponderación de distancia inversa) y Spline.

##### ***1.3.4.1. Método Kriging***

Es un método geoestadístico de interpolación espacial univariante/multivariante, estocástico, local, exacto y gradual; basado en el cálculo de valores desconocidos de una variable espacial a partir de otros valores cuyo valor es conocido, el cual proporciona el mejor estimador lineal no sesgado con una varianza mínima. El resultado obtenido mediante este proceso se denomina superficie estadística, es decir, una superficie continua con valores interpolados a partir de las propiedades estadísticas de los datos de partida (Estévez, 2019; Quesada, 2019).

## Capítulo 2

### Marco referencial de la investigación

#### 2.1. Antecedentes y estado del arte

Los fertilizantes empleados para suplir los requerimientos nutricionales de los cultivos generan cambios químicos en el suelo, que afectan la dinámica de los nutrientes, dosis y fuente utilizada, sistema de aplicación y características del suelo. Así mismo, el aumento en los niveles de determinado nutriente aplicado al suelo, su persistencia y residualidad en el tiempo pueden modificar las reacciones que tienen lugar en él y también la disponibilidad de otros elementos esenciales para la nutrición, influyendo sobre la productividad de las cosechas y afectando la calidad del ambiente. Un aspecto que es necesario resaltar es el hecho de que la aplicación de fertilizantes, en especial los nitrogenados, en la mayoría de los casos genera acidificación del suelo y por consiguiente la pérdida de bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) por el lavado y transporte a horizontes subyacentes (Sadeghian, 2003).

Se han realizado muchos estudios en torno a este tema, entre los cuales se destacan tres desarrollados por López (1965); Valencia, Gómez y Bravo (1975); Sadeghian et al. (2001) en la zona cafetera colombiana, respectivamente. El primero, se enfocó en la determinación (durante 25 meses) de los cambios ocurridos en un suelo franco-arenoso de la Unidad Chinchiná como consecuencia de la aplicación de algunos fertilizantes; el segundo evaluó el efecto que tiene la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno (durante tres años) sobre la fertilidad del suelo en cuatro localidades a través de un experimento en el que se utilizaron macetas de 25 litros de capacidad; y el tercero estuvo orientado hacia

la evaluación de las características del suelo en diferentes agroecosistemas del departamento del Quindío. En todas estas investigaciones se encontró una disminución en los valores de pH (mayor acidez) y pérdidas significativas por desplazamiento de las bases intercambiables ocasionada por la utilización excesiva de fertilizantes nitrogenados. Otras investigaciones efectuadas por Rivera y Martín (1979); Bustamante et al. (1987); Vásquez et al. (1991) en Centro y Suramérica confirman que las fuentes nitrogenadas tienen un efecto importante sobre la acidificación y pérdida de las bases intercambiables a mediano plazo en los suelos cultivados con café.

De la misma forma, otro estudio realizado por Sadeghian (2003) evaluó el efecto que tiene la fertilización con N, P, K y Mg sobre las características químicas de los suelos cultivados con café de 34 fincas y siete subestaciones experimentales del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) que pertenecen a 10 departamentos colombianos (Antioquia, Caldas, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Guajira, Risaralda, Quindío, Santander y Tolima) con marcadas diferencias en suelo y clima. Para este experimento se recolectaron muestras de suelo y se definieron cinco tratamientos utilizando el diseño por bloques completos aleatorizados, con diferentes combinaciones de los nutrientes; uno de ellos con todos los elementos y los otros cuatro escogidos con base en el criterio del elemento faltante. Además, la urea, el superfosfato triple-SFT, el cloruro de potasio y el óxido de magnesio se emplearon como fuentes nitrogenadas en las cantidades (dosis) recomendadas por Cenicafé. Los resultados de esta investigación evidenciaron que el contenido de MO no presentó cambios a través del tiempo y que la principal causa de su pérdida se relaciona con la erosión, mientras que las ganancias provienen de los aportes de materiales orgánicos

de distinta naturaleza. Así mismo, se concluyó que el establecimiento de cafetales de alta densidad contribuye a incrementar el COS como consecuencia de la acumulación de residuos orgánicos y un mayor control de la erosión; no obstante, para el caso de estudio no se esperan efectos significativos a corto plazo. En ninguno de los tratamientos se vieron afectados los niveles totales de nitrógeno por aplicación de urea, las variaciones registradas fueron explicadas en función casi exclusiva de los contenidos de MO. Tampoco se detectaron incrementos de nitratos seis meses después de la última fertilización como resultado del suministro de N. Por otro lado, la aplicación de P permitió elevar los niveles iniciales de dicho elemento registrando una alta variabilidad entre los valores finales; los valores de pH se incrementaron cuando se excluyó el nitrógeno de los planes de fertilización y se presentó una tendencia a incrementar los niveles de este elemento en los tratamientos que incluían el magnesio; así como también un efecto sobre las bases intercambiables  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ .

Por otro lado, investigaciones desarrolladas por Amaguaña et al. (1995); Núñez et al. (2006); Bautista et al. (2017) a nivel nacional se han enfocado en el efecto de la fertilización edáfica y foliar sobre el rendimiento de diferentes cultivos. Se encontró en un estudio realizado en el municipio de Landázuri (Santander- Colombia) en el que se utilizó el diseño experimental de bloques al azar para determinar la respuesta agronómica y económica del cultivo de cacao a la fertilización con N, P y K utilizando diferentes dosis y realizando el respectivo análisis de suelo en cada etapa del experimento (Uribe, Méndez y Mantilla, 1998). Además, Puentes, Menjivar y Aranzazu (2014) desarrollaron una investigación en la que se determinó la eficiencia en el uso de estos tres nutrientes (N, P y

K) sobre clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) y también la forma en la que se modifica el rendimiento del cultivo, teniendo en cuenta que un aporte excesivo de dichos elementos puede ocasionar un elevado riesgo ambiental y pérdidas económicas importantes.

Fonseca y Piña (2006) desarrollaron un estudio para determinar el efecto generado sobre el rendimiento y la calidad del fruto del pimiento (*Capsicum annun* L.) cultivar Bouquet-50 bajo condiciones de secano, debido a la aplicación de diferentes concentraciones de nitrógeno en un suelo de la Estación Agrícola perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias - IIA “Jorge Dimitrov” ubicado en la provincia de Granma (Cuba). En dicha investigación se trabajó con un diseño experimental en bloques al azar a partir del cual se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos respecto al rendimiento del cultivo y con relación a la calidad del fruto los niveles de nitrógeno aplicados no representaron cambios relevantes ni afectaciones. También se encontró otro análisis desarrollado por Piraneque, Aguirre y Menjivar (2007) en el que utilizaron esta misma metodología, el cual estuvo enfocado en conocer la evolución en el contenido de elementos nutrientes en un suelo Sulfic Endoaquepts cultivado con cebolla de bulbo en el municipio de Tibasosa, Boyacá. Los resultados obtenidos permitieron entender el comportamiento de los macro y micronutrientes en estudio, así como también las interacciones positivas y negativas que se dan entre ellos que pueden afectar sus concentraciones y disponibilidad en el suelo. A partir de esto se dedujo que el rendimiento de los cultivos en determinada zona puede incrementarse si las concentraciones de nutrientes son las adecuadas. De la misma manera, la investigación de Puentes, Gómez y Menjivar (2016) determinó cómo las relaciones entre nutrientes a nivel foliar afectan el

rendimiento de los cultivos, específicamente en cuatro clones de cacao fino (*Theobroma cacao* L.) del Centro de Investigación de la Federación Nacional de Cacaoteros.

En relación con la fertilización de suelos empleando nitrógeno (N), Delgado, Menjivar y Muñoz (2016) mencionan que este es uno de los principales macronutrientes empleados en la fertilización de los cultivos y su contribución puede darse de forma inorgánica u orgánica; siendo la fijación de la materia orgánica y biológica por la acción microbiana una fuente importante de este nutriente. En este sentido, se han desarrollado investigaciones encaminadas a determinar la cantidad de nitrógeno rápidamente mineralizable aportado a los cultivos; algunos autores como Celaya y Castellanos (2011) afirman que no es fácil conocer la disponibilidad real de este elemento debido a los inconvenientes que presentan algunos métodos de laboratorio para su determinación; otros como López y Campos (2012) exponen que una forma de evaluar la disponibilidad del nitrógeno en el suelo es mediante pruebas de mineralización que permitan estimar variables como liberación y riesgo potencial de pérdida del nutriente. Por su parte, Cabrera y Zuaznábar (2010) consideran que el nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo del cultivo de caña de azúcar (*S. officinarum*). Para este cultivo específico, Delgado et al. (2016) realizaron un estudio en los suelos de Palmira, Valle del Cauca (Colombia) de clasificación Pachic Haplustoll (específicamente en las fincas San Jerónimo y La Paz), que tuvo como objetivo determinar el contenido de nitrógeno rápidamente mineralizable mediante las metodologías Illinois Soil Nitrogen Test (ISNT) y Direct Steam Distillation (DSD), comparando los resultados obtenidos con miras a realizar las

recomendaciones respectivas para el cultivo bajo dos sistemas; uno orgánico y el otro convencional.

En china, Ju et al. (2009) examinaron los rendimientos de grano y vías de pérdida de N usando un enfoque sintético en dos sistemas intensivos de doble cultivo los cuales eran: arroz anegado y trigo de tierras altas en la región Taihu ubicada al este del país versus trigo de riego y maíz de secano localizado en la llanura del norte de China, con el fin de reducir los riesgos al ambiente mediante una mejora en la gestión del nitrógeno en ambos sistemas agrícolas. En este estudio los autores encontraron que las prácticas de fertilización actuales no aumentan significativamente el rendimiento de los cultivos, sino por el contrario conducen a pérdidas de nitrógeno hasta dos veces mayores al ambiente; y aclaran que es posible conseguir el equilibrio adoptando técnicas más óptimas que ayuden a controlar las principales vías de pérdida de este nutriente reduciendo de manera significativa el riesgo ambiental.

Es importante mencionar que el contenido de materia orgánica (MO) tiene una gran influencia sobre la retención y disponibilidad de fósforo (P) en los suelos. De hecho, los autores Bravo, Montoya y Menjivar (2013) trabajaron este tema en un Typic Melanudands (cultivado con café y guamo como sombrío) ubicado en el municipio de Cajibío del departamento del Cauca (Colombia) mediante isotermas de adsorción, basadas en el método aplicado por Fox y Kamprath (1970) en su estudio sobre sorción de fosfato en suelos. Los resultados obtenidos para este estudio indican que estos suelos presentan alta retención de fósforo lo cual impide su pérdida hacia otros horizontes y por consiguiente evita la contaminación de las aguas; además se corroboró el efecto que tiene la materia

orgánica sobre la retención fosfórica que aumenta gradualmente la disponibilidad de este elemento para el cultivo.

Otra variable que tiene relevancia a nivel mundial es el Carbono Orgánico del Suelo (COS), el cual puede ser desestabilizado por diferentes mecanismos a medida que aumenta la profundidad en el perfil; de ahí que resulte importante conocer su distribución vertical en un área determinada. Una investigación reciente llevada a cabo en México por Paz y Etchevers (2016) caracterizó esta distribución a través de modelos empíricos (funciones matemáticas) de variación del COS con la profundidad, ajustados mediante regresión lineal analizando la base de datos de perfiles de suelo INEGI-COLPOS; y adicionalmente estimó el Carbono Orgánico Inerte (COI) teniendo en cuenta los ecosistemas o el tipo de vegetación de México a través del desarrollo de un esquema basado en el modelo logarítmico seleccionado. Los resultados obtenidos para ambos casos utilizando únicamente los primeros 30 cm del perfil del suelo muestran ser apropiados por lo que son factibles de ser implementados de manera operativa.

Numerosos estudios en Colombia se han enfocado en cuantificar las reservas totales de carbono dentro de diferentes compartimentos de bosques tropicales y neotropicales heterogéneos, incluyendo biomasa aérea, biomasa subterránea, necromasa y suelos; tal es el caso de las investigaciones realizadas por Jenny (1950) y Loaiza et al. (2010, 2013). No obstante, Lis, Rubiano y Loaiza (2019) en su estudio sobre el COS en el Páramo de Guerrero (Cundinamarca-Colombia) estimaron el impacto que tiene diferentes usos de la tierra sobre la calidad de los suelos y propusieron como indicadores de la dinámica del COS el uso de stocks de carbono e índice de estratificación; todo esto con el fin de

comprender la variabilidad de dicho elemento bajo condiciones cambiantes de clima y uso del suelo. Así mismo, estos autores afirmaron que la información referente al tema en estudio es escasa o inexistente, especialmente cuando se trata de la relación COS-uso de la tierra y las consecuencias que se generan sobre la calidad del recurso.

Para Perea (2003), los cultivos de banano y plátano son uno de los más importantes a nivel mundial debido a que hacen parte de la alimentación de alrededor de 400 millones de personas. En Colombia, en el año 2019 existían 51.227 ha de banano con una producción de 100,2 millones de cajas que sumaron USD 852,8 millones en exportación (MinAgricultura, 2020). Para este caso, es necesario resaltar que el nitrógeno es uno de los principales nutrientes durante el desarrollo de los cultivos y que es absorbido en forma de nitrato, nitrito y amonio por las raíces de las plantas; siendo el nitrato la forma más móvil en el suelo y también la que se pierde con mayor facilidad por lixiviación (Benimeli et al., 2019). También, Zapata y Osorio (2010) mencionan que los residuos de las plantas son una fuente sustancial de este elemento, que a menudo depende de los procesos de degradación del material orgánico por la acción de la biomasa microbiana. Robinson y Galán (2011) citado por Torres et al. (2014) exponen que la mayoría de los estudios que evalúan la fertilización con nitrógeno en el cultivo de banano han estado orientados a la medición de la producción como respuesta principal y se han obtenido resultados diferentes debido a las diversas interacciones que se dan entre el cultivo, el sistema suelo, las condiciones ambientales y la cantidad de nitrógeno aplicada.

Existen análisis que validan esta información como, por ejemplo, aquellos realizados por Colque, Iquize y Ferrufino (2005); Aristizábal (2010), los cuales trabajaron

con diferentes tipos de suelo y cultivos obteniendo resultados favorables en la producción con dosis bajas de nitrógeno (<300 Kg/ha); en comparación con los desarrollados por Castillo et al. (2011) y Yang et al. (2013), en los que se alcanzó una mayor producción con cantidades superiores a 350 Kg/ha de este elemento. Adicionalmente, Torres et al. (2014) en otra investigación evaluó a través de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno la absorción, distribución y acumulación de dicho nutriente durante dos ciclos de producción del cultivo de banano “Williams” (Musa AAA) en Urabá (Colombia) con el fin de adaptar los valores teniendo en cuenta los requerimientos nutricionales por fase de desarrollo.

Vásquez et al. (2011) realizaron un estudio encaminado a analizar las formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). En este fueron evaluados los contenidos y algunas formas de COS en cinco zonas ubicadas al noroccidente del departamento con características similares de clima, relieve y tipo de suelo; y son las siguientes: dos de ellas en el costado occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, una localizada en la granja de la Universidad del Magdalena y las dos últimas en la Zona Bananera. Los autores también buscaban conocer el efecto que tienen las prácticas agrícolas relacionadas con los cultivos de café (*Coffea arabica*), banano (*Musa sp.*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*) y sábila (*Aloe vera*) sobre dicha variable al tiempo que realizaban comparaciones con suelos de bosques naturales en cada una de las zonas. Además, realizaron caracterización física y química de los diferentes parámetros en suelo y el análisis de los resultados se llevó a cabo por medio de pruebas de Kruskal Wallis para muestras independientes con el programa Statgraphics Centurión XVI (2011), en el caso de las variables relacionadas con las formas de carbono y la relación C/N. Los

resultados mostraron valores medios a bajos de materia orgánica en todas las áreas y contenidos más altos de carbono total en suelos de bosques que en aquellos cultivados. Además, se encontró que en los suelos cultivados con *Musa* sp. el carbono total (Ct) correspondía a las formas de carbono oxidable en su totalidad, mientras que en aquellos cultivados con *Elaeis guineensis* las formas de carbono no oxidable representaban el 83% del carbono total. Esta investigación permite comprobar que el uso y manejo de los suelos en el piso térmico cálido del Magdalena influye notablemente sobre los contenidos de las diferentes formas de carbono presente en este sistema siendo menores en los suelos dedicados al cultivo, y que la fracción de carbono oxidable representa más del 50% del C total en todas las zonas estudiadas.

Conviene resaltar que los suelos ubicados al noreste del departamento del Magdalena presentan bajas tasas de acumulación de materia orgánica y un reducido periodo de transformación que ocasionan la degradación rápida y progresiva de los mismos (López et al., 2003). Con respecto a este problema Follett y Schimel (1989); Gregorich et al. (1996); Pulleman et al. (2000); Almendros (2004); Rodríguez, España y Cabrera (2004); Abera y Belachew (2011) han llevado a cabo investigaciones que buscan mitigar los efectos sobre el recurso; no obstante, todos se han enfocado en los aspectos cuantitativos analizando únicamente el contenido total de la materia orgánica del suelo (MOS). Por lo anterior, es importante mencionar un estudio realizado por Vásquez, Schellekens y Kaal (2015) en la que a diferencia de los otros, llevaron a cabo una caracterización a nivel cualitativo por pirólisis-CG/EM para conocer la composición molecular de la materia orgánica presente en diferentes suelos agrícolas (café, palma de aceite, banano, frutales,

hortalizas) y en sistemas de bosques naturales de seis zonas edafoclimáticas del departamento que abarcan los municipios de Santa Marta, Ciénaga (estribaciones de la Sierra Nevada), Zona Bananera, Dibulla y Aracataca. El análisis de la información recolectada a través de un muestreo aleatorio estratificado (una muestra compuesta por diez submuestras en cada zona) se llevó a cabo mediante un ANOVA con arreglo factorial de dos factores: usos del suelo y zonas de muestreo, con el fin de determinar si existen diferencias estadísticas entre ellos y su interacción. Finalmente, como resultado se encontró que aquellas zonas que presentan mayor pluviosidad y menores promedios de temperatura generan aportes considerables de materia orgánica de origen microbiano y en menor medida MO de origen vegetal para ambos usos del suelo, en comparación con las zonas más secas donde la proporción de materia orgánica de origen vegetal fue mayor.

Vásquez, Macías y Menjivar (2013), desarrollaron otro estudio al noroccidente del departamento del Magdalena, región considerada de alta tradición y vocación agrícola debido a que la mayor parte del área está sembrada con cultivos de gran importancia económica para dicho departamento. Este consistió en evaluar el efecto que tiene el uso del suelo sobre la actividad biológica medida de forma indirecta por el CO<sub>2</sub> respirado y también su relación con diferentes formas de carbono. Para cumplir con el objetivo, los autores propusieron un muestreo aleatorio estratificado seleccionando seis zonas cada una de ellas diferenciadas por tipo de uso del suelo (cultivo y bosque) y teniendo en cuenta una profundidad de muestreo entre 0 y 20 centímetros. En el año 2017, Vásquez y Macías llevaron a cabo una investigación similar en esa misma área y bajo las mismas condiciones, pero con el propósito de evaluar la variación de los almacenes de las distintas formas de

carbono, considerando como hipótesis que el COS se ve afectado por los cambios en el uso del suelo, sin ignorar las pérdidas de C en aquellos suelos que se encuentran bajo una agricultura intensiva (Vásquez y Macías, 2017).

También se han realizado algunos estudios en la ciudad de Santa Marta (Magdalena) entre los que se destacan los siguientes. El primero enfocado en la variabilidad espacial de las propiedades físicas (humedad, textura, densidad aparente, conductividad hidráulica y resistencia a la penetración) y químicas (MO, pH, CIC, N, P,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ , Cu, Zn, Fe, Mn, B) en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena, cuyo análisis fue desarrollado con enfoque univariado, geoestadístico y multivariado, y reveló que las propiedades de los suelos de la granja presentan altos niveles de variación y que estos están relacionados con la heterogeneidad de toda el área de estudio (Vásquez, Baena y Menjivar, 2010).

El segundo desarrollado en la misma universidad bajo tres usos de suelo: natural, representado por relictos de bosque seco tropical con más de 20 años de edad, sistemas agrícolas de la granja del programa de agronomía usados por más de 25 años con manejo intensivo convencional en riego, control fitosanitario, fertilización y preparación del terreno; y suelos de zonas verdes (canchas, gramas, áreas de esparcimiento) con alrededor de 15 años de edad, que tuvo como objetivo evaluar los efectos que tiene el uso de la tierra sobre algunas características físico-químicas del suelo, para lo cual los autores llevaron a cabo estadística descriptiva de las variables, análisis de varianza con p valor menor a 0,05 y una prueba de comparación de medias de Tukey con  $p < 0,01$ . Esto permitió comprobar que las variables analizadas se encuentran relacionadas con el uso actual del suelo y que

afecta de forma directa las características físico-químicas del recurso haciendo necesario un seguimiento para el manejo adecuado de la zona. Así mismo, se encontraron los mayores contenidos de carbono en las zonas verdes las cuales deben priorizarse como potenciales sumideros de CO<sub>2</sub> y ser conservadas para mitigar el impacto de las actividades humanas; las áreas de bosque presentaron mayor porosidad lo cual resulta importante por su contribución a la regulación hídrica para el mantenimiento de acuíferos; finalmente, los suelos dedicados al cultivo mostraron los valores más altos de conductividad eléctrica y pH que indican la pérdida de funciones ecosistémicas para el almacenamiento de carbono y la regulación hídrica (Aguirre et al., 2018a).

El tercero fue un experimento de campo llevado a cabo en 2016 por Piraneque, Aguirre y Reis (2018) en el Centro de Desarrollo Agrícola y Forestal de la Universidad del Magdalena, sobre suelos clasificados como Typic Ustipsamments de origen aluvial. En este estudio los autores demuestran la importancia de mantener la cobertura vegetal e implementar abonos verdes en la región del Caribe colombiano, y concluyen que el uso de abonos verdes es una magnífica alternativa para el secuestro de carbono bajo condiciones semiáridas, lo cual también puede ayudar a mitigar los efectos producidos por el cambio climático.

Para el caso específico del municipio Zona Bananera, otra investigación desarrollada en el año 2015 y presentada por Oscar Fradique Escobar Pardo como tesis de maestría se enfocó en la determinación de las respuestas espectrales del cultivo de banano, específicamente Musa AAA simmonds, a la fertilización con potasio y nitrógeno usando el equipo FieldSpec 4 Hi-Res Spectroradiometer (ASD Inc.). No obstante, el área de

estudio abarcó únicamente la finca Puerto Rico, ubicada en la cabecera municipal Prado Sevilla y se llevó a cabo un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos. Finalmente, el análisis de los resultados se realizó a partir de un ANOVA unifactorial y también se hallaron las correlaciones múltiples entre medias muestrales con la prueba de Duncan para aquellos cuyas diferencias fueron estadísticamente significativas. En este estudio se obtuvieron los resultados del análisis del contenido de nitrógeno y potasio en hoja y suelo; haciendo especial énfasis en el área foliar debido a que las respuestas espectrales fueron tomadas en las hojas del cultivo. Los contenidos de estos nutrientes para las etapas fenológicas, reproductiva y productiva concordaron con los contenidos óptimos de nutrientes que debe tener un cultivo de banano y es importante anotar que su comportamiento es afectado por factores como la época del año, etapas fenológicas, demanda nutricional y condiciones microbiológicas del suelo (Escobar, 2015).

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica efectuada es importante hacer énfasis en que en el municipio de Zona Bananera (Magdalena) no se han realizado investigaciones que permitan conocer el comportamiento y las concentraciones de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el carbono, así como también las posibles afectaciones sobre los recursos agua y suelo en esa área; por tal razón se hace necesario enfocar este estudio en el análisis de las concentraciones de carbono, nitrógeno y la relación C/N en los suelos, además de conocer la influencia de estos nutrientes sobre el contenido de nitratos en las principales fuentes de agua del municipio.

## 2.2. Marco teórico o conceptual

### 2.2.1. Qué es el suelo y su importancia

A través de los años, el suelo ha sido definido de distintas maneras en la búsqueda por obtener una mejor comprensión del recurso y su importancia. Algunos autores lo consideran como una formación natural resultante de procesos de meteorización, otros lo definen como un componente fundamental o recurso natural finito no renovable y heterogéneo. Estas concepciones no son erradas, debido a que dependen del contexto en el que sea definido y para qué es utilizado el recurso; por ejemplo, para un ingeniero civil enfocado en la construcción el suelo se define de una manera diferente a la que tendría un ingeniero ambiental o agrónomo que estudian su calidad y fertilidad. No obstante, y teniendo en cuenta lo propuesto por distintos investigadores, una correcta definición de suelo puede ser la siguiente:

El suelo es un sistema complejo y heterogéneo en el que los constituyentes, propiedades y génesis son resultantes de la acción de factores activos (clima, organismos vivos) sobre factores pasivos (la roca madre y el relieve), independientemente del tiempo transcurrido; y en el cual ocurren de manera continua y conjunta procesos físicos, químicos y biológicos que le proporcionan una morfología y propiedades características. El suelo está compuesto por elementos minerales y orgánicos en estado sólido, líquido y gaseoso; aire, agua, macro, meso y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipos biótico y abiótico, los cuales se interrelacionan dando lugar a distintos niveles de organización con variaciones tanto espaciales (verticales y laterales) como temporales (horarias, estacionales, centenarias y hasta milenarias). Por ello, el suelo también es un

recurso natural finito y no renovable (FAO, 2007; European Commission, 2010) que presta diversos servicios ecosistémicos y ambientales, entre ellos ofrecer los nutrientes necesarios para las plantas convirtiéndose en un ambiente idóneo para su establecimiento y desarrollo, esto se debe a su importante participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros; además de su contribución en la producción de alimentos y materias primas (Gardi et al., 2014; Burbano, 2016; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016; Montenegro et al., 2019; Bernal, Beltrán y Rocha, 2019).

#### 2.2.2. Ciclos de nutrientes

El concepto de ciclo de nutrientes hace referencia a la transferencia de elementos que se da entre el suelo, las plantas y la atmósfera. Cuando los ecosistemas se encuentran en un estado natural y de equilibrio, dicha transferencia se considera autosostenible y cíclica; por ello cada nutriente tiene un “ciclo de vida” diferente y muy específico; aunque varios de ellos suelen aparecer en más de un ciclo. Durante el ciclaje de los distintos elementos ocurren procesos de transformación en los que son creados y pueden almacenarse en el suelo de forma orgánica e inorgánica, también algunos son consumidos por los organismos presentes, los cuales, al morir y descomponerse, devuelven los elementos a la tierra para que el proceso pueda continuar. Es importante aclarar que los ciclos de elementos como el nitrógeno, carbono, oxígeno y azufre, implican transferencias entre la atmósfera, el suelo y las plantas, mientras que otros pueden desarrollar su ciclo únicamente bajo tierra (Gardi et al., 2014).

En las subsecciones siguientes se presentan más detalladamente los ciclos del nitrógeno y carbono objeto de este estudio, así como también su comportamiento en el suelo y las fuentes de aguas superficiales.

### ***2.2.2.1. El ciclo del nitrógeno***

El ciclo biogeoquímico del nitrógeno es uno de los más importantes de la biosfera y por ello resulta necesario tener en cuenta un amplio conjunto de procesos fisicoquímicos y biológicos a los cuales se encuentra sujeto durante su trayecto por los distintos sistemas terrestres. Los principales procesos de conversión del nitrógeno son fundamentalmente cinco: fijación, asimilación, amonificación, nitrificación y desnitrificación; no obstante, otros como la volatilización del amoníaco y la lixiviación de nitrógeno hacia el agua subterránea también se ven involucrados (Eugercios et al., 2017).

Alrededor de  $150 \text{ Tg a}^{-1}$  de nitrógeno antropogénico son introducidos en el ciclo terrestre, de los cuales  $9 \text{ Tg N a}^{-1}$  se mantienen retenidas a largo plazo en los suelos agrícolas. El proceso de transformación de nitrato en nitrógeno gaseoso, conocido como desnitrificación, elimina entre  $17$  y  $20 \text{ Tg N a}^{-1}$  de los suelos, mientras que  $48 \text{ Tg N a}^{-1}$  son transportados por la atmósfera desde las franjas terrestres hasta el interior de los océanos. A pesar de esto, la mayor parte de este elemento ( $65 \text{ Tg N a}^{-1}$ ) es transferida hacia los ecosistemas acuáticos, principalmente desde los campos agrícolas por contaminación difusa; con relación a ese total,  $15 \text{ Tg N a}^{-1}$  se lixivian a las aguas subterráneas, y aproximadamente  $35\text{-}50 \text{ Tg N a}^{-1}$  son exportadas a través de los ríos y una parte de este es retenido en lagos pequeños donde  $9,3 \text{ Tg N a}^{-1}$  son eliminadas por desnitrificación y sedimentación. La intervención humana ha duplicado las entradas de nitrógeno en su ciclo

global, lo cual causa acumulación en los sistemas atmosfera, suelo y agua y trae consigo impactos negativos para el medio ambiente e incluso para la salud humana, afectando indirectamente los ciclos de otros elementos tales como el fósforo, carbono y azufre (Eugercios et al., 2017).

El nitrógeno (N) es considerado como uno de los elementos críticos para el desarrollo de las plantas, debido a que hace parte de la estructura de la clorofila, los ácidos nucleicos (ADN, ARN) y las proteínas. Es muy abundante en el aire; sin embargo, el nitrógeno en su forma gaseosa atmosférica no puede ser asimilado ni aprovechado por los cultivos y animales, de ahí que se hace necesario que éste sea transformado a un estado en el que pueda ser fácilmente utilizado. Por un lado, el agua de lluvia contiene cantidades sustanciales de este nutriente en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) los cuales son absorbidos con facilidad por las raíces de las plantas cuando entran en contacto con el suelo. Así mismo, la degradación de la materia orgánica contribuye a la mineralización del nitrógeno orgánico presente en el suelo, lo cual libera ion amonio. Esta forma de nitrógeno se oxida y pasa a la forma de nitrato bajo ciertas condiciones ambientales como temperatura, humedad, aireación y con la presencia de determinadas especies de vegetales; ambas son disponibles para los cultivos. La meteorización mineral, la orina y la aplicación de fertilizantes nitrogenados también contribuye al aumento de las concentraciones de este nutriente en el suelo (Gardi et al., 2014).

La figura 6 muestra el ciclo global del nitrógeno en los sistemas suelo, agua, aire y sus respectivas transformaciones.

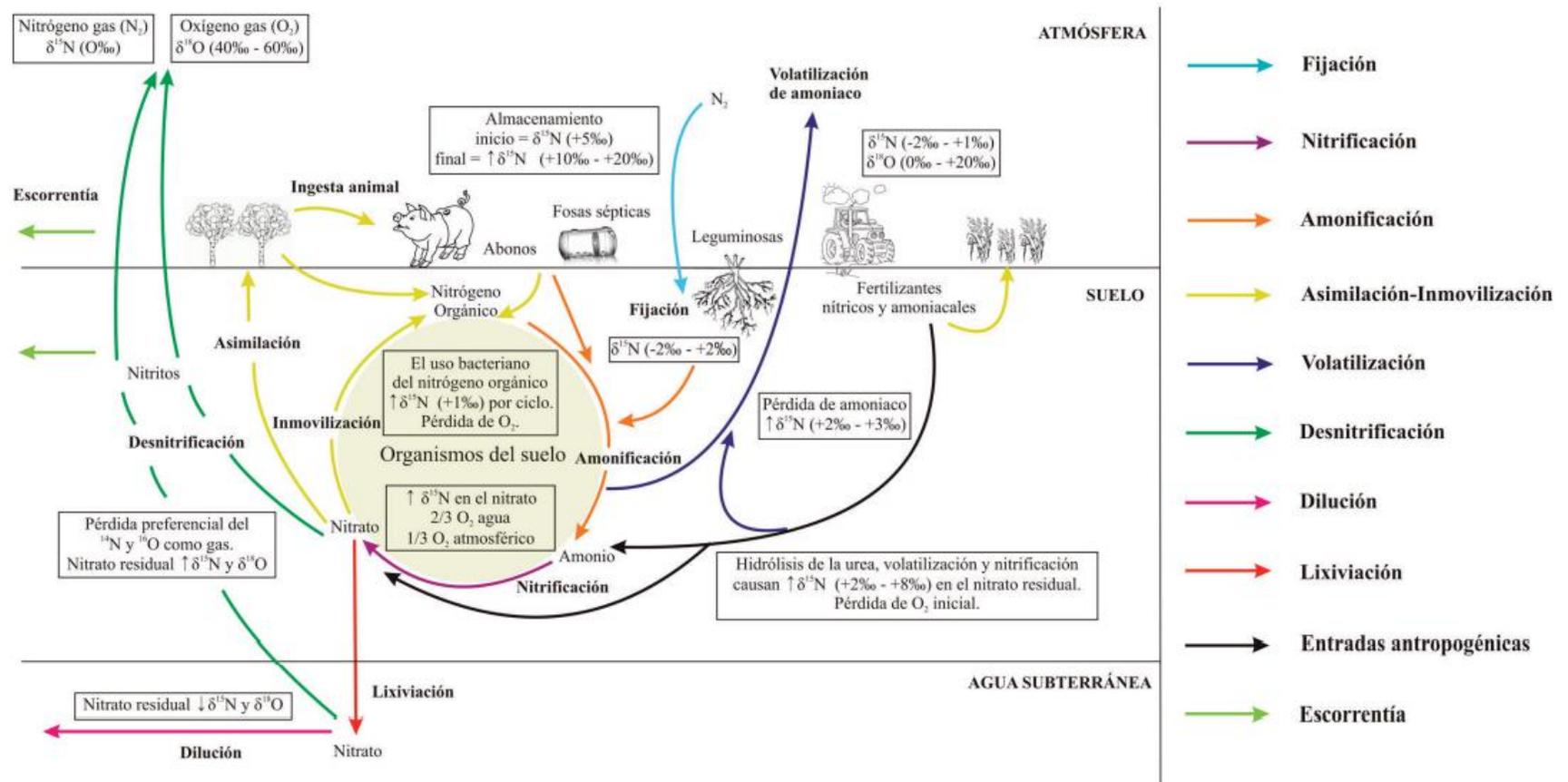


Figura 6. El ciclo del nitrógeno, procesos y transformaciones del nitrato. Tomado de: Eugercios et al. (2017)

El nitrógeno es uno de los principales nutrientes para el desarrollo de los cultivos, principalmente en la etapa vegetativa. Su contenido en las plantas puede variar entre el 1 y 6% en peso seco; y comúnmente es absorbido por sus raíces en las formas de nitrato, nitrito y amonio, siendo el nitrato la forma más móvil en el suelo y también la que se pierde con mayor facilidad mediante el proceso de lixiviación. Los residuos vegetales resultan ser una fuente importante de nitrógeno; sin embargo, su aporte al suelo depende en gran parte de la descomposición de la materia orgánica producida por la biomasa microbiana (Torres et al., 2014).

En ecosistemas naturales (sin intervención antrópica), el crecimiento de la planta es lento y la captura anual de nitrógeno es baja (aproximadamente 30 kg N/ha) en comparación con la de los suelos cultivados donde se presenta mayor demanda de nitrógeno (en promedio 500 kg N/ha). Por otro lado, la cosecha supone generalmente la extracción de materia orgánica, esto significa que hay una exportación de N y otros elementos del suelo a diferentes lugares; en estos casos el ciclo natural del N es insuficiente para mantener el crecimiento óptimo del cultivo y por lo tanto se hace necesario añadir nitrógeno al suelo de forma artificial mediante el uso de fertilizantes para contrarrestar dicha deficiencia, aumentando el crecimiento vegetal, la cantidad de proteínas y el rendimiento en la producción. No obstante, concentraciones de este nutriente por encima de lo que pueden utilizar las plantas puede ser lavado del suelo y acumularse en las fuentes de aguas superficiales (Gardi et al., 2014).

La conversión del N orgánico en N inorgánico se denomina mineralización,<sup>54</sup> proceso que es mediado por los microorganismos del suelo (Monsalve, Gutiérrez y Cardona, 2017). Cuando las cantidades de este elemento son altas, los microorganismos disponen de mayor capacidad para llevar a cabo este proceso debido a que satisface sus requerimientos de nitrógeno; por el contrario, si el contenido de este nutriente es bajo la descomposición de la materia orgánica disminuye de forma drástica y la mineralización dependerá de los que suministren las fuentes nitrogenadas. La biomasa microbiana asimila la cantidad necesaria de N que depende de la relación C/N, si el elemento C es menor que y N mayor con respecto a la necesaria por los microorganismos habrá una mineralización neta de N y liberación de N orgánico para las plantas; de la misma manera la relación C/N nos indica cuando se ha estabilizado la degradación de la materia orgánica (Cantú y Yáñez, 2018).

#### *El nitrógeno en aguas superficiales*

Los recursos hídricos se han visto fuertemente afectados por el flujo de sedimentos y nutrientes que son transportados hacia los cuerpos de agua, las actividades antrópicas han afectado drásticamente las cargas de nutrientes a los ríos con el uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos que afectan la calidad de estos por el uso indirecto de nutrientes (Ordóñez, Bravo y Figueroa, 2014).

El amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) son formas reactivas del nitrógeno inorgánico más comunes en los ecosistemas acuáticos y que pueden estar presentes de manera natural en el medio debido a diversos procesos como la escorrentía superficial, deposición atmosférica, descomposición de la materia orgánica, fijación

biológica del nitrógeno, entre otros. No obstante, las actividades de origen antrópico en<sup>55</sup> especial las fuentes de contaminación puntuales y difusas han generado un aumento de la disponibilidad de dicho nutriente en el planeta, ocasionando muchos problemas ambientales entre los cuales vale la pena resaltar: la acidificación de ríos y lagos, la eutrofización de las aguas y la toxicidad directa de diversos compuestos nitrogenados (Camargo y Alonso, 2007). La principal fuente de contaminación difusa que reviste mayor importancia es la lixiviación de fertilizantes en las superficies agrícolas, tal como se presenta en la tabla 8 adaptada de Eugercios et al. (2017).

*Tabla 8. Importancia relativa de las fuentes difusas de contaminación por nitrógeno antropogénico. Tomado y adaptado de Eugercios et al. (2017)*

<b><i>Fuentes difusas</i></b>	
Lixiviación de fertilizantes en las superficies agrícolas	1
Emisión de gases de fábricas, vehículos y quema de combustibles	2
Fijación biológica de nitrógeno antropogénico en los campos de leguminosas, arroz, etc.	2
Lixiviación de purines de actividades ganaderas	3
1 mayor importancia	
3 menor importancia	

La contaminación de tipo difusa se produce por la lixiviación de nitrógeno en forma de nitratos hacia los cuerpos de agua superficial. Así, la agricultura se convierte en una de las principales fuentes que generan contaminación sobre los recursos hídricos no solamente por este elemento sino también por otros nutrientes como el fósforo. Además, el creciente desarrollo de esta actividad ha originado muchos impactos asociados a nivel mundial (FAO, 2011), tales como la escasez de agua, inundaciones, pérdida de biodiversidad,

deforestación, desertificación, pérdida de fertilidad en los suelos, procesos erosivos y<sup>56</sup> escasez de terrenos cultivables (Eugercios et al., 2017).

Acidificación: los contaminantes principales de este proceso son el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), los cuales una vez emitidos a la atmósfera tienen la capacidad de reaccionar con otras moléculas como  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$  y  $\text{O}_3$  para formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Estos ácidos llegan a las aguas superficiales a través de la deposición atmosférica y su introducción en el medio acuático puede incrementar las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , así como también la concentración de  $\text{H}^+$  lo cual contribuye en la reducción de pH del agua ocasionando efectos adversos en plantas y animales. Por otro lado, la acidificación de las aguas superficiales puede modificar procesos microbianos de suma importancia para el reciclaje de nutrientes y el adecuado funcionamiento del ecosistema; lo que se ve reflejado en la cesación del proceso de nitrificación y estimulación de la desnitrificación, suspensión del proceso de fijación, disminución de la descomposición de material vegetal con notables cambios en la calidad y disponibilidad de alimento para los invertebrados acuáticos (Camargo y Alonso, 2007).

Eutrofización: Concentraciones elevadas de las formas inorgánicas del nitrógeno ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) pueden promover el desarrollo y proliferación de productores primarios, contribuyendo al fenómeno de eutrofización de los ecosistemas acuáticos; el cual puede ocasionar efectos ecológicos y toxicológicos adversos sobre el recurso. El crecimiento excesivo de este tipo de organismos junto a su posterior muerte y descomposición ocasionan la disminución de la concentración de oxígeno disuelto,

principalmente en aquellas áreas donde la tasa de renovación del agua es demasiado<sup>57</sup> baja, con la consecuente muerte masiva de peces y otros animales (Camargo y Alonso, 2007).

Toxicidad de compuestos nitrogenados: Los animales acuáticos se adaptan mejor a niveles relativamente bajos de nitrógeno inorgánico; por esta razón, concentraciones extremadamente altas de los iones  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  pueden disminuir la habilidad de distintas especies para sobrevivir, crecer y reproducirse, resultando en toxicidad directa de tales compuestos nitrogenados (Camargo y Alonso, 2007).

#### ***2.2.2.2. El ciclo del carbono***

El carbono es el cuarto elemento de mayor abundancia en la Tierra y se estima que constituye aproximadamente el 50% de peso seco de cualquier organismo; además, se encuentra en el agua como compuestos carbónicos disueltos y en el aire como dióxido de carbono. El ciclo del C en un agrosistema inicia cuando este ingresa en el proceso de fotosíntesis y sale del mismo por la respiración radical y microbiana; la diferencia entre la cantidad que ingresa al suelo como residuos vegetales y la que se genera por respiración microbiana representa el balance de este. Durante la descomposición de la biomasa, además de nutrientes, se libera  $\text{CO}_2$ , el cual también es emitido por el proceso de mineralización de la materia orgánica humificada. La suma de la emisión de dióxido de carbono por descomposición y mineralización constituye la respiración microbiana del suelo. El carbono que no es emitido como  $\text{CO}_2$  durante la descomposición pasa a formar parte de la biomasa microbiana en un primer momento y luego se integra a sustancias orgánicas más estables (Villegas, 2014).

Todos los organismos vivos del planeta están compuestos principalmente por<sup>58</sup> carbono, siendo de gran importancia para el desarrollo de estos. Este carbono puede encontrarse en el suelo en dos formas: orgánica e inorgánica, el primero es la base para realizar estudios de carbono en el suelo, y representa el equilibrio entre la dinámica de la absorción del material inerte y la pérdida por mineralización. La mayoría del C se encuentra como carbonatos minerales primarios del material parenteral o secundarios pedogénicos, los cuales originan la formación del suelo. No obstante, la disponibilidad en el suelo mineral de este elemento se ve altamente afectada por la densidad aparente, textura, profundidad, procesos de lixiviación y erosión o mineralización del suelo. Por tanto, el aumento y estabilización de C orgánico del suelo es una opción importante para mejorar la captura de C terrestre (Sánchez, 2016).

Para este autor el ciclo del carbono ocurre de la siguiente manera:

Se fija el carbono inorgánico disponible de la atmósfera, producto de la intervención antrópica, incendios, erupciones volcánicas y la respiración de los organismos vivos.

El carbono se transforma, mediante la fotosíntesis, en carbono orgánico, el CO<sub>2</sub> y el agua, reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno que pasan a estar disponible en la atmósfera.

La planta obtiene energía debido al consumo de algunos carbohidratos y mediante las hojas o raíces libera anhídrido carbónico.

Simultáneamente, una parte es consumida por animales, que de igual manera liberan CO<sub>2</sub> en sus funciones metabólicas.

Finalmente, las plantas y los animales muertos son descompuestos por los<sup>59</sup> microorganismos presentes en el suelo, ocasionando que el C de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera, iniciándose nuevamente el ciclo. La figura 4 muestra el ciclo del carbono en los sistemas atmósfera, suelo y agua.

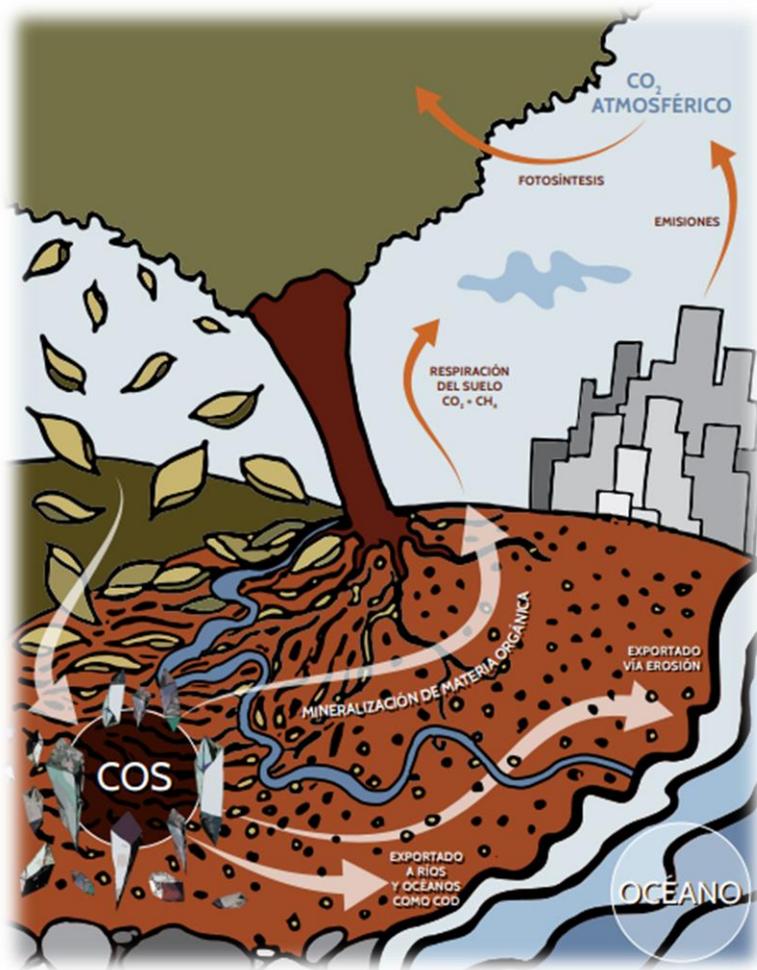


Figura 7. Ciclo del carbono en los sistemas atmósfera, suelo y agua. Tomado de FAO (2017)

### El carbono orgánico del suelo

La reserva de carbono en el suelo comprende dos componentes: El carbono orgánico del suelo (COS) y el carbono inorgánico en el suelo (CIS). El suelo es una

importante fuente de emisión y reservorio de carbono orgánico (CO). De hecho, esta<sup>60</sup> categorizado como el segundo depósito más grande de carbono a nivel global y el más alto en los ecosistemas terrestres, debido a que almacena entre 1.462-1.548 Pg de C en el metro superior lo cual corresponde aproximadamente al doble del que se encuentra en la atmósfera (750 Pg de C) y la vegetación (650 Pg de C) (FAO, 2002b; Paz y Etchevers, 2016; FAO, 2017). Este carbono orgánico del suelo comprende cerca del 70% del carbono presente en la biosfera y más del 71% de las reservas a nivel terrestre (Parras et al., 2015).

El COS es un componente fundamental del ciclo biogeoquímico y su dinámica es dirigida por los flujos de carbono verticales y horizontales; por ello también juega un papel esencial en concordancia con las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo debido a que afecta su fertilidad, productividad y calidad. Al mismo tiempo, las cantidades de este elemento pueden verse reducidas por procesos de degradación tales como la erosión, compactación, pérdida de nutrientes, lixiviación y acidificación; lo cual genera impactos negativos sobre la biodiversidad y la productividad del suelo e inclusive graves problemas ambientales entre los que se mencionan las inundaciones, sequías, escasez de agua subterránea y agotamiento del suelo (Lis et al., 2019). Además, las actividades agrícolas afectan el COS y la degradación de este elemento genera importantes pérdidas, representando una amenaza para la seguridad alimentaria (Aguirre et al., 2018a).

Se ha proyectado para el año 2050 un aumento de la población de 9,2 billones de personas, el cual ha dado lugar a la conversión a escala global de ecosistemas naturales a uso agrícola de la tierra; dicho cambio en el uso del suelo se traduce en grandes emisiones de carbono a la atmósfera. Las áreas agrícolas contienen entre un 25 y 75% menos C que

sus homólogos de los sistemas naturales, con tasas de pérdidas actuales cercanas a  $1,6 \pm 0,8 \text{ Pg C a}^{-1}$ , con un efecto acentuado en los trópicos. No obstante, la restauración ecológica de la biosfera terrestre puede transferir algunas de las emisiones de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera al stock de C terrestre y compensar también las emisiones antropogénicas (Lal, 2014b).

El estudio del ciclo global del carbono es prioritario para entender las consecuencias del incremento acelerado de la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, así como para diseñar estrategias a fin de reducir sus emisiones (Montaño et al., 2016; Valenzuela y Visconti, 2018). En Colombia, los suelos dedicados a la agricultura convencional contienen de 1 a 3% de COS, mientras que los suelos de pastos y bosques por lo común contienen valores mayores. En este contexto, la conversión de los usos del suelo a cultivos o monocultivos resultan casi siempre en pérdidas del COS (Vásquez y Macías, 2017).

#### *La materia orgánica del suelo*

La materia orgánica del suelo (MOS) es definido como un indicador de calidad, tanto en sus funciones agrícolas como en sus funciones ambientales entre ellas la captura de carbono. Así mismo, tiene una influencia directa sobre las propiedades fisicoquímicas de los suelos, convirtiéndose en el principal determinante de su actividad biológica y diversidad (Aguirre et al., 2018a). Es termodinámicamente inestable bajo condiciones óxicas y su presencia en los suelos está explicada por la existencia de condiciones no ideales o de cinética oxidativa y metabólica ralentizada, de tal forma que el carbono (C) no es oxidado a  $\text{CO}_2$  (Vásquez y Macías, 2017).

La contaminación por nitrógeno inorgánico en los sistemas acuáticos trae consigo graves problemas medioambientales, por ello resulta necesario que las actividades de origen antrópico disminuyan radicalmente las emisiones de este elemento al ambiente a fin de evitar o reducir el progreso de tales problemas. De lo contrario, bajo las condiciones ambientales que se derivan del cambio climático global, tales como un aumento en la temperatura y una disminución de las precipitaciones, podrían potenciar los efectos ecológicos y toxicológicos asociados a este tipo de contaminación. La anterior situación se ve reflejada en una mayor concentración de los compuestos nitrogenados como consecuencia de una menor dilución en las aguas superficiales. Además, el aumento en la temperatura del agua también puede ocasionar que algunos organismos ectotermos absorban mayores cantidades de amoníaco, nitrito y nitrato generando toxicidad; y también puede estimular e intensificar la proliferación de productores primarios, dando como resultado una mayor ocurrencia del proceso de eutrofización en el sistema (Camargo y Alonso, 2007).

Las prácticas agrícolas son una fuente sustancial de CO<sub>2</sub> a la atmosfera (Lal, 2014a) que contribuye a la variabilidad climática cuando esta supera la fijación de carbono de las plantas en el proceso de fotosíntesis. Entre un 30 a 50% del carbono se pierde debido a la labranza del suelo, resultando en pérdidas de humedad y biodiversidad de los sistemas edáficos. No obstante, la introducción de biomasa al sistema tiene el potencial de capturar dióxido de carbono mediante el proceso de humificación de la materia orgánica después

del proceso de mineralización y de esta manera aumentar el contenido de COS<sup>63</sup> (Escalante, 2015).

Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la agricultura son muy inciertas en América Latina debido a la falta de políticas de mitigación del clima (Calvin et al., 2016). Sin embargo, la FAO (2014) estima que los GEI derivados de las actividades agrícolas representa el 17% de las emisiones provenientes de la agricultura, las cuales se han duplicado en los últimos 50 años. Por esta razón, es importante tener alternativas para mitigar los impactos producidos sobre el calentamiento global (Piraneque et al., 2018).

#### 2.2.4. Alternativas de manejo sostenible

En las últimas décadas se ha producido un aumento sustancial en las actividades agrarias debido a la necesidad de suministro de productos agronómicos para el procesamiento de alimentos y bienes de consumo, por esta razón ha sido necesario implementar diversos métodos que permitan mejorar la eficiencia de los cultivos, mitigar los impactos desfavorables sobre el suelo, disminuir el uso de fertilizantes químicos y aumentar los ingresos por área cultivada. Un método muy relevante a nivel mundial es la implementación de modelos de agricultura conservadora (AC) considerado como la piedra angular de las prácticas agrícolas. Este tipo de agricultura se enfoca en reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente, aumentar el rendimiento de los cultivos y los insumos, e implementar técnicas para el desarrollo de la agricultura (Carvajal y Carmona, 2012).

La contaminación de los suelos, el uso extensivo y continuo de insumos químicos y el monocultivo ha llevado a la necesidad de incorporar menos fertilización invasiva. La biofertilización es una técnica basada en el uso de insumos naturales tales como

fertilizantes, restos de material orgánico en descomposición, exceso de cultivos,<sup>64</sup> alcantarillado doméstico, estiércol animal y microorganismos como hongos y bacterias; utilizados para mejorar las propiedades del suelo, estimular el crecimiento de los cultivos, reciclar nutrientes, entre otros. La mayor ventaja de esto es que contribuye a mejorar la productividad en periodos cortos de tiempo, además consume menor cantidad de energía, mitiga la contaminación del suelo y agua, aumenta la fertilidad y ayuda al control biológico de organismos patógenos. Los aspectos antes mencionados se traducen en beneficios rentables para los agricultores como consecuencia de menores costos asociados con el proceso de fertilización y mayores rendimientos de los cultivos; es decir, genera beneficios a nivel económico, social y ambiental (Carvajal y Carmona, 2012).

Es claro que, para lograr una agricultura sostenible es necesaria la implementación de planes, programas, proyectos e iniciativas encaminados a la minimización de los impactos ambientales y los consiguientes beneficios para los agricultores y productores. Por ello, es importante incorporar métodos efectivos y factibles para obtener mejores rendimientos y satisfacer la demanda mundial de insumos, mejorando la eficiencia y calidad de los productos agrícolas (Carvajal y Carmona, 2012). La adopción de prácticas agrícolas más sostenibles como el uso de cultivos de cobertura, puede aumentar la captura de carbono del suelo e incrementar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas restableciendo el equilibrio edáfico (Piraneque et al., 2018; Aguirre et al., 2018a).

#### 2.2.5. Pruebas no paramétricas

La mayoría de los procedimientos de prueba de hipótesis estadísticas están basados en la suposición de que las muestras aleatorias se seleccionan de poblaciones normales;

estas pruebas son confiables cuando existen ligeras desviaciones de la normalidad, en<sup>65</sup> particular cuando el tamaño de la muestra es grande. Comúnmente, a dichos procedimientos de prueba se les denomina métodos paramétricos. No obstante, existen otros procedimientos de prueba alternativos, llamados métodos no paramétricos o de distribución libre, que no suponen conocimiento acerca de la distribución de las poblaciones, excepto, quizá, que éstas son continuas. En la ciencia y la ingeniería hay muchas aplicaciones en las que los datos no se reportan como valores de un continuo, sino, más bien, como una escala ordinal en la que es natural asignar rangos a los datos; de ahí que los analistas de datos usen cada vez con mayor frecuencia procedimientos no paramétricos (Walpole et al., 2012).

Cuando es posible aplicar tanto una prueba paramétrica como una no paramétrica al mismo conjunto de datos, se debe aplicar la técnica paramétrica más eficiente. Sin embargo, es importante reconocer que a menudo no es posible justificar las suposiciones de normalidad, y que no siempre se cuenta con medidas cuantitativas. Por esta razón, con las pruebas no paramétricas el investigador tiene más herramientas para adaptar una variedad más amplia de situaciones experimentales. Vale la pena señalar que, incluso basándose en las suposiciones de la teoría normal estándar, la eficiencia de las técnicas no paramétricas se acerca mucho más a la del procedimiento paramétrico correspondiente. Por otro lado, las grandes desviaciones de la normalidad hacen que el método no paramétrico sea mucho más eficiente que el procedimiento paramétrico (Walpole et al., 2012).

### ***2.2.5.1. Prueba de la suma de rangos de Wilcoxon (Prueba U de Mann<sup>66</sup> Whitney)***

La prueba de la suma de rangos de Wilcoxon (U de Mann Whitney) fue propuesta inicialmente en 1945 por Frank Wilcoxon para muestras de igual tamaño y extendido a muestras de tamaño arbitrario por Henry B. Mann y D. R. Whitney en 1947 (AIU, s. f.).

Como se indicó anteriormente, el procedimiento no paramétrico por lo general es una alternativa adecuada para la prueba de la teoría normal cuando la suposición de normalidad no es válida. Cuando se quiere probar la igualdad de las medias de dos distribuciones continuas que evidentemente no son normales, y las muestras son independientes, es decir, que no hay emparejamiento de observaciones, la prueba de la suma de rangos de Wilcoxon o la prueba de dos muestras de Wilcoxon es una alternativa apropiada a la prueba  $t$  de Student de dos muestras. Dicha prueba siempre es superior a la prueba  $t$  para poblaciones definitivamente no normales (Walpole et al., 2012; Quispe et al., 2019).

De acuerdo con Newbold, Carlson y Thorne (2008) y Quispe et al. (2019), la prueba de Mann-Whitney se usa para comprobar la heterogeneidad de dos muestras ordinales. El planteamiento de partida es el siguiente: 1) las observaciones de ambos grupos son independientes, 2) las observaciones son variables ordinales o continuas, 3) bajo la hipótesis nula, las distribuciones de partida de ambas distribuciones es la misma y 4) bajo la hipótesis alternativa, los valores de una de las muestras tienden a exceder a los de la otra:  $P(X > Y) + 0,05$   $P(X = Y) > 0,05$ . La distribución del estadístico de Mann-Whitney,  $U$ , se aproxima a la distribución normal a un ritmo bastante rápido a medida que aumenta el

número de observaciones muestrales. La aproximación es adecuada si cada muestra<sup>67</sup> contiene al menos 10 observaciones.

Para calcular el estadístico U se asigna a cada uno de los valores de las dos muestras su rango, para construir:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad \text{y} \quad U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son los tamaños respectivos de cada muestra;  $R_1$  y  $R_2$  es la suma de los rangos de las observaciones de las muestras 1 y 2, respectivamente. El estadístico U se define como el mínimo de  $U_1$  y  $U_2$ . Los cálculos tienen que tener en cuenta la presencia de observaciones idénticas a la hora de ordenarlas. No obstante, si su número es pequeño, se puede ignorar esa circunstancia. La prueba calcula el llamado estadístico U, cuya distribución para muestras con más de 20 observaciones se aproxima bastante bien a la distribución normal. La aproximación a la normal 'z', cuando se tienen muestras lo suficientemente grandes viene dada por la expresión:

$$z = (U - m_U) / \sigma_U$$

Donde:  $m_U$  y  $\sigma_U$  son la media y la desviación estándar de U si la hipótesis nula es cierta, y vienen dadas por las siguientes fórmulas:

$$m_U = n_1 n_2 / 2 \quad \sigma_U = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}$$

#### **Formulación de hipótesis:**

$H_0: \mu_1 = \mu_2$  No hay diferencia entre las dos poblaciones (misma media)

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$  Hay diferencia entre las dos poblaciones (distinta media)

**Criterio:**

68

Se rechaza  $H_0$ , si  $Z > Z_{\alpha/2}$

Se acepta  $H_a$ , si  $Z < Z_{\alpha/2}$

Donde  $Z$ :  $Z$  obtenido y  $Z_{\alpha/2}$ :  $Z$  crítico = 1,96 a un nivel de confianza del 95%.

En otras palabras: Para todo valor de probabilidad igual o menor que 0,05 se acepta  $H_a$  y se rechaza  $H_0$ ; o, por el contrario, para todo valor de probabilidad mayor que 0,05 se acepta  $H_0$  y se rechaza  $H_a$ .

### 2.3. Marco contextual

La investigación fue desarrollada en el municipio de Zona Bananera al noreste del departamento del Magdalena, un área situada entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Ciénaga Grande que se localiza entre las coordenadas 10° 46' 00" Latitud Norte y 74° 08' 00" Longitud Oeste a una altura de 20 msnm, con temperatura promedio de 27°C, humedad relativa del 82%, evaporación de 1500 mm/año y precipitación de 1371 mm/año, clasificada como Bosque seco Tropical (Bs-T) y Bosque muy seco Tropical (Bms-T) según las zonas de vida de Holdridge (Aguirre et al., 2015; Aguirre et al., 2018b).

La formación vegetal de Bs-T se desarrolla entre los 0 y 1000 msnm, corresponde a la zona agrícola y ganadera más importante en el país y presenta temperaturas medias anuales por encima de los 24°C, así como también precipitaciones medias que van desde los 1000 hasta los 2000 mm/año. En estas zonas se presentan sequías debido a la influencia de los vientos alisios de este-noreste, los cuales soplan durante los meses de diciembre a junio. De la misma manera, el Bms-T presenta una temperatura superior a 24°C; sin embargo, para esta formación los promedios de lluvia oscilan entre los 500 y 1000 mm/año.

Durante el período de sequía en la costa Caribe, la mayoría de los árboles y arbustos<sup>69</sup> pierden el follaje (Vásquez et al., 2015).

En la zona se presenta un régimen de estaciones bimodal con dos épocas lluviosas y dos épocas secas. La primera época lluviosa inicia a mediados de abril y finaliza en junio; la segunda, comienza en agosto y va hasta principios de diciembre. La época seca corresponde a los períodos comprendidos entre enero a abril y de julio a agosto (Aguirre et al., 2012).

Sus suelos son en su mayoría de origen aluvial, profundos de más de 1,2 m, con drenaje de pobre a bueno, texturas francas, franco arcillosas y arenosas, con pH entre 6 y 7, buena fertilidad y contenidos variables de materia orgánica con tendencia a ser bajos en algunas zonas con problemas de salinidad (IGAC, 2009). Además, se destaca por ser una de las zonas agrícolas con cultivos de mayor importancia en esta área de los cuales se pueden mencionar el banano para exportación, la palma de aceite, arroz, cacao y café, entre otros (Cabeza, 2014).

El municipio presenta suelos óptimos para la agricultura y cuenta con la influencia de los ríos principales Tucurínca, Sevilla y Frío los cuales proveen agua durante la mayor parte del año. En la zona baja, el nivel freático está cerca la superficie y cerca de la Ciénaga Grande (gran pantano) y, en la temporada de lluvias, hay inundaciones causadas por desbordamiento de vías fluviales (Aguirre et al., 2015).

Aguirre et al. (2012), llevaron a cabo una investigación en la cual aplicaron el método de polígonos de Thiessen para el análisis de datos meteorológicos, así como

también la determinación de áreas de influencia de las estaciones y los tipos de suelos<sup>70</sup> existentes en la zona de estudio que se presentan a continuación.

La figura 5 muestra las estaciones que inciden sobre el área: Aguja, Zona Sur, Orihueca, Prado Sevilla, Padelma Zona bananera y Aracataca.



*Figura 8. Zona de influencia de las estaciones meteorológicas en el Municipio Zona Bananera.*

*Tomado de Aguirre et al. (2012)*

Según las pruebas estadísticas aplicadas, los autores afirman que existe uniformidad en la distribución de las lluvias entre las estaciones. Sin embargo, la estación Orihueca presenta el mayor promedio semanal (25,2 mm/semana), seguido de la estación Padelma y Aguja (23,7 y 18,7 mm/semana; respectivamente). Además, las estaciones

Padelma y Orihueca tienen la mayor temperatura media, siendo la primera de 27,8 °C;<sup>71</sup> y la segunda de 27,7 °C, reportando los mayores valores de evaporación.

La zona de estudio está formada por estratos sedimentarios del período terciario (3-65 millones de años) de la Era Cenozoica, estos se caracterizan por la presencia de areniscas y arcillas esquistosas amarillas, pardas, gris verdoso y azulado de las épocas del Oligoceno y Mioceno. También se hallan calizas calcáreas, areniscas calcáreas, gravilla, capas de carbón y calizas margosas del Plioceno. Esta formación tiene un espesor significativo y se caracteriza por su fauna miocénica, restos vegetales y capas lignitosas fuertemente bituminosas. El municipio de la Zona Bananera priorizó los suelos de clase I a III para el cultivo del banano, los cuales se encuentran localizados en valles planos ondulados y planicies aluviales con pendientes que van de 0-10% y que son susceptibles de inundación. Así mismo, los suelos de la zona corresponden a Dystric Haplustepts, Typic Dystrustepts y Typic Endoaquepts y son mineralógicamente dominados por caolinita (50%), cuarzo (5-15%), feldespato (5-15%), intercalados (trazas), micas (5-30%), montmorillonita (30-50%) y vermiculita (5-30%) (Aguirre et al., 2018b).

Por otro lado, en la figura 6 se presentan las unidades de suelos predominantes en la zona de estudio, las cuales son: RWA, RWB y RWG.



<i>Suelos</i>	<i>Predominancia</i>
Endoaquerts	30%
Haplusterts	30%
Fluvaquents	15%
Endoaquepts	10%
Haplustepts	10%
Ustifluvents	5%

Por otro lado, los suelos de la Unidad RWB (tabla 10) corresponden a suelos de clima cálido seco y de planicie que están ubicados en terrazas subrecientes y antiguas, o en áreas de relieve plano a ligeramente ondulado. Estos se desarrollan a partir de aluviones de diferente granulometría; además, son suelos profundos a superficiales, con drenaje de bueno a moderado, de texturas finas a medias y con una fertilidad baja a alta.

Tabla 10. Conformación de la Unidad de suelos RWB

<i>Suelos</i>	<i>Predominancia</i>
Haplustepts	50%
Ustifluvents	20%
Plintustults	
NatrustalFs	
Haplustolls	30%
Haplusterts	

Al igual que la Unidad RWA, los suelos de la Unidad RWG (tabla 11) también<sup>74</sup> son de clima cálido seco y de planicie aluvial desarrollados a partir de aluviones. Estos suelos se ubican en planos de inundación y en zonas de relieve plano; son superficiales a muy superficiales, de texturas medias a gruesas, con drenaje pobre a imperfecto, fuertemente ácidos a moderadamente alcalinos. Así mismo, presentan saturación de bases alta y fertilidad natural moderada a muy baja.

*Tabla 11. Conformación de la Unidad de suelos RWG*

<i>Suelos</i>	<i>Predominancia</i>
Aeric Fluvaquents	30%
Fluventic Haplusteps	30%
Typic Psammaquents	20%
Typic Ustipsamments	20%

De acuerdo con el IGAC (2009) los diferentes tipos de suelos identificados en cada unidad pueden formar ciertas asociaciones, las cuales se presentan a continuación:

Asociación Fluventic Haplusteps – Typic Ustipsamments: está localizada al oriente de la CGSM, bajo la jurisdicción del corregimiento de Río Frío con una extensión de 215,7 hectáreas las cuales representan el 0,01% del área total del departamento del Magdalena. A nivel geomorfológico esta unidad se caracteriza por presentar un paisaje de piedemonte, relieve abanico de explayamiento que va de plano a ligeramente plano con pendientes entre el 1 y 3%; además, presentan afectaciones por sales y sodio. Es importante anotar que estos suelos se han originado a partir de depósitos aluviales moderadamente

gruesos y moderadamente finos; son profundos, de texturas finas a medias, bien<sup>75</sup> drenados, de fertilidad natural alta a moderada.

Asociación Typic Haplustepts – Fluventic Haplustepts – Typic Ustorthents: esta unidad se encuentra en jurisdicción de los municipios de Aracataca, Algarrobo, Zona Bananera, Santa Marta, Fundación y Ciénaga. Tiene una superficie de 26.025,9 hectáreas las cuales representan el 1,12% del área total del Magdalena. Geomorfológicamente, también presenta paisaje de piedemonte, pero el tipo de relieve es de tipo abanico terraza; el cual se caracteriza por ser ligeramente plano con pendientes menores al 3%. Estos suelos presentan erosión laminar ligera a fuerte y se desarrollan a partir de depósitos aluviales mixtos con abundantes fragmentos rocosos. Son profundos y muy superficiales, tienen buen drenaje, texturas moderadamente gruesas con gravilla; en el horizonte superficial la reacción es fuertemente ácida y en profundidad es neutra a moderadamente alcalina; la fertilidad natural es moderada a baja.

Asociación Typic Ustifluvents – Typic Ustorthents: Localizada en los municipios de Aracataca, Fundación, Ciénaga, Algarrobo y Zona Bananera; con una extensión de 3.403,3 hectáreas que representan el 0,15% del área total del departamento. La geomorfología de la unidad corresponde al paisaje de piedemonte, tipo de relieve vallecitos; el cual se caracteriza por ser plano a ligeramente plano con pendientes que no superan el 3%, además estos suelos presentan erosión laminar ligera y algunos sectores son susceptibles a las inundaciones. Los suelos de esta asociación han evolucionado a partir de depósitos aluviales moderadamente gruesos y moderadamente finos, con pedregosidad en sectores muy localizados; son profundos, moderadamente profundos y superficiales, bien

drenados, texturas moderadamente gruesas, gruesas y medias, de fertilidad natural alta<sup>76</sup> a moderada. Su geomorfología se sitúa en el paisaje de planicie aluvial con relieve de tipo terraza, el cual es ligeramente plano con pendientes entre el 1 y 3%. A partir de los 30 centímetros de profundidad algunos sectores se ven afectados por las concentraciones de sodio, en otros casos también se presentan inundaciones ocasionales de corta duración.

Asociación Typic Haplustepts – Aeric Fluvaquents – Typic Haplustolls: Esta asociación comprende suelos localizados a alturas inferiores a 200 msnm específicamente en los municipios de Pueblo Viejo, Zona Bananera, El Retén y Aracataca. Tiene una superficie de 18.478,3 hectáreas la cual representa el 0,80% del área total del Magdalena. A nivel geomorfológico esta unidad ocupa el plano de inundación del río Magdalena y otros ríos de importancia provenientes de la Sierra Nevada; el relieve es plano y se caracteriza por presentar pendientes inferiores al 3% de forma rectilínea. Estos suelos se han derivado de aluviones recientes moderadamente gruesos y finos; tienen drenaje de bueno a pobre; profundos y superficiales; con texturas finas a medias; la fertilidad natural es variable (muy baja a muy alta); en algunos sectores se observan parches afectados por sales y/o sodio. Es válido anotar que durante la época lluviosa o de crecidas de los ríos se presentan inundaciones y/o encharcamientos generalmente de corta duración.

Asociación Typic Haplustepts – Aquic Ustifluvents – Fluventic Haplustepts: Esta unidad cartográfica se localiza en los municipios de El Retén, Pueblo Viejo, Zona Bananera y Ciénaga con una extensión de 13.699,7 hectáreas que representan el 0,59% del área total del departamento del Magdalena. Por su geomorfología se encuentra localizada en los planos de marea de la planicie marina y fluvio-marina, se caracteriza por presentar un

relieve plano con pendientes menores al 1%; también presenta erosión laminar ligera.<sup>77</sup> Los suelos de esta asociación se derivan de depósitos fluviomarinos medios; son profundos a muy superficiales, limitados por sales y sodio, de texturas finas a medias, bien a imperfectamente drenados y de fertilidad moderada a muy alta.

Asociación Aeric Fluvaquents – Aquic Haplustepts – Aeric Endoaquepts: Esta asociación se encuentra ubicada bordeando la CGSM, bajo la jurisdicción de los municipios de Sitionuevo, El retén, Zona Bananera, Ciénaga, Pivijay, Remolino y Pueblo Viejo. Su extensión corresponde a 53.755,7 hectáreas las cuales representan el 2,32% del área total del departamento. La unidad tiene paisaje de planicie marina y fluviomarina, relieve plano de marea, con pendientes inferiores al 1%. Estos suelos se derivan de depósitos fluviomarinos medios; y tienen tendencia a ser muy superficiales a moderadamente profundos, con limitaciones por sales, sodio y fluctuaciones del nivel freático; de texturas finas a medias; pobre a imperfectamente drenados y de fertilidad natural alta.

#### 2.4. Estándares de referencia

La investigación se enmarca en los siguientes estándares de referencia para comparación con los resultados obtenidos a partir de la caracterización analítica de los parámetros químicos en suelo y agua del municipio Zona Bananera.

IGAC (2014). Instructivo I40100-06/14.V1. Código para los levantamientos de suelo del Grupo Interno de trabajo de levantamientos agrológicos, el cual incluye consideraciones generales para interpretación de resultados de análisis de laboratorio de suelos en Colombia.

Rangos de referencias nutricionales reportados para suelos de Colombia como<sup>78</sup> herramienta proporcionada por el Laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, junto con los resultados de caracterización analítica.

## Capítulo 3

### Resultados: análisis y discusión

#### 3.1. Fase 1: Caracterización de la zona de estudio

##### 3.1.1. Identificación de particularidades del municipio Zona Bananera

El proceso de observación llevado a cabo durante las salidas de campo para la toma de muestras de suelo y agua en la Zona Bananera, permitió identificar las principales características del municipio. En este se encontró predominancia de actividades agrícolas (73% del territorio) con áreas destinadas al monocultivo, principalmente sembradas con *Musa* sp. (en fincas dedicadas a la producción y comercialización del producto) y *Elaeis guineensis* en su mayoría plantados en propiedades que pertenecen a terratenientes y élites locales del departamento del Magdalena (MinAgricultura, 2013; Cabeza, 2014); además en algunas áreas se observó la presencia de árboles frutales como limón o mango, vegetación nativa de la zona caracterizada como bosque seco tropical/muy seco tropical y vegetación de rastrojo en zonas de ladera (ver figuras 7-11).



*Figura 10. Plantaciones de Musa sp. en fincas del municipio de Zona Bananera*



*Figura 11. Cultivo de Elaeis guineensis en el municipio Zona Bananera*



*Figura 12. Vegetación nativa Bs-T y Bms-T cerca Santa Rosalía*



*Figura 13. Árboles frutales (limón y mango) cerca Santa Rosalía*



*Figura 14. Vegetación de rastrojo en zonas de ladera*

Las estaciones de muestreo para aguas superficiales fueron tomadas a lo largo del recorrido de cada río y quebrada dentro de los límites del municipio; preferiblemente en los tramos alto, medio y bajo. No obstante, los puntos A3, A4, A5 y L3 fueron tomados fuera de la Zona Bananera debido al taponamiento de los ríos y caños (los cuales desembocan en la CGSM), por la planta invasora ‘Jacinto de agua’ y maleza acuática que impidió completar el recorrido definido o seleccionar una nueva ruta para el muestreo en campo tal como se observa en las figuras 12 y 13.



*Figura 15. Taponamiento de ríos por planta invasora ‘Jacinto de agua’*



*Figura 16. Taponamiento de caños por maleza acuática*

Adicionalmente en este sector se observó una alta influencia de la ganadería, presencia de aves y manglares, predominancia del cultivo de palma de aceite y actividades de dragado de ríos y caños. Las figuras 14-17 son evidencia de estos factores.



*Figura 17. Influencia de la ganadería en la zona de estudio y cultivos de palma de aceite*



*Figura 18. Presencia de aves fuera del municipio de Zona Bananera*



*Figura 19. Presencia de manglares en río Sevilla cerca CGSM*



*Figura 20. Actividades de dragado de ríos y caños*

El municipio de Zona Bananera se encuentra ubicado en la vertiente II del departamento del Magdalena. En esta vertiente se encuentran ubicados tres distritos de riego que permiten la gran actividad agrícola y pecuaria del municipio, los cuales reciben el nombre del río del que se abastecen, y son los siguientes (PBOT, 2001):

Distrito de Riego Tucurinca: Tiene un área de riego de 10.965,41 ha; va desde la margen derecha del río Tucurinca hasta la margen izquierda del río Sevilla; incluyendo los corregimientos de Tucurinca, Guamachito, Soplador y Guacamayal.

Distrito de Riego Sevilla: Consta de un área de 13.863,79 ha; se extiende de la margen derecha del río Sevilla hasta la vía que va desde La Gran Vía a Orihueca; y de aquí hasta el punto donde se une la quebrada Orihueca con el río Sevilla. Comprende los corregimientos Sevilla, Palomar, Santa Rosalía, Orihueca y la Gran Vía.

Distrito de Riego Riofrío: Su área es de 5.230,74 ha. Va desde los límites del Distrito Sevilla hasta la margen izquierda de la quebrada La Aguja; incluye los corregimientos de Varela y Riofrío.

Estos distritos de riego presentan problemas de sedimentación, debido a la erosión que se da en la cabecera de cada una de las cuencas por efecto de la deforestación de sus riberas, las labores agropecuarias y siembra de cultivos ilícitos. Sin embargo, con ellos se riegan áreas sembradas de banano, palma de aceite, frutales, arroz, hortalizas, maíz y yuca.

### 3.1.2. Recolección y preparación de muestras de suelo y agua

Por un lado, la recolección de las muestras de suelo se llevó a cabo teniendo en cuenta la guía de muestreo del IGAC (s. f.) descrita en la sección correspondiente al diseño metodológico y las evidencias se presentan a continuación en las figuras 18-20.



Figura 21. Recolección de muestras de suelo cultivado con *Elaeis guineensis*



Figura 22. Recolección de muestras de suelo cultivado con *Musa sp.*



*Figura 23. Recolección de muestras de suelo en zonas de ladera*

Antes del envío de las muestras de suelo al Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, estas fueron preparadas en el laboratorio de física de suelos de la Universidad del Magdalena siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1) Secado de las muestras (figura 21) sobre papel Kraft a temperatura ambiente por aproximadamente 72 horas (este tiempo varió dependiendo del porcentaje de humedad en la muestra).



*Figura 24. Secado de muestras de suelo*

2) Trituración con mortero de porcelana y tamizado de las muestras usando tamices de diámetro de malla igual a 2 mm (figura 22).



*Figura 25. Tamizado de muestras de suelo*

3) Pesaje de 600 g de cada muestra de suelo mediante balanza electrónica de precisión (figura 23).



Figura 26. Pesaje de muestras de suelo

4) Rotulado y empaclado de las muestras (figura 24) teniendo en cuenta la información suministrada por las planillas de registro en campo, para su posterior envío al CIAT.



Figura 27. Rotulado y empaclado de muestras de suelo

Por otra parte, las muestras recolectadas en las principales fuentes de agua superficial del municipio fueron rotuladas usando numeración consecutiva e identificadas con su respectivo nombre y ubicación en la planilla de registro en campo. Así mismo, fueron enviadas al laboratorio durante las 24 horas siguientes a la recolección. En las figuras 25 y 26 se muestran las respectivas evidencias.



*Figura 28. Envases utilizados para toma de muestras de agua*



*Figura 29. Recolección de muestras de agua en ríos y quebradas del municipio Zona Bananera*

Es importante anotar que para ambos recursos las muestras fueron recolectadas durante el periodo de lluvias, el cual es mencionado en el marco contextual de la investigación.

### 3.1.3. Análisis químico de las muestras de suelo y agua

En las tablas 12-15 se presentan los resultados de la caracterización analítica de los parámetros químicos realizada mediante solicitud al laboratorio de servicios analíticos del CIAT, para los recursos suelo y agua del municipio de Zona Bananera. Los valores presentados corresponden a datos en bruto y sus respectivas unidades de medición se presentan en la tabla 12 para aguas superficiales y para suelo en las tablas 13-15.

Tabla 12. Caracterización analítica de parámetros químicos en aguas superficiales de la Zona<sup>92</sup>  
Bananera durante la época lluviosa

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	<i>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></i>
A1	Quebrada La Aguja (puente)	8,55	0,2	0,235	0,306	0,099
A2	Río Frío inicial (balneario)	7,27	0,06	1,11	0,403	0,388
A3	Desembocadura CGSM	7,63	0,19	0,078	0,076	0,201
A4	Unión río Sevilla-río Frío	7,73	0,14	0,039	0,094	0,194
A5	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	7,51	0,09	1,31	0,162	0,586
A6	Río Frío final (La Candelaria)	7,22	0,06	0,917	0,351	0,676
A7	Quebrada Orihueca final (finca Cecilia Limón)	7,39	0,11	3,51	0,378	2,75
A8	Quebrada Orihueca inicial (puente)	7,4	0,12	2,64	0,332	2,01
A9	Río Sevilla (medio)	7,07	0,05	0,561	0,322	1,63
A10	Río Sevilla inicial (puente)	7,02	0,05	0,4	NA	NA
A11	Río Tucurinca final	7,12	0,05	0,504	0,314	0,388
A12	Río Tucurinca inicial (puente)	7,17	0,04	0,556	0,299	0,319

**Unidades de medición:** pH (unidades); CE (mS/cm); NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/l). **Anotación:** En cada punto de muestreo se recolectó una única muestra de agua.

Tabla 13. Caracterización analítica de parámetros químicos en suelo de la Zona Bananera en 118 la profundidad de 0-10 cm durante la época lluviosa

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>C oxid</i>	<i>MO</i>	<i>N- total</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>
S2	El Reposo	6,40	11,60	26,30	2,28	5,43	35,80
S3	Vereda La Mira (punto 1)	7,92	14,15	32,13	0,90	5,28	31,55
S4	Vereda La Mira (punto 2)	7,75	20,00	45,40	1,07	5,80	59,22
S5	Límite Zona Bananera	6,55	12,10	27,50	0,94	6,40	17,80
S6	San Pablo	6,55	11,80	26,80	0,73	7,86	14,00
S7	La Unión	7,73	26,57	60,33	1,29	4,61	28,49
S8	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	6,59	24,61	56,31	0,65	8,67	61,71
S9	La Candelaria	6,23	18,61	42,25	0,81	6,53	15,81
S10	Finca María Luisa	8,19	11,90	27,00	0,91	7,31	64,50
S11	Entrada a fincas (cerca Orihueca)	7,74	11,90	27,10	1,00	6,30	42,20
S12	Finca Plantación	7,28	11,70	26,60	1,03	7,69	74,70
S13	La Gran Vía (punto 1)	6,77	12,30	28,04	0,50	4,79	21,90
S14	La Gran Vía (punto 2)	7,62	12,30	27,90	1,01	5,67	105,00
S15	La Gran Vía (punto 3)	6,55	12,40	28,10	0,78	5,56	29,10
S16	Cerca Santa Rosalía (punto 1)	6,73	8,41	19,25	0,13	5,77	23,33
S17	Cerca Santa Rosalía (punto 2)	6,46	7,94	18,15	0,05	7,93	8,31
S18	Finca Vijagual	8,04	11,80	26,80	1,51	6,58	38,40
S19	Finca Porvenir	6,50	12,70	28,70	1,69	6,43	27,60
S20	Soplador	4,11	23,27	52,84	1,28	43,71	37,53
S21	Tucurinca	5,71	35,21	79,93	1,90	8,00	15,60

**Unidades de medición:** pH (unidades); C oxidable, MO, N-total (g/kg); NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/kg).

**Anotación:** En cada punto de muestreo se recolectó una única muestra de suelo a la profundidad de 0-10 cm.

Tabla 14. Caracterización analítica de parámetros químicos en suelo de la Zona Bananera en 1999  
la profundidad de 10-20 cm durante la época lluviosa

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>C oxid</i>	<i>MO</i>	<i>N- total</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>
S2	El Reposo	6,33	6,18	14,04	2,19	2,92	28,80
S3	Vereda La Mira (punto 1)	7,74	8,18	18,57	0,43	4,76	15,65
S4	Vereda La Mira (punto 2)	7,79	15,32	34,78	1,07	6,10	30,66
S5	Límite Zona Bananera	6,09	12,20	27,80	0,37	5,24	9,00
S6	San Pablo	6,56	12,30	28,00	0,35	6,52	23,70
S7	La Unión	7,90	10,26	23,30	0,25	4,21	7,74
S8	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	6,10	17,34	39,67	0,46	20,54	20,95
S9	La Candelaria	6,41	3,34	7,59	0,03	4,62	3,43
S10	Finca María Luisa	7,86	11,80	26,90	0,37	6,70	14,60
S11	Entrada a fincas (cerca Orihueca)	7,77	11,70	26,70	0,80	5,93	39,70
S12	Finca Plantación	7,28	12,10	27,50	0,81	5,74	64,50
S13	La Gran Vía (punto 1)	5,52	12,40	28,10	0,52	5,35	34,60
S14	La Gran Vía (punto 2)	6,63	12,10	27,50	0,72	4,46	67,07
S15	La Gran Vía (punto 3)	6,16	11,90	27,08	0,69	5,85	20,40
S16	Cerca Santa Rosalía (punto 1)	6,48	5,38	12,31	0,67	5,55	15,72
S17	Cerca Santa Rosalía (punto 2)	6,51	10,57	24,18	0,19	6,97	13,51
S18	Finca Vijagual	7,36	12,30	28,03	0,95	3,97	5,66
S19	Finca Porvenir	5,47	11,50	26,20	1,57	5,73	21,70
S20	Soplador	5,85	9,63	21,86	0,55	6,88	17,94
S21	Tucurinca	5,37	17,56	39,88	0,76	6,73	6,43

**Unidades de medición:** pH (unidades); C oxidable, MO, N-total (g/kg); NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/kg).

**Anotación:** En cada punto de muestreo se recolectó una única muestra de suelo a la profundidad de 10-20 cm.

Tabla 15. Caracterización analítica de parámetros químicos en suelo de la Zona Bananera en 120 las zonas de ladera durante la época lluviosa

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>C oxid</i>	<i>MO</i>	<i>N- total</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>
L1	Finca Julio Zawady	6,69	13,30	30,20	0,97	10,60	64,09
L2	Vía San Pedro de la Sierra	7,63	12,00	27,10	0,99	6,60	72,20
L3	Desembocadura CGSM	4,93	107,26	245,37	4,42	20,79	5,56
L4	Guamachito	8,01	9,45	21,45	0,26	5,42	46,94

**Unidades de medición:** pH (unidades); C oxidable, MO, N-total (g/kg); NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/kg).

**Anotación:** En cada punto de muestreo se recolectó una única muestra de suelo compuesta a partir de 3 submuestras.

### 3.2. Fase 2: Determinación de los contenidos y niveles de C, N en suelo y agua

Los valores de referencia para suelo propuestos por el IGAC (2014) para interpretación de los resultados se presentan a continuación y están diferenciados mediante leyendas de colores para cada parámetro químico (ver tablas 16-18).

Tabla 16. Rangos de pH definidos para suelo

<i>Rango (unidades)</i>	<i>Distinción</i>	<i>Definición</i>
< 4,5		Extremadamente ácido
4,6 – 5,0		Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5		Fuertemente ácido
5,6 – 6,0		Medianamente ácido
6,1 – 6,5		Ligeramente ácido
6,6 – 7,3		Neutro
7,4 – 7,8		Ligeramente alcalino
7,9 – 8,4		Medianamente alcalino
8,5 – 9,0		Fuertemente alcalino
> 9,0		Extremadamente alcalino

Tabla 17. Rangos de materia orgánica (MO) definidos para suelo

<i>Rango (%)</i>	<i>Distinción</i>	<i>Definición</i>
< 2		Bajo
2 – 4		Medio
> 4		Alto

Tabla 18. Rangos de nitrógeno total (N-total) definidos para suelo

<i>Rango (%)</i>	<i>Distinción</i>	<i>Definición</i>
< 0,1		Bajo
0,1 – 0,2		Medio
> 0,2		Alto

Para el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) se establece un nivel crítico de 20 ppm y 25 ppm; respectivamente. Los valores por encima de estos niveles son incluidos en color rojo y valores menores en color verde.

Es importante anotar que, para realizar la comparación con los estándares de referencia, se seleccionaron únicamente las variables relacionadas con las formas de carbono y nitrógeno; en especial la MO y N-total fueron convertidas de g/kg a porcentaje (%) para facilitar el análisis. En las tablas 19-21 se presentan los valores para suelo implementando las leyendas de colores presentadas previamente.

Tabla 19. Niveles de formas de C y N obtenidos a partir de los estándares de referencia en 123 suelo del IGAC (2014) para la profundidad 1 de 0-10 cm

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>MO (%)</i>	<i>N- total (%)</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ppm)</i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ppm)</i>
S2	El Reposo	6,4	2,63	0,23	5,43	35,80
S3	Vereda La Mira (punto 1)	7,9	3,21	0,09	5,28	31,55
S4	Vereda La Mira (punto 2)	7,8	4,54	0,11	5,80	59,22
S5	Límite Zona Bananera	6,6	2,75	0,09	6,40	17,80
S6	San Pablo	6,6	2,68	0,07	7,86	14,00
S7	La Unión	7,7	6,03	0,13	4,61	28,49
S8	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	6,6	5,63	0,06	8,67	61,71
S9	La Candelaria	6,2	4,23	0,08	6,53	15,81
S10	Finca María Luisa	8,2	2,70	0,09	7,31	64,50
S11	Entrada a fincas (cerca Orihueca)	7,7	2,71	0,10	6,30	42,20
S12	Finca Plantación	7,3	2,66	0,10	7,69	74,70
S13	La Gran Vía (punto 1)	6,8	2,80	0,05	4,79	21,90
S14	La Gran Vía (punto 2)	7,6	2,79	0,10	5,67	105,00
S15	La Gran Vía (punto 3)	6,6	2,81	0,08	5,56	29,10
S16	Cerca Santa Rosalía (punto 1)	6,7	1,93	0,01	5,77	23,33
S17	Cerca Santa Rosalía (punto 2)	6,5	1,82	0,01	7,93	8,31
S18	Finca Vijagual	8,0	2,68	0,15	6,58	38,40
S19	Finca Porvenir	6,5	2,87	0,17	6,43	27,60
S20	Soplador	4,1	5,28	0,13	43,71	37,53
S21	Tucurínca	5,7	7,99	0,19	8,00	15,60

Tabla 20. Niveles de formas de C y N obtenidos a partir de los estándares de referencia en 124 suelo del IGAC (2014) para la profundidad 2 de 10-20 cm

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>MO (%)</i>	<i>N- total (%)</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ppm)</i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ppm)</i>
S2	El Reposo	6,3	1,40	0,219	2,92	28,80
S3	Vereda La Mira (punto 1)	7,7	1,86	0,043	4,76	15,65
S4	Vereda La Mira (punto 2)	7,8	3,48	0,107	6,10	30,66
S5	Límite Zona Bananera	6,1	2,78	0,037	5,24	9,00
S6	San Pablo	6,6	2,80	0,035	6,52	23,70
S7	La Unión	7,9	2,33	0,025	4,21	7,74
S8	Cerca río Frío (fuera de Zona Bananera)	6,1	3,97	0,046	20,54	20,95
S9	La Candelaria	6,4	0,76	0,003	4,62	3,43
S10	Finca María Luisa	7,9	2,69	0,037	6,70	14,60
S11	Entrada a fincas (cerca Orihueca)	7,8	2,67	0,080	5,93	39,70
S12	Finca Plantación	7,3	2,75	0,081	5,74	64,50
S13	La Gran Vía (punto 1)	5,5	2,81	0,052	5,35	34,60
S14	La Gran Vía (punto 2)	6,6	2,75	0,072	4,46	67,07
S15	La Gran Vía (punto 3)	6,2	2,71	0,069	5,85	20,40
S16	Cerca Santa Rosalía (punto 1)	6,5	1,23	0,067	5,55	15,72
S17	Cerca Santa Rosalía (punto 2)	6,5	2,42	0,019	6,97	13,51
S18	Finca Vijagual	7,4	2,80	0,095	3,97	5,66
S19	Finca Porvenir	5,5	2,62	0,157	5,73	21,70
S20	Soplador	5,9	2,19	0,055	6,88	17,94
S21	Tucurinca	5,4	3,99	0,076	6,73	6,43

Tabla 21. Niveles de formas de C y N obtenidos a partir de los estándares de referencia en 125 suelo del IGAC (2014) para las zonas de ladera

<i>Punto</i>	<i>Nombre</i>	<i>pH</i>	<i>MO (%)</i>	<i>N- total (%)</i>	<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ppm)</i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ppm)</i>
L1	Finca Julio Zawady	6,69	3,02	0,10	10,60	64,09
L2	Vía San Pedro de la Sierra	7,63	2,71	0,10	6,60	72,20
L3	Desembocadura CGSM	4,93	24,54	0,44	20,79	5,56
L4	Guamachito	8,01	2,15	0,03	5,42	46,94

El pH en la zona de estudio presentó un comportamiento que varió de extremadamente ácido a medianamente alcalino en la profundidad de 0-10 cm y de fuertemente ácido a medianamente alcalino en la profundidad de 10-20 cm. Para las áreas con vegetación de rastrojo (zonas de ladera), este parámetro tomó valores entre la neutralidad y medianamente alcalino, con excepción de la muestra tomada en la desembocadura de la CGSM donde el pH fue extremadamente ácido.

Se observó una tendencia en todas las profundidades a presentar contenidos medios de materia orgánica, con algunos valores bajos ubicados en los puntos de muestreo cerca Santa Rosalía en la profundidad 1 y otros distribuidos heterogéneamente en el municipio para la profundidad 2. Es válido aclarar que para la profundidad de 10-20 cm únicamente se encontraron contenidos de MO que van de medios a bajos. Además, se hallaron concentraciones altas en sitios de muestreo ubicados al occidente y sur de la Zona Bananera, resaltando el correspondiente a la CGSM.

En cuanto al nitrógeno total, para la profundidad 1 los contenidos variaron de bajos a medios distribuidos heterogéneamente en el área de estudio; por el contrario, para la profundidad 2 las concentraciones de este elemento fueron bajas. En las áreas de rastrojo

se ubicaron contenidos medios al noreste, y bajos al sureste del municipio<sup>126</sup> (específicamente en Guamachito). En estas se destaca el punto de muestreo tomado en la desembocadura de la ciénaga; y también para las profundidades 1 y 2 la muestra correspondiente a El Reposo, en las cuales se presentaron contenidos altos de esta forma de nitrógeno.

Lo anterior coincide con un estudio realizado por Vásquez et al. (2013) el cual reveló que en la Zona Bananera se presentaron contenidos medios de N-total y MO, de acuerdo con lo descrito por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 1992) para las condiciones del clima cálido en la costa caribe colombiana. Así mismo, las relaciones C/N para los suelos de cultivo oscilaron entre 10 y 11, valores consecuentes con la alta tasa de mineralización reportada para las condiciones climáticas de la región (IGAC, 2009).

Para el amonio, en todos los casos se presentaron contenidos adecuados por debajo del nivel crítico de 20 ppm; exceptuando el punto de muestreo ubicado en Soplador para la profundidad 1, cerca río Frío fuera de la Zona Bananera para la profundidad 2 y en la desembocadura de la CGSM para las áreas de rastrojo.

Finalmente, en el suelo se presentaron en su mayoría contenidos altos de nitrato, especialmente en las fincas dedicadas al cultivo del banano y algunas zonas cultivadas con palma y árboles frutales tales como Soplador (en la profundidad 1) y vereda La Mira (en ambas profundidades); respectivamente. Adicional a esto, en las zonas de ladera con vegetación de rastrojo las concentraciones de esta forma de nitrógeno también fueron altas con excepción del punto de muestreo localizado en la CGSM el cual presentó un valor medio de dicho nutriente. Los contenidos elevados de nitrato en el suelo se ven reflejados

en procesos de eutrofización que ocasiona graves afectaciones sobre el recurso, tal<sup>127</sup> como se muestra en la figura 27.



*Figura 30. Encharcamiento y condiciones de eutrofización del suelo en fincas cultivadas con Musa sp.*

### 3.3. Fase 3: Detección de las afectaciones en el ambiente

#### 3.3.1. Análisis estadístico de los datos de suelo y agua

En esta sección se incluye el análisis descriptivo y gráfico de los datos; el primero incluye un resumen numérico de las variables, y el segundo incorpora diagramas de caja y gráficas de densidad de los parámetros químicos objeto de estudio para cada una de las profundidades definidas en el muestreo. Además, se presenta la aplicación de la prueba U de Mann Whitney para muestras independientes.

Las figuras 28-30 presentan los resultados obtenidos del resumen numérico (estadística descriptiva) para las variables analizadas en suelo del municipio Zona

Bananera en todas las profundidades de muestreo. En estas se observan los valores<sup>128</sup> mínimos y máximos, los cuartiles 1 y 3, así como también la media y la mediana de cada parámetro químico obtenidos mediante el programa estadístico R. La información suministrada permitió realizar los respectivos diagramas de caja para una mejor interpretación de los resultados, además se evidencia claramente que en todos los casos la mediana y la media no coinciden. Teniendo en cuenta que los suelos encontrados en el municipio son de origen fluvial, se presenta una alta variabilidad lo cual permite inferir que los datos del estudio no tienen comportamiento normal ni homocedástico. Los diagramas de caja y gráficas de dispersión para cada variable se muestran en la figura 31-35.

	pH_S	C_oxid_S	MO_S
Min.	:4.930	Min. : 9.45	Min. : 21.45
1st Qu.	:6.250	1st Qu.: 11.36	1st Qu.: 25.69
Median	:7.160	Median : 12.65	Median : 28.65
Mean	:6.815	Mean : 35.50	Mean : 81.03
3rd Qu.	:7.725	3rd Qu.: 36.79	3rd Qu.: 83.99
Max.	:8.010	Max. :107.26	Max. :245.37
	NH4_S	NO3_S	N_total_S
Min.	: 5.420	Min. : 5.56	Min. :0.2600
1st Qu.	: 6.305	1st Qu.:36.59	1st Qu.:0.7925
Median	: 8.600	Median :55.52	Median :0.9800
Mean	:10.852	Mean :47.20	Mean :1.6600
3rd Qu.	:13.148	3rd Qu.:66.12	3rd Qu.:1.8475
Max.	:20.790	Max. :72.20	Max. :4.4200

*Figura 31. Resumen numérico de los datos obtenidos para las zonas de ladera*

pH_S		C_oxid_S		MO_S	
Min.	:4.110	Min.	: 7.94	Min.	:18.15
1st Qu.	:6.490	1st Qu.	:11.80	1st Qu.	:26.80
Median	:6.660	Median	:12.30	Median	:27.97
Mean	:6.871	Mean	:15.56	Mean	:35.37
3rd Qu.	:7.732	3rd Qu.	:18.96	3rd Qu.	:43.04
Max.	:8.190	Max.	:35.21	Max.	:79.93

NH4_S		NO3_S		N_total_S	
Min.	: 4.610	Min.	: 8.31	Min.	:0.0500
1st Qu.	: 5.643	1st Qu.	: 20.88	1st Qu.	:0.7675
Median	: 6.415	Median	: 30.32	Median	:0.9700
Mean	: 8.316	Mean	: 37.63	Mean	:1.0230
3rd Qu.	: 7.732	3rd Qu.	: 46.45	3rd Qu.	:1.2825
Max.	:43.710	Max.	:105.00	Max.	:2.2800

Figura 32. Resumen numérico de los datos obtenidos para la profundidad de 0-10 cm

pH_S		C_oxid_S		MO_S	
Min.	:5.370	Min.	: 3.34	Min.	: 7.59
1st Qu.	:6.098	1st Qu.	:10.10	1st Qu.	:22.94
Median	:6.495	Median	:11.85	Median	:26.99
Mean	:6.659	Mean	:11.20	Mean	:25.50
3rd Qu.	:7.455	3rd Qu.	:12.30	3rd Qu.	:28.01
Max.	:7.900	Max.	:17.56	Max.	:39.88

NH4_S		NO3_S		N_total_S	
Min.	: 2.920	Min.	: 3.43	Min.	:0.0300
1st Qu.	: 4.725	1st Qu.	:12.38	1st Qu.	:0.3700
Median	: 5.735	Median	:19.17	Median	:0.6100
Mean	: 6.239	Mean	:23.09	Mean	:0.6875
3rd Qu.	: 6.565	3rd Qu.	:29.27	3rd Qu.	:0.8025
Max.	:20.540	Max.	:67.07	Max.	:2.1900

Figura 33. Resumen numérico de los datos obtenidos para la profundidad de 10-20 cm

Los gráficos de densidad permitieron visualizar la distribución de los datos en intervalos continuos para cada variable.

Las figuras 31 y 32 presentan los diagramas de caja y bigotes correspondientes a las variables carbono oxidable y materia orgánica para ambas profundidades de muestreo. En ellas se observa el mismo comportamiento para ambos parámetros, lo cual explica una fuerte relación entre ellos con tendencia a la linealidad. Es claro que los contenidos medios de los grupos son estadísticamente diferentes y que para la profundidad 1 las concentraciones de C oxidable y MO presentaron mayor dispersión (variabilidad) que las

encontradas en la profundidad 2. Las gráficas de dispersión muestran que los datos para <sup>130</sup> la primera variable se concentran entre 10 y 15 g/kg, y para el segundo parámetro entre 20 y 30 g/kg.

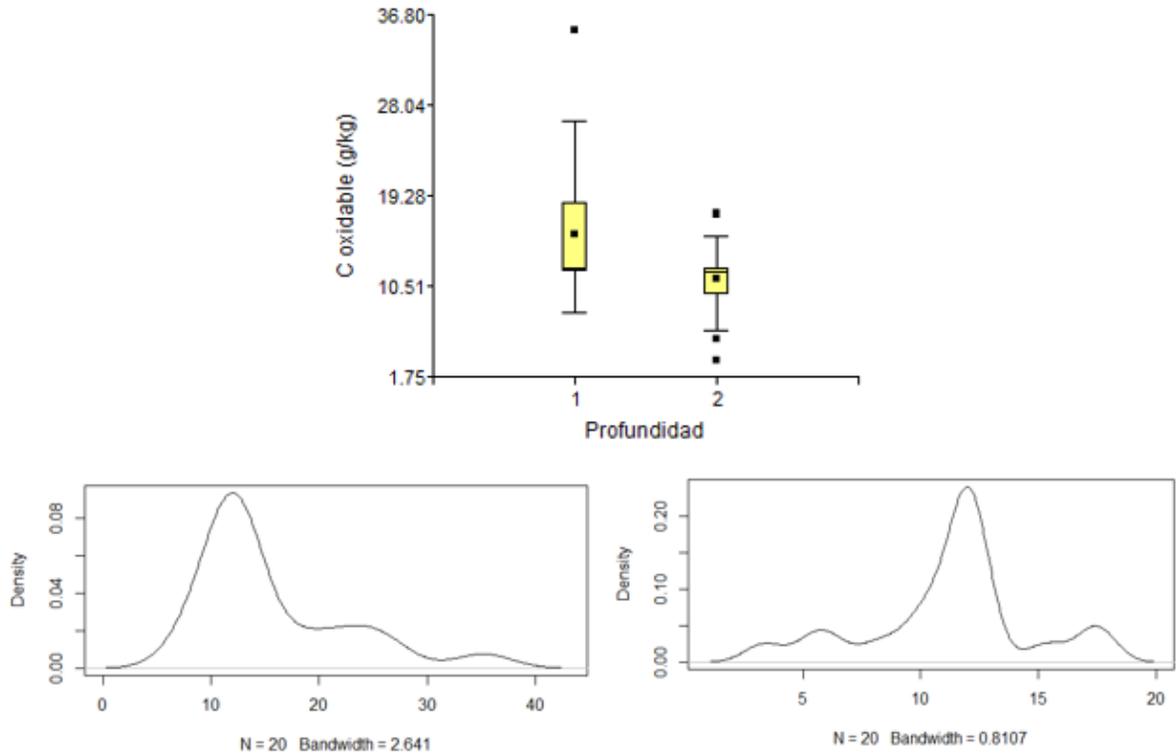


Figura 34. Comportamiento del carbono oxidable en ambas profundidades de muestreo

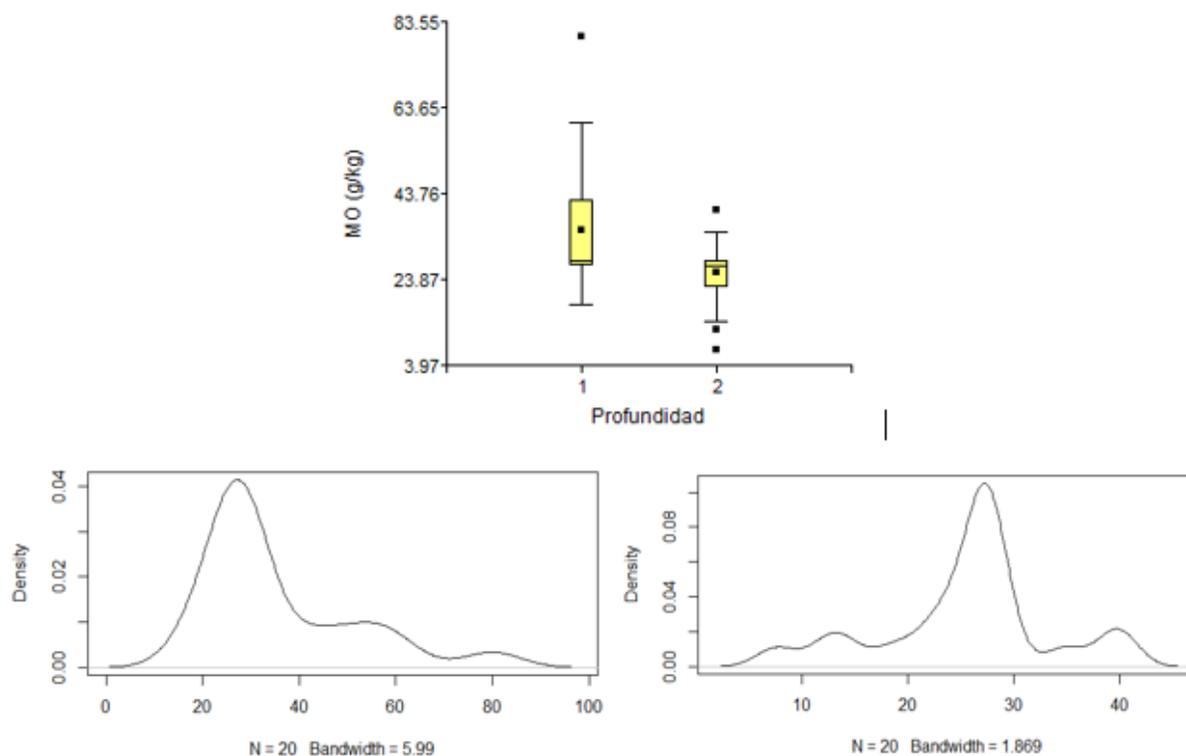


Figura 35. Comportamiento de la materia orgánica en ambas profundidades de muestreo

En las figuras 33 y 34 se observa el comportamiento de las variables nitrógeno total y amonio en cada profundidad muestreada. Para la figura 33, el diagrama de caja y bigotes muestra diferencias entre los contenidos medios de los grupos para esta variable y también entre las dispersiones de cada uno de ellos. Por otra parte, en la figura 34 se presentó poca variación de los datos correspondientes al amonio e igualdad entre los contenidos medios de este nutriente para las profundidades 1 y 2. Para el caso del nitrógeno total, la mayoría de los datos se concentraron entre 0,5 y 1,5 g/kg en los primeros 10 centímetros de suelo, y de 0 a 1,0 g/kg en la profundidad de 10-20 cm. Por otro lado, el amonio presentó contenidos menores a 10 mg/kg en ambos casos y mayores a 20 y 40 mg/kg en las profundidades 2 y 1; respectivamente.

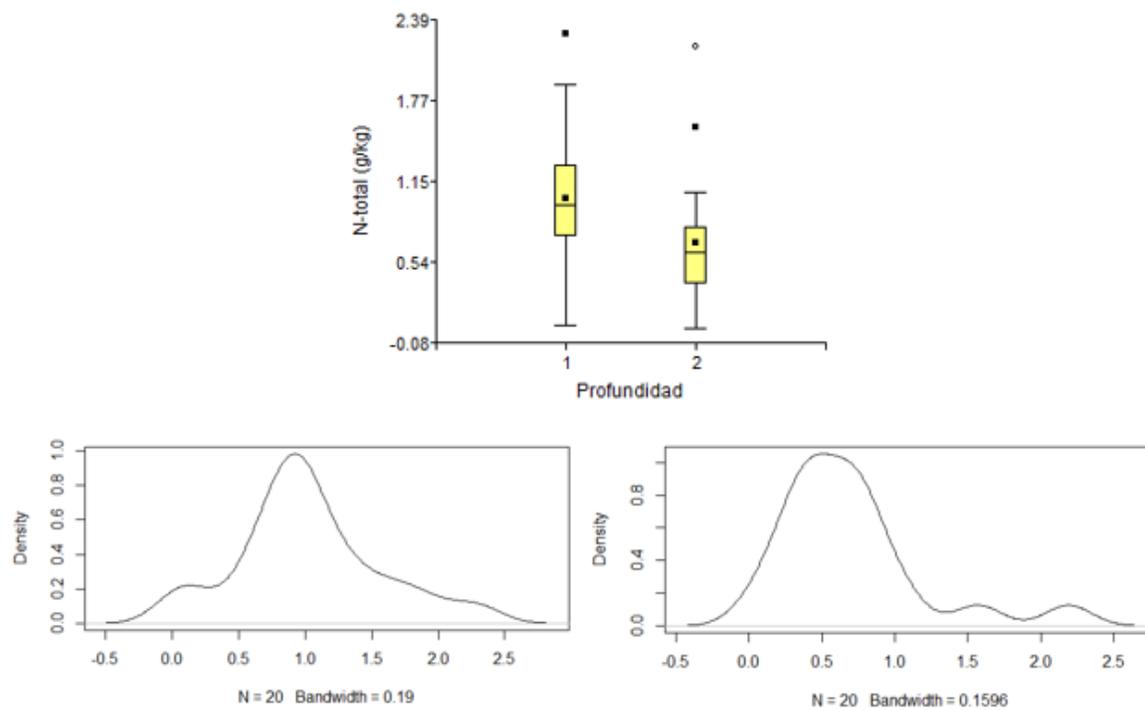


Figura 36. Comportamiento del nitrógeno total en ambas profundidades de muestreo

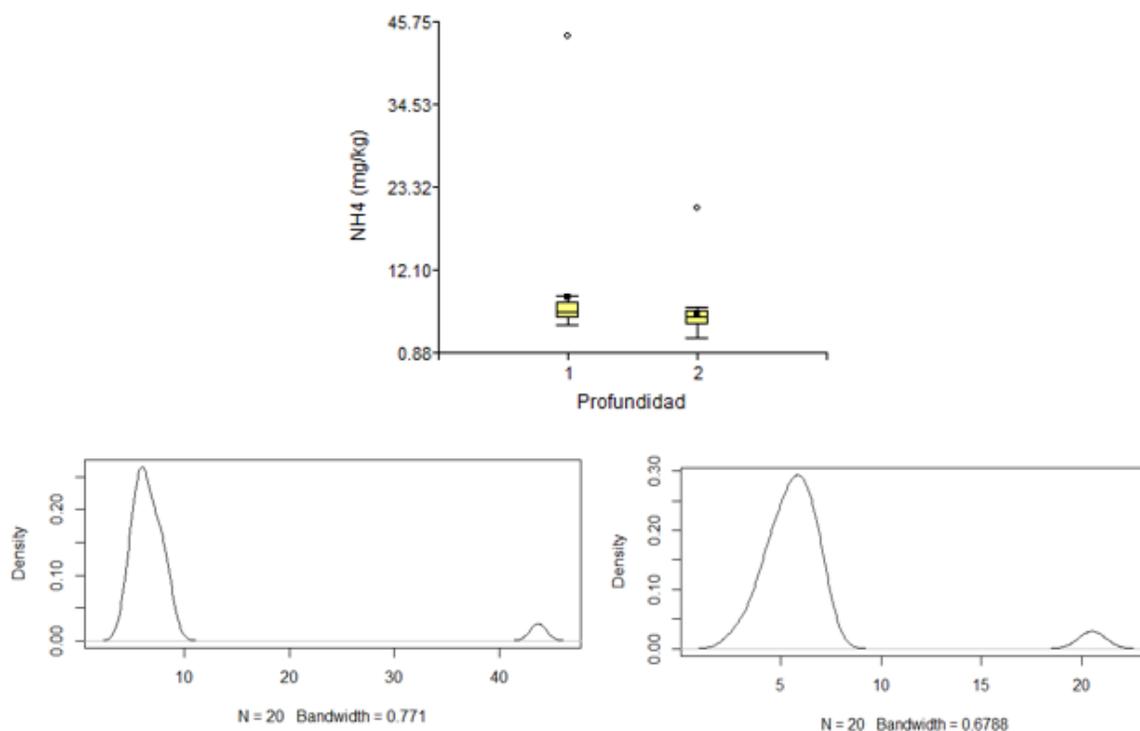


Figura 37. Comportamiento del amonio en ambas profundidades de muestreo

En la figura 35 se presenta el diagrama de caja y gráficas de dispersión correspondientes a la variable nitrato para ambos grupos de profundidad, encontrándose similitudes en el comportamiento (dispersión) de los datos en ambos casos y presentando diferencias entre los contenidos medios de los grupos. Para la profundidad 1 los datos se concentran en el intervalo de 0-50 mg/kg, mientras que para la profundidad 2 la mayoría de ellos se encuentran entre 0 y 40 mg/kg.

Es importante mencionar que para todos los parámetros químicos analizados se encontraron datos atípicos en el conjunto de valores obtenidos a partir del muestreo en campo, que a su vez pudo estar influenciado por otras variables externas que no podían ser

controladas. Además, como se puede observar en todas las gráficas los contenidos de 134 nutrientes fueron mayores en los primeros 10 centímetros de suelo.

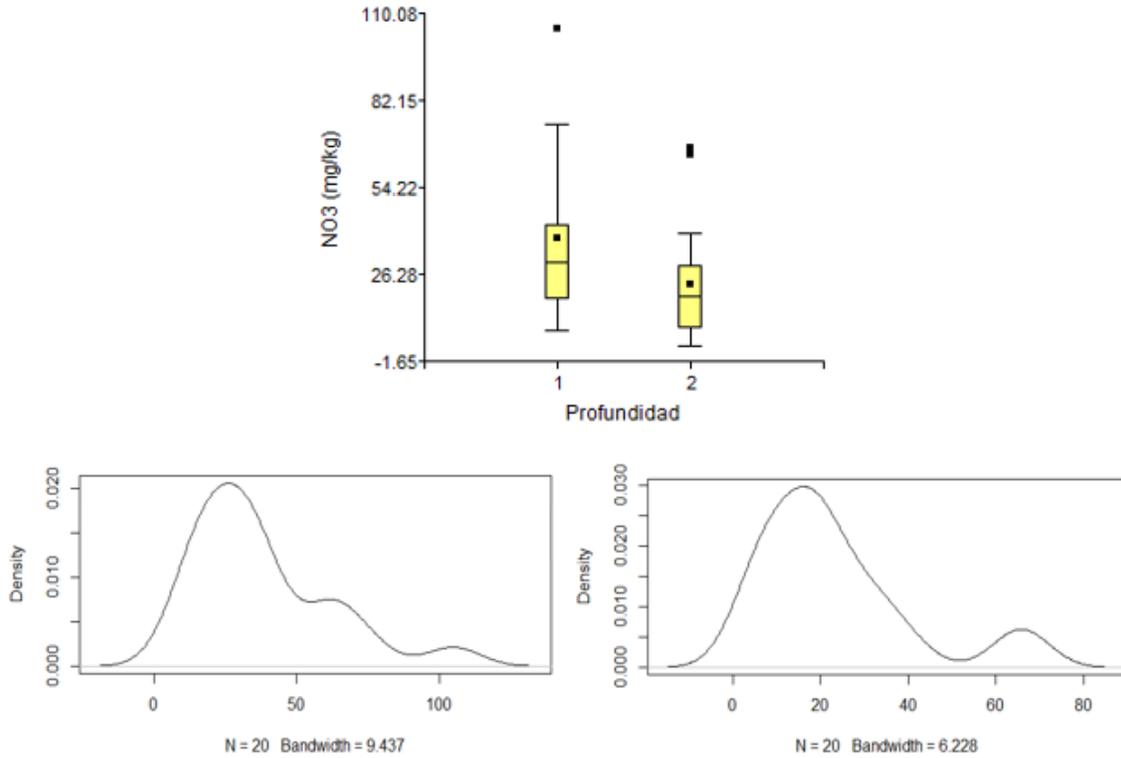
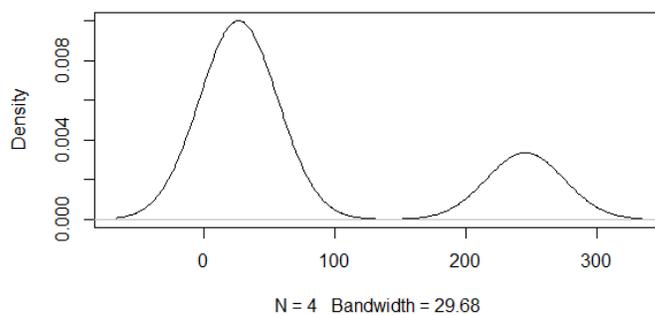
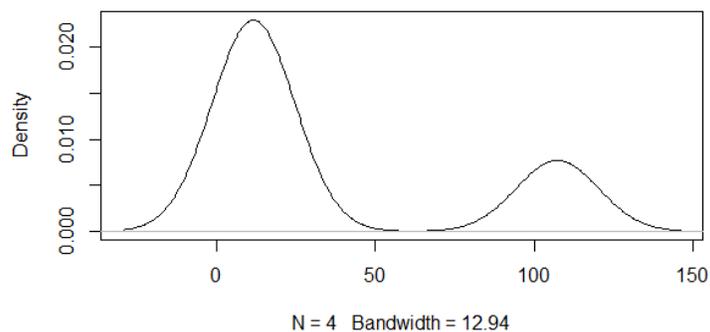


Figura 38. Comportamiento del nitrato en ambas profundidades de muestreo

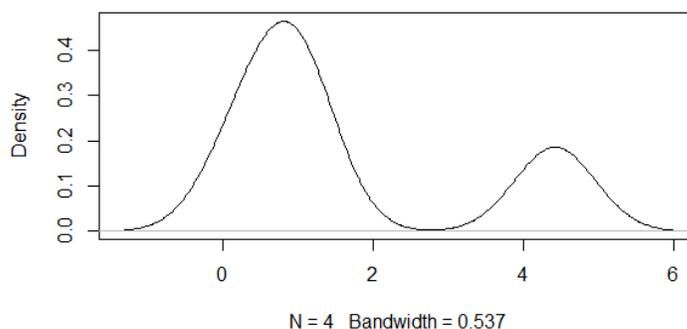
Para las muestras tomadas en las zonas de ladera del municipio se obtuvo un comportamiento similar para las variables MO, C oxidable y N-total con contenidos concentrados en los intervalos de 0-100, 0-50 y 0-2 g/kg; respectivamente, tal como se presenta en las gráficas de densidad (figura 36-38).



*Figura 39. Comportamiento de la materia orgánica en zonas de ladera*



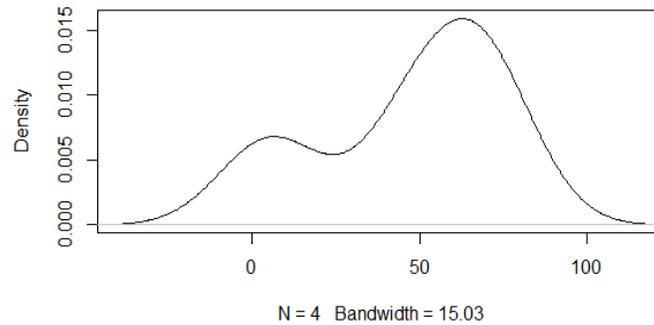
*Figura 40. Comportamiento del carbono oxidable en zonas de ladera*



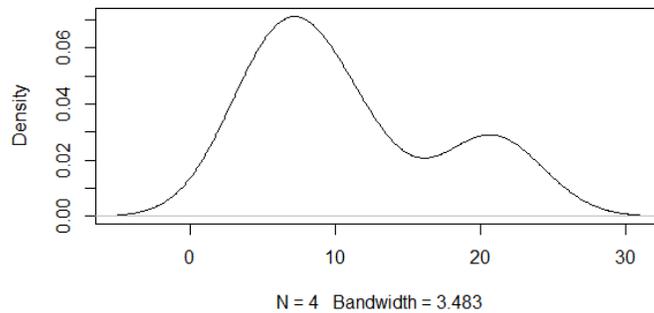
*Figura 41. Comportamiento del nitrógeno total en zonas de ladera*

En zonas de ladera se encontró que para la variable nitrato las concentraciones se presentaron en el intervalo de 50-100 mg/kg, mientras que para el amonio prevalecieron los contenidos correspondientes al rango de 0-10 mg/kg. El pico más alto observado en la figura 39 es concordante con el pico más bajo en la figura 40, debido a que el nitrógeno

del suelo sufre un proceso de nitrificación en el cual el amonio es transformado a nitrito<sup>136</sup> y posteriormente a nitrato a través de la acción microbiana; por lo que si se da un aumento de las concentraciones de nitrato se esperaría obtener contenidos menores de amonio.



*Figura 42. Comportamiento del nitrato en zonas de ladera*



*Figura 43. Comportamiento del amonio en zonas de ladera*

La figura 41 muestra el resumen numérico de los datos obtenidos para aguas superficiales en Zona Bananera, en la que se presentan los valores máximos y mínimos, los cuartiles 1 y 3, la media y mediana de cada parámetro analizado. Es importante anotar, que al igual que los valores presentados en suelo, estos datos tampoco presentan una distribución normal caracterizada porque el comportamiento de los datos sigue la forma de una campana de Gauss.

pH_A	CE_A	NO3_A	NH4_A	NO2_A
Min. :7.020	Min. :0.04000	Min. :0.0390	Min. :0.0760	Min. :0.0986
1st Qu.:7.157	1st Qu.:0.05000	1st Qu.:0.3588	1st Qu.:0.2305	1st Qu.:0.2600
Median :7.330	Median :0.07500	Median :0.5585	Median :0.3140	Median :0.3880
Mean :7.423	Mean :0.09667	Mean :0.9883	Mean :0.2761	Mean :0.8401
3rd Qu.:7.540	3rd Qu.:0.12500	3rd Qu.:1.1600	3rd Qu.:0.3415	3rd Qu.:1.1530
Max. :8.550	Max. :0.20000	Max. :3.5100	Max. :0.4030	Max. :2.7500
			NA's :1	NA's :1

Figura 44. Resumen numérico de los datos obtenidos para aguas superficiales

Las gráficas de densidad presentadas en la figura 42-44 evidencian el comportamiento no normal de las variables amonio, nitrito y nitrato en las principales fuentes de agua superficial del municipio.

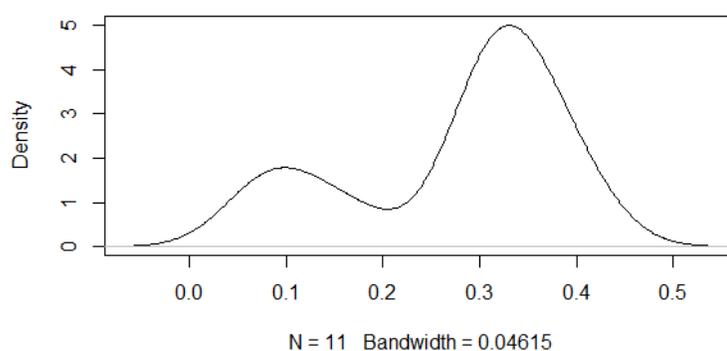


Figura 45. Comportamiento del amonio en el agua

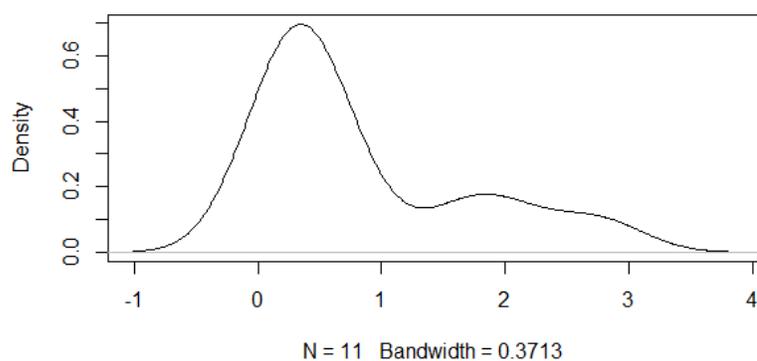


Figura 46. Comportamiento del nitrito en el agua

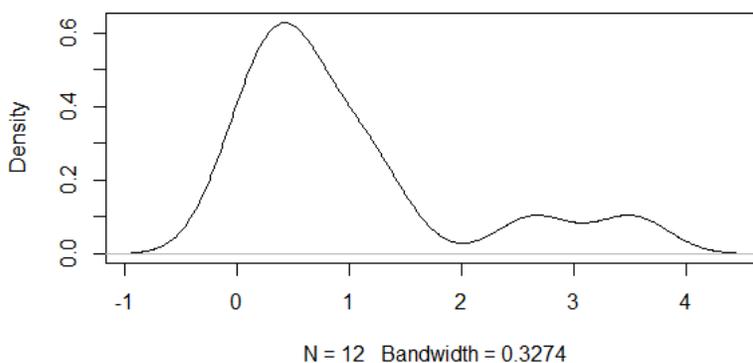


Figura 47. Comportamiento del nitrato en el agua

En las tablas 22-24 se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney para dos muestras independientes en el programa InfoStat versión 2008; en ellas la variable dicotómica está representada por los recursos suelo y agua, y la variable ordinal corresponde a las concentraciones de las formas de nitrógeno y carbono en ambos sistemas. Para el caso de los datos de aguas superficiales únicamente se tuvo en cuenta la variable nitrato, debido a que el estudio se enfocó en analizar la influencia de dichos nutrientes en el suelo sobre los nitratos en las aguas superficiales del municipio.

Los resultados obtenidos muestran que existen diferencias significativas entre los grupos agua y suelo; evidenciando asociación entre las variables, con excepción de la combinación realizada entre nitrato y nitrógeno total. En este caso, el p valor obtenido para la prueba fue mayor al nivel de significancia de 0,05 aceptando la hipótesis nula de que no existen diferencias estadísticas entre las medias de los grupos. No obstante, en los casos donde el p valor fue menor (aceptación de la hipótesis alternativa) se observa que las medias arrojadas por el programa estadístico, correspondientes al recurso suelo son

mayores a las obtenidas en aguas superficiales, lo que indica que en la Zona Bananera<sup>139</sup> las concentraciones presentes en el suelo no están contribuyendo de manera sustancial al aumento de la concentración de nitrato en aguas superficiales. Es claro que las variables están relacionadas, pero para el periodo y condiciones del estudio estas no están afectando los niveles de dicha forma de nitrógeno. Únicamente se observó un caso donde la media de nitrógeno total en el suelo fue menor a la de nitrato encontrada en el agua y fue en la profundidad 2 presentada en la tabla 24; no obstante, como el p valor fue mayor a 0,05 (no existe significancia estadística) no existe evidencia de que un aumento en las concentraciones de nitrógeno total en el suelo ocasione un incremento o disminución de los niveles de nitrato en las aguas superficiales del municipio.

*Tabla 22. Prueba U de Mann-Whitney aguas superficiales vs suelos en zonas de ladera*

<b>Variable</b>	<b>Recurso</b>	<b>Grupo</b>	<b>N° datos</b>	<b>Media</b>	<b>DE</b>	<b>W</b>	<b>p (2 colas)</b>
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	58,00	0,0011
Amonio	Suelo	2	4	10,85	6,99		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	58,00	0,0011
Nitrato	Suelo	2	4	47,20	29,69		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	41,00	0,4462
Nitrógeno total	Suelo	2	4	1,66	1,87		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	58,00	0,0011
Carbono oxidable	Suelo	2	4	35,50	47,87		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	58,00	0,0011
Materia orgánica	Suelo	2	4	81,03	109,62		

Tabla 23. Prueba U de Mann-Whitney aguas superficiales vs profundidad de 0-10 cm en suelo<sup>140</sup>

Variable	Recurso	Grupo	N° datos	Media	DE	W	p (2 colas)
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	78,00	< 0,0001
Amonio	Suelo	2	20	8,32	8,41		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	78,00	< 0,0001
Nitrato	Suelo	2	20	37,63	24,31		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	171,00	0,2933
Nitrógeno total	Suelo	2	20	1,02	0,54		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	78,00	< 0,0001
Carbono oxidable	Suelo	2	20	15,56	6,98		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	78,00	< 0,0001
Materia orgánica	Suelo	2	20	35,37	15,86		

Tabla 24. Prueba U de Mann-Whitney aguas superficiales vs profundidad de 10-20 cm en suelo

Variable	Recurso	Grupo	N° datos	Media	DE	W	p (2 colas)
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	79,00	< 0,0001
Amonio	Suelo	2	20	6,24	3,53		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	79,00	< 0,0001
Nitrato	Suelo	2	20	23,09	17,57		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	208,00	0,6971
Nitrógeno total	Suelo	2	20	0,69	0,49		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	79,00	< 0,0001
Carbono oxidable	Suelo	2	20	11,20	3,53		
Nitrato	Agua	1	12	0,99	1,06	78,00	< 0,0001

Variable	Recurso	Grupo	N° datos	Media	DE	W	p (2 colas)
Materia orgánica	Suelo	2	20	25,50	8,04		

A partir de las medias de carbono oxidable y nitrógeno total obtenidas en la prueba no paramétrica para ambas profundidades, se calculó la relación C/N y se comparó con el rango ideal para el suelo (8,5 a 11,5); obteniéndose los siguientes resultados:

Profundidad 1 (0-10 cm): 15,25

Profundidad 2 (10-20 cm): 16,23

Esta relación C/N a pesar de estar por encima del rango ideal, se encuentra en los valores normales presentados en la literatura, debido a las condiciones climáticas, topografía y geología del área de estudio, las labores del cultivo y los residuos presentes en el suelo. Esto indica que hay buena presencia de carbono en el suelo respecto al contenido de nitrógeno, lo cual contribuye con la sostenibilidad ambiental del municipio aumentando la capacidad de amortiguación del recurso a grandes contenidos de nitrógeno añadido por actividades de fertilización.

#### 3.4. Fase 4: Regulación de las concentraciones de C y N en la zona de estudio

Los mapas de la zona con las concentraciones obtenidas mediante caracterización analítica se presentan en el **Anexo A. Contenido de carbono y nitrógeno en suelo\_Zona Bananera** y el **Anexo B. Contenido de nitrógeno en aguas\_Zona Bananera**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación, se plantearon como base inicial para futuros estudios algunas alternativas de manejo sostenible del suelo

para regular las concentraciones de carbono y nitrógeno en el contexto de Zona<sup>142</sup> Bananera, las cuales se presentan a continuación:

Monitorear concentraciones de nitrógeno en el suelo y su relación respecto a C.

Determinar el requerimiento hídrico de los cultivos para cada etapa fenológica, en el municipio de Zona Bananera evitando arrastre y lixiviación de nitratos.

Mejorar el manejo de los residuos vegetales proveniente de los cultivos en el área de estudio.

Fomentar incorporación de materia orgánica de buena calidad en los suelos.

Explorar el proceso de pirólisis de materiales orgánicos provenientes del municipio para la obtención de carbono más estable en el tiempo.

Producción de Biochar para ser utilizado como enmienda para el suelo.

Uso de cultivos de cobertura en la zona.

## CONCLUSIONES

Las actividades agrícolas que se desarrollan en el municipio de Zona Bananera del departamento del Magdalena generan cambios y afectaciones sobre los recursos suelo y agua debido a procesos de lixiviación de nutrientes esenciales como el nitrógeno. El muestreo y posterior caracterización analítica de las muestras recolectadas permitió conocer las concentraciones de N y C en el área estudiada.

La comparación de los resultados con los estándares de referencia del IGAC (2014) evidenció contenidos medios de MO y niveles altos de nitratos en el suelo de la zona, especialmente en las fincas bananeras, indicando la necesidad de llevar a cabo estudios posteriores para proponer prácticas más sostenibles para el manejo de los cultivos que permitan a los agricultores obtener la mayor productividad sin afectar el ambiente.

La prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney aplicada al conjunto de datos mostró que existen diferencias significativas entre las medias de los grupos independientes, lo que indica asociación entre las variables y corrobora la influencia que tienen las concentraciones de N y C en el suelo sobre los contenidos de nitratos en las aguas superficiales. Esta metodología resultó ser ventajosa debido al comportamiento heterogéneo de ambos sistemas, representado en la no normalidad y heterocedasticidad de los datos.

Las mejores alternativas de manejo para regular las concentraciones de nitrógeno y carbono en el municipio están fundamentadas en prácticas agrícolas orgánicas, que

proporcionen beneficios a nivel socioeconómico (producción) y ambiental<sup>144</sup> (minimización de impactos negativos).

## **RECOMENDACIONES**

Se requiere principalmente de la disposición de las fincas bananeras y palmeras a través de convenios o acuerdos con la universidad para realizar los muestreos de manera directa y que al mismo tiempo esto pueda servirles para mejorar las prácticas de manejo de los cultivos y la producción de los mismos. Esto considerando que durante los muestreos el acceso a algunas fincas fue restringido.

Se sugiere coordinar con las entidades ambientales encargadas para proponer metodologías, formular o actualizar los estándares de referencia para aguas superficiales a fin de que estos puedan ser implementados en investigaciones posteriores y sean utilizados en la toma de decisiones. Se cuentan con estándares de calidad de agua para consumo humano, normas de vertimiento, entre otras; no obstante, aún existen muchas debilidades que obstaculizan el adecuado desarrollo de las investigaciones en la región y el país.

La información suministrada en este documento sirve de base para realizar estudios posteriores y más detallados en torno al tema de investigación que permitan conocer con mayor certeza las afectaciones producidas por el uso excesivo de nutrientes en el municipio. Sin embargo, se enfatiza en la importancia de destinar recursos a aquellas investigaciones que permitan ampliar y actualizar los muestreos en suelo y aguas superficiales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abera, Y. y Belachew, T. (2011). Effects of landuse on soil organic carbon and nitrogen in soils of Bale, Southeastern Ethiopia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(1), 229-235.
- Adger, N. (2007). Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V. y Menjivar-Flores, J. (2012). Relación entre las propiedades edafoclimáticas y la incidencia de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en la zona bananera del Magdalena-Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3, 13-25.
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V. y Ramírez-González, S. I. (2018b). Parámetros edáficos asociados al daño por *Mycosphaerella fijiensis* Morelet en la Zona Bananera del Magdalena (Colombia). *Revista Espacios*, 39(26), 18p.
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V. y Rodríguez-Barrios, J. (2015). Relationship between the nutritional status of banana plants and black sigatoka severity in the Magdalena region of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 33(3), 348-355.
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V. y Vásquez-Polo, J. R. (2018a). Características edáficas y su relación con usos del suelo en Santa Marta, Colombia. *Entramado*, 14(1), 242-250.
- Alcaldía Municipal de Zona Bananera. (2016-2019). *Plan de Desarrollo Municipal*. <http://www.zonabananera-magdalena.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionControl/Plan%20de%20Desarrollo%202016%20-%202019.pdf>
- Almendros, G. (2004). Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafología*, 11(2), 229-248.

- Amaguaña, J. R., Fuente, D. Y., Arteaga-Meneses, G. y Viveros-Zarama, M. (1995). Respuesta del trigo ICA-Yacuanquer (*Triticum aestivum* L.) a la fertilización edáfica y foliar en un suelo del municipio de Pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 13, 21-35.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23.<sup>a</sup> ed.). <https://www.wef.org/resources/publications/books/StandardMethods/>
- Aristizábal, M. (2010). Efecto de la frecuencia de fertilización con nitrógeno y potasio sobre el crecimiento, producción y severidad de las sigatocas del plátano (*Musa AAA*) Dominico Hartón. *Revista Agronómica.*, 18(1), 19-28.
- Asociación de Bananeros de Colombia – AUGURA. (2016). *VI Reunión Técnica Bananera Santa Marta*. <http://www.augura.com.co/cenibanano/reunion-tecnica-bananera/>
- Atlantic International University – AIU. (s. f.). *Sesión 7: Métodos cuantitativos de investigación*. Consultado el 15 de febrero de 2021. <https://cursos.aiu.edu/METODOS%20CUANTITATIVOS%20DE%20INVESTIGACION/7/Sesi%C3%B3n%207.pdf>
- Bautista-Zamora, D., Chavarro-Rodríguez, C., Cáceres-Zambrano, J. y Buitrago-Mora, S. (2017). Efecto de la fertilización edáfica en el crecimiento y desarrollo de *Phaseolus vulgaris* cv. ICA Cerinza. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 122-132.
- Benimeli, M. F., Plasencia, A., Corbella, R. D., Andina-Guevara, D., Sanzano, A., Sosa, F. A. y Fernández de Ullivari, J. (2019). *El nitrógeno del suelo*. Catedra de Edafología, Universidad Nacional de Tucumán.
- Bernal-Figueroa, A., Beltrán-Pineda, M. y Rocha-Gil, Z. (2019). Estudio preliminar de variables químicas en suelos con procesos de revegetalización en el municipio de Villa de Leyva (Boyacá, Colombia). *Cuaderno Activa*, 11, 33-41.
- Brammer, H. y Nachtergaele, F. O. (2015). Implications of soil complexity for environmental monitoring. *International Journal of Environmental Studies*, 72(1), 56-73.
- Bravo, I., Montoya, J. y Menjivar, J. (2013). Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un *Typic Melanudands* del departamento del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 62(3), 261-267.

- Bringezu, S., Schütz, H., Pengue, W., O'brien, M., García, F., Sims, R. y Herrick, J.147 (2014). *Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 117-124.
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96.
- Bustamante, C., Zamora, A., Camejo, R., Rodríguez, M. y Reyes, M. (1987). Fertilización fosfórica del cafeto cultivado en suelo pardo sin carbonatos. I. Efecto de la fertilización sobre las características agroquímicas del suelo. *Ciencia y Tecnología en la Agricultura. Serie: Café y Cacao*, 9(2), 27-39.
- Cabeza, O. (2014). *Agua y conflictos en la Zona Bananera del Caribe colombiano en la primera mitad del siglo XX* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://www.bdigital.unal.edu.co/45669/1/22466759.2014.pdf>
- Cabrera, J. A. y Zuaznábar, R. (2010). Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada en un experimento de Larga Duración con 24 cosechas acumuladas. *Cultivos tropicales*, 31(1), 93-100.
- Calvin, K. V., Beach, R., Gurgel, A., Labriet, M. y Loboguerrero-Rodríguez, A. M. (2016). Agriculture, forestry, and other land-use emissions in Latin America. *Energy Economics*, 56, 615- 624.
- Camargo, J. A. y Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: Problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 16(2), 98-110.
- Cantú-Silva, I. y Yáñez-Díaz, M. I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 122-150.
- Carvajal-Muñoz, J. S. y Carmona-García, C. E. (2012). Benefits and limitations of biofertilization in agricultural practices. *Livestock Research for Rural Development*, 24(3), 8p.
- Castañeda-Martín, A. E. y Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210-221.

- Castillo-González, A. M., Hernández-Maruri, J. A., Avitia-García, E., Pineda-Pineda, J., Valdéz-Aguilar, L. A. y Corona-Torres, T. (2011). Extracción de macronutrientes en banano 'Dominico' (*Musa spp.*). *Phyton*, 80, 65-72.
- Celaya-Michel, H. y Castellanos-Villegas, A. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356.
- CELEC. (s. f.). *Metodología: procedimiento para la toma de muestras*. Consultado el 10 de octubre de 2020. [https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/baners\\_home/EIA/cap42\\_lt\\_santo\\_domingo\\_esmeraldas.pdf](https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/baners_home/EIA/cap42_lt_santo_domingo_esmeraldas.pdf)
- Celis, T. (2011). *Efecto de la distribución heterogénea de nitrato sobre el sistema radical de Capsicum chinense Jacq.* [tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C].
- Cerón, L. y Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
- Colqué, M. T. y Sánchez, V. E. (2007, marzo). *Los gases de efecto invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?* Asociación Civil Labor/Amigos de la Tierra – Perú. <https://es.slideshare.net/ACTransparencia/los-gases-de-efecto-invernadero>
- Colque, O., Iquize, E. y Ferrufino, A. (2005). Efecto de la fertilización nitrogenada y potásica en la producción del banano *Musa AAA* en fincas comerciales de tres localidades del Trópico de Cochabamba. *Informaciones Agronómicas*, 26, 1-7.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. (2015). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*. Repositorio CEPAL. [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37310/S1420656\\_es.pdf.jsessionid=FCC1EAB4228A726A850DBAD50DBB5F3F?sequence=4](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37310/S1420656_es.pdf.jsessionid=FCC1EAB4228A726A850DBAD50DBB5F3F?sequence=4)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL, Delegación Regional de Cooperación-DRC para América del Sur, Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura-IICA y Food and Agriculture Organization-FAO. (2011, julio). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación* [Memoria de seminario internacional 10 y 11 de noviembre de 2010]. Santiago de Chile.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA. (2002). *Capítulo III. Vocación de uso de las tierras de Colombia*. En *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*, 89 p.

- Cruz, M. E. (2014). *Respuestas en desarrollo y producción del banano a la fertilización con nitrógeno y potasio en la zona de Santa Marta*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Colombia.
- Dechmi, F. y Isidoro, D. (2018, 28 de noviembre). *Modelización y propuesta normativa para mejorar la problemática de la contaminación por nitrato y fósforo (2017-2019)* [ponencia]. IX Jornada Técnica de RAA del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón – CITA, Zaragoza, España. <https://core.ac.uk/download/pdf/219387371.pdf>
- Delgado-Restrepo, O., Menjivar-Flores, J. y Muñoz-Arboleda, F. (2016). Influence of management systems on the Nitrogen mineralization and fertilization of sugarcane. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 69(1), 7755-7762.
- Escalante, A. (2015). *Fuentes de energía y sus aplicaciones* [monografía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional UAAAN. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6647/63316%20ESCALANTE%20PEREZ,%20ADONIRAM%20%20MONOG.pdf?sequence=1>
- Escobar, O. F. (2015). *Respuestas espectrales a la fertilización con nitrógeno y potasio en el cultivo del Banano (Musa AAA simmonds), caso municipio Zona Bananera* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://bdigital.unal.edu.co/51758/1/oscarfradiqueescobarpardo.2015.pdf>
- Escuela de Ingeniería y Medio Ambiente – EIMA. (s. f.). *Selección del punto de muestreo en aguas superficiales*. Consultado el 20 de agosto de 2020. <http://eimaformacion.com/seleccion-del-punto-de-muestreo-en-aguas-continentales-superficiales/>
- Estévez, R. (2019, 14 de mayo). *Interpolación espacial en QGIS: métodos, procesos y evaluación*. Geomapik. <http://www.geomapik.com/analisis-gis/como-realizar-interpolacion-espacial-qgis-metodos/>
- Eugercios-Silva, A. R., Álvarez-Cobelas, M. y Montero-González, E. (2017). Impactos del nitrógeno agrícola en los ecosistemas acuáticos. *Revista Ecosistemas*, 26(1), 37-44.
- European Commission. (2010). *Soil - a key resource for the EU*. <https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/soil2.pdf>
- Follett, R. F. y Schimel, D. S. (1989). Effects of tillage practices on microbial biomass dynamic. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 1091-1096.

- Fonseca, R. y Piña, E. (2006). Efecto de niveles de nitrógeno sobre el rendimiento y la calidad del fruto del pimiento (*Capsicum annuum* L.), cultivar Bouquet-50. *Revista Centro Agrícola*, 33(1), 15-20.
- Food and Agriculture Organization – FAO. (1996). *Cumbre Mundial sobre la Alimentación*. <http://www.fao.org/docrep/X2051s/X2051s00.htm>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2002a). *Agricultura mundial hacia los años 2015/2030*. <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s00.htm>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2002b). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2007). *Land evaluation: towards a revised framework (LE\_Rev)*. <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1029521/>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2011). The State of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. <http://www.fao.org/3/a-i1688e.pdf>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2014). *Latinoamérica duplicó sus emisiones agrícolas de gases de efecto invernadero en los últimos 50 años*. <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/240450/>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2015a). *Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático*. <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/340785/>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2015b). *Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse*. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2016). *Estado Mundial del Recurso Suelo*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. <http://www.fao.org/3/b-i6937s.pdf>
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2019). *Mitigación del cambio climático y adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca*. <http://www.fao.org/3/i0142s/i0142s.pdf>

- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz-Gaistardo, C., Encina-Rojas, 151 A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça-Santos-Brefin, M. L., Montanarella, L., Muniz-Ugarte, O., Schad, P., Vara-Rodríguez, M. I. y Vargas, R. (eds.) (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp.
- González, J. D., Mosquera, J. D. y Trujillo, A. T. (2015). Efectos e impactos ambientales en la producción y aplicación del abono supermagro en el cultivo de sandía. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 103-111.
- Gregorich, E. G., Ellert, B. H., Drury, C. F. y Liang, B. C. (1996). Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residues C storage. *American Journal of Soil Science*, 60, 422-476.
- Guerrero, R. y Gadban, R. (2002). *Eficacia de diferentes fertilizantes nitrogenados en el cultivo de banano (Musa AAA, Clon Valery) en la zona de Río frío, Magdalena, Colombia*. Universidad Tecnológica del Magdalena.
- Hayatsu, M., Tago, K. y Saito, M. (2008). Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54, 33-45.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). Mc Graw Hill Education. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hu, B., Shen, L., Xu, X. y Zheng, P. (2011). Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in different natural ecosystems. *Biochemical Society transactions*, 39(6), 1811-6.
- Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. (1992). *Normatividad*. Página web ICA. Consultado el 15 de febrero de 2021. <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/1992>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Magdalena. Escala 1: 100000*. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2016, 21 de abril). *30 prácticas que evitarían el deterioro del suelo, recurso natural del que pocos hablan*. <https://igac.gov.co/es/noticias/30-practicas-que-evitarian-el-deterioro-del-suelo-recurso-natural-del-que-pocos-hablan>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (s. f.). *Guía de muestreo*. Consultado el 15 de julio de 2020. <https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/guiademuestreo.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza.

Jenny, H. (1950). Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. *Soil Science* 69(1), 63–70.

Ju, X. T, Xing, G. X., Chen, X. P., Zhang, S. L., Zhang, L. J., Liu, X. J., Cui, Z. L., Yin, B., Christie, P., Zhu, Z. L. y Zhang, F. S. (2009). Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 106(9), 3041-3046.

Klotz, M. G., y Stain, L. Y. (2008). Nitrifier genomics and evolution of the nitrogen cycle. *FEMS Microbiological Letters*, 278, 146-156.

Lahav, E. y Turner, D. (1992). *Fertilización del banano para rendimientos altos* (2.ª ed., boletín 7). INPOFOS.

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science AAAS*, 304, 1623-1627.

Lal, R. (2014a). Societal value of soil carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(6), 186-192.

Lal, R. (2014b). World soils and the carbon cycle in relation to climate change and food security. In Weigelt, J., Müller, A., Beckh, C. y Töpfer, K. (eds.) *Soils in the Nexus*, Oekom Verlag, München, Germany, pp. 31-66.

Limbozzi, F. y Galantini, J. A. (2018). *El carbono orgánico del suelo fácilmente oxidable*. En Siembra directa en el SO Bonaerense (Ed. Galantini, J. A.), pp. 167-172.

Lis-Gutiérrez, M., Rubiano-Sanabria, Y. y Loaiza-Usuga, J. C. (2019). Soils and land use in the study of soil organic carbon in Colombian highlands catena. *AUC Geographica*, 54(1), 15–23.

Loaiza-Usuga, J. C., León-Peláez, J. D., González-Hernández, M. I., Gallardo-Lancho, J. F., Osorio-Vega, W. y Correa-Londoño, G. (2013). Alteration in Litter decomposition pattern in tropical montane forest of Colombia: Oak forests contrasted with coniferous plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(6), 6p.

- Loaiza-Usuga, J. C., Rodríguez, J. A., Ramírez, M. V. y Lema, A. (2010). Estimation<sup>153</sup> of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 260, 1906–1913.
- López, F., Dorado, J., González-Villa, F. J., Zancada, M. C. y Almendros, G. (2003). Evolución de las propiedades físicas y la materia orgánica del suelo con enmiendas orgánicas y fertilización mineral. *Edafología*, 10(2), 147-153.
- López, M. (1965). Cambios químicos provocados en el suelo Chinchiná franco-arenoso con la aplicación de distintas fuentes y dosis de fertilizantes. *Cenicafé*, 16(1-4), 55-76.
- López, M. A. y Espinosa, M. J. (1995). *Manual de nutrición del banano. Una visión práctica del manejo de la fertilización*. Corporación bananera nacional.
- López, R. G. y Campos, J. H. (2012). Mineralización de nitrógeno en enmiendas orgánicas en condiciones de laboratorio. *Revista Agropecuaria y Forestal APF*, 1(1), 15-20.
- Marouani, A. y Harbeoui, Y. (2016). Eficiencia de nitrógeno en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Acta agronómica*, 65(2), 164-169.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MinAgricultura. (2013). Sistema de Información Geográfica Municipal. 19 p.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MinAgricultura. (2020, 12 de junio). *Mapa revela el potencial de la industria del banano de exportación*. Agronet. <http://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Mapa-revela-el-potencial-de-la-industria-del-banano-de-exportaci%C3%B3n.aspx#:~:text=En%20Colombia%2C%20en%20el%20a%C3%B1o,100%2C%20millones%20de%20cajas>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo*. Bogotá D.C., Colombia. 94 p.
- Molina, J. y Rodrigo, M. F. (2014). *T.5 – Pruebas no paramétricas*. [http://ocw.uv.es/ciencias-de-la-salud/estadistica-ii/est2\\_t5.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias-de-la-salud/estadistica-ii/est2_t5.pdf)
- Monsalve, O. I., Gutiérrez, J. S. y Cardona, W. A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209.
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García-Oliva, F., García-Sánchez, R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia-Torres, Y., Troyo, E. y Yépez, E. (2016).

- Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México:154 Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34, 39-59.
- Montenegro-Gómez, S. P., Barrera-Berdugo, S. E., Chiriví-Salomón, J. S. Pulido-Pulido, S. Y., Sepúlveda-Casadiago, Y. A., Vinasco-Guzmán, M. C. y Palomino-Leiva, M. L. (2019). *Capítulo 9. Prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo*. Libros Universidad Nacional Abierta Y a Distancia, 172 - 187.
- Newbold, P., Carlson, W. L. y Thorne, B. M. (2008). *Estadística para Administración y Economía* (6.ª ed.). Pearson Educación. <http://fad.unsa.edu.pe/bancayseguros/wp-content/uploads/sites/4/2019/03/Estadistica-para-administracion-y-la-economia.-6Ed.-Newbold-2008.pdf>
- Nústez, C. E., Santos, M., Navia, S. L. y Cotes, J. M. (2006). Evaluación de la fertilización fosfórica foliar y edáfica sobre el rendimiento de la variedad de papa ‘Diacol Capiro’ (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana*, 24(1), 111-121.
- Ocampo, O. (2011). El cambio climático y su impacto en el agro. *Revista de Ingeniería*, 33, 115-123.
- Ordóñez-Díaz, M. C., Bravo-Realpe, I. y Figueroa-Casas, A. (2014). Flujo de Carbono Orgánico Total (COT) en una cuenca andina: caso subcuenca Río Las Piedras. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 214p.
- Organización Panamericana de la Salud - OPS y Organización Mundial de la Salud - OMS. (1980). Nitratos, nitritos y compuestos de N-nitroso. *Criterios de salud ambiental*, 5, 21-25.
- Pacheco, J. y Cabrera, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Revista de Ingeniería*, 7(2), 47-54.
- Pardo, A. (s. f.). *Capítulo 19: análisis no paramétrico. El procedimiento Pruebas no paramétricas*. Consultado el 10 de octubre de 2020. <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/GuiaSPSS/19nparam.pdf>
- Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., Brevik, E. C. y Cerdá, A. (2015). Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: A comparison of entire soil profiles and soil control sections. *Journal of Environmental Management*, 155, 219–228.
- Paz, F. y Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 339-355.

- Perea, M. (2003). *Biotecnología: bananos y plátanos*. Editora Guadalupe, Bogotá. 228155 p.
- Piraneque-Gambasica, N. V., Aguirre-Forero, S. E. y Menjivar-Flores, J. C. (2007). Evolución del contenido de elementos nutrientes en suelos cultivados con cebolla de bulbo. *Acta Agronómica*, 56(1), 37-42.
- Piraneque-Gambasica, N. V., Aguirre-Forero, S. E. y Reis-Lucheta, A. (2018). Green manure: Alternative to carbon sequestration in a Typic Ustipsammet under semiarid conditions. *Spanish Journal of Soil Science (SJSS)*, 8(3), 293-305.
- Plan Básico de Ordenamiento Territorial – PBOT. (2001). Municipio de Zona Bananera, Prado-Sevilla. 236 p.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD. (2007). *Informe sobre Desarrollo Humano 2007/2008. La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido*. Grupo Mundi Prensa.
- Puentes-Páramo, Y., Gómez-Carabalí, A. y Menjivar-Flores, J. (2016). Influence of the relationship among nutrients on yield of cocoa (*Theobroma cacao* L.) clones. *Acta Agronómica*, 65(2), 176-182.
- Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J. y Aranzazu-Hernández, F. (2014). Eficiencias en el uso de nitrógeno, fósforo y potasio en clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Bioagro*, 26(2), 99-106.
- Pulleman, M., Boeima, J., Van Essen, E. y Meijles, E. (2000). Soil organic matter content as a function of different land use history. *American Journal of Soil Science*, 64, 689-693.
- Quesada-Muelas, L. (2019, 18 de julio). *¿Qué es la interpolación espacial de datos?* Geoinnova. <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-la-interpolacion-espacial-de-datos/>
- Quispe-Andía, A., Calla-Vásquez, K. M., Yangali-Vicente, J. S., Rodríguez-López, J. L. y Pumacayo-Palomino, I. I. (2019). *Estadística no paramétrica aplicada a la investigación científica con software SPSS, MINITAB Y EXCEL* (1.ª ed., vol. 1). Editorial EIDEC. <https://www.editorialeidec.com/wp-content/uploads/2020/01/Estad%C3%ADstica-no-param%C3%A9trica-aplicada.pdf>
- Rivas-Ruiz, R., Moreno-Palacios, J. y Talavera, J. O. (2013). Investigación clínica XVI Diferencias de medianas con la U de Mann-Whitney. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 51(4), 414-9.

- Rivera, R. y Martín, R. (1979). Efecto de niveles de N, P y P en/C. arábica/Var. “Mundo Novo” cultivado al sol, sobre fondos fijos de arropo y compost en la fase de fomento. Parte I. Propiedades químicas y fisico-químicas del suelo. *Ciencia y Tecnología en la Agricultura. Serie: Café y Cacao*, 1(1-2), 55-66.
- Robinson, J. y Galán, V. (2012). Plátanos y bananas (2.<sup>a</sup> ed.). [Traducido al español de Bananas and Plantains]. Mundi-Prensa.
- Rodríguez, B., España, M. y Cabrera, E. (2004). Propiedades químico estructurales de la materia orgánica del suelo en un agro-sistema de los llanos centrales de venezolanos bajo diferentes prácticas de manejo. *Interciencia*, 29(8), 461-467.
- Romero-Lozada, M. del P., Enciso-Murillo, C. F., García, S. M., Wagner-Guerrero, J. J., Puentes-Páramo, Y. J. y Menjivar-Flores, J. C. (2016). Eficiencia de uso de nutrientes en ají tabasco (*Capsicum frutescens L.*) y habanero (*Capsicum chinense Jacq.*). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(2), 121-127.
- Sadeghian, S. (2003). Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé*, 54(3), 242-257. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc054%2803%29242-257.pdf>
- Sadeghian, S., Murgueitio, E., Mejía, C. y Rivera, J. (2001). Ordenamiento ambiental y reglamentación del uso y manejo del suelo en la zona cafetera. En *Suelos del eje cafetero*. Pereira: Proyecto U.T.P.-GTZ. pp. 96-108.
- Sánchez, J. y Mira, J. (2013). *Principios para la nutrición del cultivo de banano*. AUGURA, CENIBANANO. Colombia.
- Sánchez-Rodríguez, D. F. (2016). *Evaluación del carbono almacenado en la biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo de tres diferentes hábitats en la Península de Osa, Costa Rica* [tesis de pregrado, Universidad Nacional]. Repositorio UNA. [https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/13491/Tesis\\_Dami%c3%a1n\\_Felipe\\_S%c3%a1nchez\\_Rodr%c3%adguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/13491/Tesis_Dami%c3%a1n_Felipe_S%c3%a1nchez_Rodr%c3%adguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sanclemente-Reyes, O. E. (2015). *Crisis de la agricultura convencional y agroecología como alternativa que aporta a la construcción de ciudadanía ambiental*. Libros Universidad Nacional Abierta Y a Distancia, 83 – 88. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/1324>
- Tierramerica. (2009). *América Latina ante los efectos irreversibles de un planeta más caliente*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Banco Mundial. [http://www.inia.org.uy/online/files/contenidos/link\\_23112009121316.pdf](http://www.inia.org.uy/online/files/contenidos/link_23112009121316.pdf)

- Torres, J. (2016). *Absorción, distribución y acumulación de nitrógeno en banano variedad Williams en dos ciclos de producción en zona húmeda tropical* [tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://bdigital.unal.edu.co/52788/1/jaimetorresbazarro.2016.pdf>
- Torres, J. (2017, 6 de julio). *Optimizan uso de nitrógeno en producción bananera*. Agencia de noticias UN. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/articulo/optimizan-uso-de-nitrogeno-en-produccion-bananera.html>
- Torres, J., Sánchez, J. D., Cayón, G., Magnitskiy, S. y Darghan, A. E. (2014). Accumulation of dry matter and nitrogen contents in banana 'Williams' (*Musa AAA*) plants in Uraba, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 349-357.
- Uribe, A., Méndez, H. y Mantilla, J. (1998). Efecto de niveles de nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de cacao en suelo del Departamento de Santander. *Revista Suelos Ecuatoriales*, 28, 31-36.
- Valencia, G., Gómez, A. y Bravo, E. (1975). Efecto de diferentes portadores de nitrógeno en el desarrollo del café y en la fertilidad de los suelos. *Cenicafé*, 26(3), 131-142.
- Valenzuela, I. G. y Visconti, E. F. (2018). Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 233-243.
- Vásquez, M., Valle, R., López, E. y Jiménez, H. (1991). *Evaluación de fuentes nitrogenadas de fertilizantes y su efecto en la acidez del suelo* [ponencia]. Simposio de Caficultura Latinoamericana, Panamá: mayo 20-24 y Guatemala: IICA-POMECAFE.
- Vásquez-Polo, J. R., Macías-Vásquez, F. y Menjivar-Flores, J. (2014). Formas de hierro y aluminio en suelos con diferentes usos en la zona norte del departamento del Magdalena, Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 352-360.
- Vásquez-Polo, J. R. y Macías-Vásquez, F. (2017). Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 7-17.
- Vásquez-Polo, J. R., Baena-García, D. y Menjivar-Flores, J. C. (2010). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica*, 59(4), 449-456.

- Vásquez-Polo, J. R., Macías-Vásquez, F. y Menjivar-Flores, J. (2011). Formas de 158 carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Acta Agronómica*, 60(4), 369-379.
- Vásquez-Polo, J. R., Macías-Vásquez, F. y Menjivar-Flores, J. C. (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*, 25(3), 175-180.
- Vásquez-Polo, J. R., Schellekens, J. y Kaal, J. (2015). Composición de la materia orgánica en los suelos de seis zonas edafoclimáticas del Magdalena (Colombia). *Spanish Journal of Soil Science (SJSS)*, 5(3), 243-258.
- Villegas, V. A. (2014). *Variación del carbono orgánico en suelos del Altiplano Potosino Oeste* [tesis de pregrado, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí]. Repositorio Institucional UASLP. <https://nive.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3423/IAZ1RES01301.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. y Keying, Y. E. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación, México.
- Yang, B. M., Yao, L. X., Li, G. L., Zhou, C. M., He, Z. H. y Tu, S. H. (2013). Absorption, accumulation and distribution of mineral elements in plantain banana. *Plant Nutr. Fertilizer Sci.*, 19, 1471-1476.
- Zapata, R. D. y Osorio, W. (2010) La materia orgánica del suelo. En Burbano, H. y Silva, F. (eds.) *Ciencia del suelo: principios básicos*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS).