

**Análisis de la calidad de suelos en sistemas productivos agrícolas del municipio de
Barranca de Upía-Meta**

Camilo Andrés Pulido Tenza

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental y Químico Ambiental

**Director
Paolo Andrés Ospina Henao
Físico**

**Codirector
Saul Martínez Molina
Magister en Ingeniería Ambiental**

**Codirector
Angélica María Candela Soto
Doctora en ciencias**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga
División de Ingenierías y Arquitectura
Ingeniería Ambiental y Química Ambiental**

2023

Agradecimientos

Agradecerle a mi mamá y mi papá por su apoyo incondicional en cada uno de mis proyectos de vida, por motivarme a seguir adelante a pesar de las dificultades en estos años de estudio, por enseñarme que parte del proceso no es solo llegar a la meta, sino también aprender a disfrutar del camino para lograrlo.

A mis directores Paolo Ospina, Angélica Candela y Saul Martínez por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto y guiarme en el desarrollo del mismo.

Por último, darle las gracias a mis compañeros de Tunja y Bucaramanga con los que tuve la oportunidad de compartir y disfrutar durante esta etapa de mi vida.

Contenido

Introducción	11
1 Análisis de la calidad de suelos en sistemas productivos agrícolas del municipio de Barranca de Upía-Meta	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.2 Justificación.....	16
2 Objetivos.....	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 Marco referencial.....	18
3.1 Antecedentes	18
3.2 Marco teórico	22
3.2.1 Calidad del suelo	22
3.2.2 Agricultura ecológica	23
3.2.3 Servicios ecosistémicos	24
3.2.4 Capacidad de uso del suelo.....	24
3.2.5 Vocación de uso del suelo	25
3.2.6 Análisis de suelo	25
3.2.7 Conflicto de uso del suelo	25
3.3 Marco conceptual	26
3.4 Marco legal.....	28
4 Metodología.....	30
4.1 Área de estudio.....	30

4.2	Muestreo de suelos	32
4.3	Caracterización y evaluación de la calidad del suelo.	33
4.4	Formulación de hoja de ruta y estrategias agrosostenibles	35
5	Resultados.....	36
5.1	Caracterización física y química	36
5.1.1	Textura.....	37
5.1.2	Acidez activa (pH).....	37
5.1.3	Acidez, aluminio e hidrógeno intercambiable	39
5.1.4	Carbono orgánico	42
5.1.5	Capacidad de intercambio catiónico.....	44
5.1.6	Boro disponible	47
5.1.7	Azufre disponible	47
5.1.8	Bases cambiables.....	48
5.1.9	Micronutrientes disponibles en suelos.....	49
5.1.10	Fósforo y nitrógeno	50
5.2	Hoja de ruta y estrategias agrosostenibles.....	52
5.2.1	Rotación de cultivos	52
5.2.2	Biofertilizantes y abonos orgánicos.....	53
5.2.3	Residuos de cosecha o enmiendas orgánicas.....	55
5.2.4	Labranza de conservación	55
5.2.5	Uso eficiente del agua.....	56
6	Conclusiones.....	57
7	Recomendaciones	58

Referencias..... 60

Apéndices..... 71

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Descripción de los puntos de muestreo.</i>	32
Tabla 2. <i>Métodos fisicoquímicos desarrollados en laboratorio.</i>	34
Tabla 3. <i>Valores promedio de las características físicas y químicas de cada agroecosistema.</i> .	36

Lista de figuras

Figura 1. Localización geográfica del municipio de Barranca de Upía.	31
Figura 2. Valores de pH por punto de muestreo, finca Los 3 Romiles.	38
Figura 3. Valores de pH por punto de muestreo, finca Los Yopos	38
Figura 4. Aluminio intercambiable en la finca los Yopos.	40
Figura 5. Acidez intercambiable finca Los 3 Romiles	41
Figura 6. Acidez intercambiable Los Yopos.....	42
Figura 7. Hidrogeno intercambiable finca Los Yopos.....	42
Figura 8. Valores de carbono orgánico por punto de muestreo, finca Los 3 Romiles.	43
Figura 9. Valores de carbono orgánico por punto de muestreo, finca Los Yopos.	44
Figura 10. Valores de CIC por punto de muestreo, finca Los 3 Romiles.	45
Figura 11. Valores de CIC por punto de muestreo, finca Los Yopos	45
Figura 12. Relación del pH sobre la CIC	46
Figura 13. Comparación de bases cambiables en cada finca.....	48
Figura 14. Comparación de micronutrientes en cada finca.	50
Figura 15. Relación entre pH y fósforo disponible.	51
Figura 16. Portada hoja de ruta calidad del suelo y estrategias agrosostenibles.....	57

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Programa uso eficiente y ahorro del agua sector agrícola.</i>	71
Apéndice B. <i>Programa rotación de cultivos y semillas nativas.</i>	72
Apéndice C. <i>Programa cultivos orgánicos.</i>	73

Resumen

Los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en agroecosistemas del municipio de Barranca de Upía-Meta está asociado a inadecuadas prácticas agrícolas, falta de asistencia técnica y desconocimiento del estado de la calidad del suelo. Por lo tanto, el proyecto consistió en evaluar la calidad del suelo en cuanto a macro y micronutrientes, así como los factores que intervienen sobre su disponibilidad. Los suelos presentaron características desde fuertemente ácidos hasta neutros, con textura franco arcillo arenoso, carbono orgánico moderadamente bajo <9% y una moderada retención y almacenamiento de cationes como sodio, potasio, calcio y magnesio. Finalmente se formularon una serie de estrategias agrosostenibles con el fin de fomentar sistemas productivos más sustentables en la zona de estudio.

Palabras Clave: agroecosistema, prácticas agrícolas, nutrientes, calidad del suelo.

Abstract

The changes in the physical, chemical and biological properties of the soil in agroecosystems of the municipality of Barranca de Upía-Meta is associated with inadequate agricultural practices, lack of technical assistance and ignorance of the state of soil quality. Therefore, the project consisted of evaluating the quality of the soil in terms of macro and micronutrients, as well as the factors that intervene in their availability. The soils presented characteristics from strongly acid to neutral, with a sandy clay loam texture, moderately low organic carbon <9%, and moderate retention and storage of cations such as sodium, potassium, calcium, and magnesium. Finally, a series of agro-sustainable strategies were formulated in order to promote more sustainable production systems in the study area.

Keywords: agricultural system, agricultural practices, nutrients, soil quality.

Introducción

El suelo proporciona diversos servicios ecosistémicos (SE) entre los que se encuentran los de: a). regulación, b). provisión, c). servicios de soporte y d). servicios culturales. Los cuales se pueden evidenciar en el almacenamiento, suministro y calidad del agua tanto en fuentes superficiales como subterráneas, regulación del clima y captura de carbono; suministro de alimentos y fuente de materias primas; los ciclos biogeoquímicos y reserva de biodiversidad; depósito del patrimonio geológico y arqueológico (Burbano-Orjuela, 2016). La degradación de los suelos generada por las malas prácticas agrícolas como el uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas, el impacto de la ganadería extensiva, así como la variabilidad climática ocasiona una disminución en la calidad y competencia para cumplir con sus funciones y servicios ecosistémicos (Mora Marín et al., 2017; Contreras-Santos et al., 2020).

Una de las problemáticas de los suelos colombianos es el deterioro en su calidad, así como en la prestación de los SE. Para el año 2015 se estimó que el 40% de los suelos del país, equivalente a 45.379.057 ha, tenían algún grado de erosión, generadas principalmente por la presión de los usos del suelo por sobreutilización, deforestación, incendios de la cobertura vegetal, condiciones climáticas y expansión de zonas urbanas en áreas para agricultura y de conservación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2015). En cuanto al departamento del Meta y al municipio Barranca de Upía, informes evidencian un bajo nivel de productividad y rendimiento para el sector agropecuario debido al conflicto por el uso del suelo con un índice de subutilización de este recurso de 35% y de sobreutilización del 9%, generado por inadecuadas y/o falta de prácticas que estimulen el aprovechamiento sostenible de este; de igual manera, en el departamento se presenta bajo desarrollo tecnológico en el sector agropecuario, por falta de asistencia técnica dirigida al pequeño

y mediano productor, que según cifras del Censo Nacional Agropecuario (CNA) en esta región solo el 16% de las unidades productivas agropecuarias recibieron algún tipo de asistencia técnica (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] & Agencia de Desarrollo Rural, 2019). Tan solo 28.928 hectáreas de las 370.799 hectáreas que conforman la cuenca del río Upía cuentan con análisis de suelos por parte del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2016).

Por lo anterior, el presente proyecto busca ayudar en la caracterización de los suelos productivos del municipio de Barranca de Upía en las fincas Los 3 Romiles y Los Yopos elegido como área de interés para este estudio, debido a que pertenecen a la Asociación Campesina de Emprendedores Rurales del Meta y permite impulsar el trabajo comunitario que vienen desarrollando. De esta manera se pretende desarrollar una herramienta que les permita tomar de decisiones para aumentar la productividad y establecer el tipo de cultivo más apropiado tanto para el suelo como para el bolsillo de los campesinos, a su vez proponer estrategias que permitan prevenir y mitigar los efectos negativos ocasionados por las actividades antropogénicas sobre el suelo y generar una gestión adecuada a través de prácticas agrícolas sostenibles (MADS, 2018).

Además, la identificación de la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos en sistemas productivos agrícolas (SPA) específicamente en el municipio de Upía en el departamento del Meta, va a contribuir en el desarrollo sostenible de la región, al basar su producción bajo principios de agricultura sostenible, generar valor agregado y diversificar la economía de la comunidad; adicionalmente este proyecto esta alineado con la agenda 2030 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente con el Objetivo 2 Hambre Cero, en lo relacionado con la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos en la aplicación de prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción; con el Objetivo 12 Producción y Consumo

Responsable y Objetivo 15 Vida de Ecosistemas Terrestres, siendo abordados de una manera transversal (Naciones Unidas, 2018).

El presente trabajo formó parte del proyecto de investigación “Evaluación de la calidad de suelos y sus servicios ecosistémicos en sistemas productivos agrícolas en el Municipio de Barranca de Upía- Meta (Colombia)”, en el marco del FODEIN-Multicampus USTA Villavicencio y USTA Bucaramanga.

1 Análisis de la calidad de suelos en sistemas productivos agrícolas del municipio de Barranca de Upía-Meta

1.1 Planteamiento del problema

Existe una serie de amenazas como el desbalance de nutrientes, la pérdida de carbono orgánico, la pérdida de biodiversidad, acidificación, salinización, erosión, compactación y contaminación del suelo que dificultan el funcionamiento de este recurso natural, y asociado al cambio climático el cual incrementa dichas alteraciones en el suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2016). En Colombia el origen de estas amenazas se puede encontrar en la demanda de bienes y servicios de los suelos, desconocimiento de las tareas e importancia de la tierra, mala planeación y ordenamiento del territorio, falta de procesos de monitoreo a la calidad del suelo, carencia de herramientas de gestión sostenible del suelo (Corporación Autónoma de Cundinamarca [CAR], 2018).

En el año 2018 se definió que alrededor de 38 millones de hectáreas podían ser aptas para desarrollar actividades agropecuarias en Colombia (MinAgricultura & Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2018), no obstante, solo 5,3 millones de estas hectáreas están siendo cultivadas (Rico Muñoz, 2022), lo anterior radica en la falta de acompañamiento técnico, incremento de los insumos agrícolas, la variabilidad climática y las malas prácticas agrícolas como la siembra de áreas extensas de monocultivos, que como consecuencia incrementa el precio de los alimentos y perjudica la seguridad alimentaria.

El suelo como soporte y fuente de nutrientes para el crecimiento de las plantas y hábitat para la fauna se ve afectado por contaminantes como los metales pesados, que pueden llegar al

ambiente por vía natural y/o antropogénica, lo cual han generado especial atención para el seguimiento y el control (Taghavi et al., 2023). Las tierras de cultivo con concentraciones de metales pesados lo suficientemente altas pueden afectar la calidad de los alimentos y comprometer la salud humana; sin embargo, su toxicidad depende del tipo de metal, de la concentración y de la edad de la población expuesta (Reyes et al., 2016). Finalmente, la presencia de estas sustancias dificulta la comercialización de los productos agrícolas, especialmente en mercados internacionales donde cuentan con una legislación más estricta en temas de inocuidad.

El desconocimiento sobre el estado de la calidad del suelo y de técnicas de manejo sostenibles en la agricultura por parte de los campesinos del Barranca de Upía, disminuye la capacidad productiva del suelo, pone en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria y desvaloriza la actividad agraria al no ser competitiva en el mercado local y nacional.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación busca conocer el estado en el que se encuentra el suelo principalmente en cuanto a macro y micronutrientes, enfocado en mejorar la producción de plátano Hartón y en encontrar alternativas de cultivos que puedan ser sembrados y rotar con las características que presenta el suelo y las correcciones que se requieran hacer para impulsar el campo en esta región del país.

La carencia de investigaciones sobre las condiciones del suelo genera una brecha importante a la hora de tomar decisiones para la conservar y manejo sostenible del mismo, por lo cual surge la pregunta ¿En qué condiciones se encuentra el suelo de los agroecosistemas de barranca de Upía y que estrategias sostenibles pueden mejora la calidad edáfica?

1.2 Justificación

Actualmente la agricultura ha retornado a la agenda mundial gracias al surgimiento de diversos acontecimientos mundiales como innovaciones tecnológicas, restricciones ambientales y el incremento en el precio de productos agrícolas, dándole a este sector un rol de reconocimiento en el desarrollo socioeconómico, ambiental, sostenible, cadenas de valor y de seguridad alimentaria, todo esto enmarcado claramente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Además, la agricultura se considera un factor importante en una serie de sistemas interconectados, como los del suelo, el agua y el energético (Perfetti et al., 2013).

Históricamente en Colombia el sector agropecuario ha jugado un papel muy importante en el desarrollo del país, contribuyendo al crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) aproximadamente del 6% en los últimos 10 años. Sin embargo, en las últimas décadas se ha visto un atraso en el sector productivo por las dificultades en materia de productividad agrícola, entre otros factores, han afectado negativamente el desempeño en el campo. Según las estadísticas oficiales la agricultura colombiana está muy lejos de retornar a sus participaciones de los años 70, cercanas al 20% del PIB (Ministerio de Agricultura y desarrollo rural, 2019).

De acuerdo a lo mencionado, el agro en Colombia ha vivido diferentes problemáticas de índole social, económica y ambiental, así como la falta de asistencia técnica y la inadecuada gestión de los recursos naturales (Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina y el Caribe [CODS], 2021); de ahí la importancia de conocer las condiciones en las que se encuentra el suelo, que permite tomar decisiones que mitiguen los procesos de degradación edáfica, y sean más eficientes al momento de formular estrategias de conservación y producción de alimentos y de materias primas, generando avances económicos tanto a productores como a consumidores de la región. Reemplazar las prácticas tradicionales y transicionar hacia una

agricultura sustentable permite no solo aumentar la productividad del suelo, si no que aborda de manera holística la conservación de biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, así como los problemas asociados al cambio climático y desafíos sociales (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2022).

Este proyecto pretende solucionar el vacío técnico que se tiene por el desconocimiento de las características del suelo, asimismo proponer recomendación de manejo sostenibles para prevenir y mitigar los impactos ambientales generados por el sector agrícolas en las fincas Los 3 Romiles y Los Yopos, beneficiando directamente a los campesinos que conforman la asociación, quienes hacen el aprovechamiento de los recursos de estas áreas. Para ello se realizó el diagnóstico de la calidad del suelo en sistemas agrícolas mediante el análisis de nutrientes y los factores que afectan su disponibilidad como el pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Cabe resaltar que el estudio se desarrolla en un municipio donde los planes de ordenamiento territorial no se encuentran actualizados, la poca investigación, falta de proyectos y asistencia técnica dificulta la toma de decisiones por parte de agricultores de la zona para llevar a cabo sus actividades económicas de manera sostenible. Igualmente, este estudio aporta las bases para promover el desarrollo de otros proyectos a mediano y largo plazo, que permitan acercar a la academia con los productores agrícolas del municipio de Barranca de Upía, con ello dinamizar el área rural para alcanzar una mayor inclusión y bienestar de los pequeños productores, incrementar la eficiencia, acceder a mercados diferenciados, fomentar el desarrollo comunitario y la adaptación al cambio climático (FAO, 2021).

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la calidad de suelos en sistemas productivos agrícolas (SPA) del Municipio de Barranca de Upía-Meta, con el fin de proponer estrategias de gestión sostenible del suelo.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico integral cuantitativo y cualitativo de los suelos, mediante análisis físicos y químicos de muestras de suelo.
- Definir una hoja de ruta para el manejo sostenible del suelo y del agroecosistema que permita evaluar el estado actual o reciente del suelo en términos de su calidad.

3 Marco referencial

3.1 Antecedentes

Con el fin de evidenciar el impacto de los agroquímicos y las prácticas agrícolas sobre las características fisicoquímicas del suelo, y su interacción con los servicios ecosistémicos, se han llevado a cabo diversos análisis de la capacidad edáfica para realizar sus funciones, a través de diversos indicadores del suelo. Autores como Afanador-Barajas et al. (2020), concluyeron que variables como densidad aparente, el índice de estabilidad, el pH, la actividad deshidrogenasa, el recuento de heterótrofos y las bacterias solubilizadoras de fosfato, son relevantes al momento de determinar la calidad edáfica en agroecosistemas. Mientras que Castillo-Valdez et al. (2021) utilizaron variables como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, hierro, densidad

de agregados y densidad de lombrices, como indicadores de calidad en parcelas de Puebla, México. Los indicadores de calidad pueden variar dependiendo de la funcionalidad, tipo y uso de suelo, así como la disponibilidad para su análisis; por este motivo los parámetros de calidad cambian por su sensibilidad, propósito y contexto particular de cada región.

La microfauna es parte esencial en el funcionamiento del suelo, por eso se considera un indicador de las propiedades del suelo, Bautista et al. (2018) valoraron el efecto de arreglos agroforestales de abarco, caucho, paricá y huito en la Amazonia Colombiana sobre la densidad y la diversidad de la comunidad de macroinvertebrados, obtenido que los taxones coleópteros presentaron una asociación positiva a nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg) y fósforo (P) y con menor acidez, pero negativa a contenidos de aluminio (Al); taxones Araneae, Hymenoptera, Hemiptera e Isoptera se asociaron positivamente con abundante contenido de potasio (K).

El diagnóstico de los atributos químicos y microbiológicos del suelo en sistemas agrícolas proporciona una herramienta de gestión para tomar decisiones sobre las prácticas agroecológicas que mejor se adapten a las necesidades edáficas, tal es el caso de la Zona de Reserva Campesina de San Isidro, en Valle del Cauca, donde se identificó que corregir el estado del pH e incorporar materia orgánica benefician las condiciones relacionadas como aireación, humedad y erosión del suelo, para ello las enmiendas orgánicas, labranza de conservación y el mínimo uso de pesticidas ayudaron en la calidad del suelo de la zona (Montenegro-Gómez et al., 2022).

Las limitaciones que puede presentar un suelo y su afectación en cultivos fueron evaluadas por Contreras-Santos et al. (2020), en sistemas productivos de maíz, algodón y arroz encontrando que la abundancia de Mg ocasiona limitantes para la absorción de otros elementos fundamentales para la planta, como son el Ca y K. El desarrollo de raíces se vio disminuida por el tipo de la densidad aparente $>1,4 \text{ g/cm}^3$; la porosidad total $<50\%$ se asocia a procesos de compactación y

poca o nula infiltración. Por lo cual los investigadores recomendaron poner en marcha prácticas de conservación de suelo, encaminadas en mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Por su parte Moreno-Conn et al. (2022) estimaron el impacto del uso y manejo del suelo en un periodo de tiempo entre 2011 a 2015, en cinco sistemas de producción: 1) Rotación de cultivos anuales-caña de azúcar, 2) Rotación anual de cultivos-maíz-soja, 3) Monocultivo de caña de azúcar, 4) Caucho en asociación con *Desmodium ovalifolium* y 5) Pasto *Brachiaria decumbens* seguido de Rotación anual de cultivos, y se compararon con los valores iniciales de la sabana nativa como punto de referencia para determinar el efecto del cambio de manejo del suelo. Se evidenció que la fertilidad aumento mucho más en el sistema cinco en comparación con los otros sistemas, el cambio en la fertilidad del suelo fue efecto de acondicionar el suelo con dosis de cal dolomítica e incorporar tres métodos de labranza, aumentando la concentración de Ca, Mg, pH y disminuyendo Al en el suelo; también el sistema cinco tuvo una alta biodiversidad de macroinvertebrados edáficos.

La relación entre la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos que puede proporcionar un sistema agrícola se ve afectada por el uso de agroquímicos, los monocultivos, los cambios en el uso del suelo y las dinámicas del cambio climático; es por lo que Bedoya-Gómez et al. (2021) realizo la valoración ecológica de los servicios ecosistémicos de regulación prestados por el suelo en fincas cafeteras de la Cuchilla de San Juan, municipio de Belén de Umbría, en el departamento del Risaralda, Colombia; donde evidencio que el bajo contenido de materia orgánica afecta los servicios asociados a la resistencia a la erosión, disponibilidad de nutrientes y sumidero de dióxido de carbono (CO₂); la textura arcillosa del suelo permitió una valoración media con respecto a servicios de disponibilidad y retención de agua; de igual forma concluyeron la importancia de

planificar acciones encaminadas en aumentar la prestación de servicios ecosistémicos de las fincas cafeteras.

Por lo que se refiere al municipio de Barranca de Upía el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2016) señala que casi el 60 % de los suelos alrededor del río Upía está siendo mal utilizado, al desarrollar actividades ajenas a su verdadera vocación y el 21% del recurso está sobreutilizado por la agricultura desmedida y ganadería intensiva que tarde o temprano va a conllevar la disminución su cobertura vegetal y su potencial agrícola.

Las pocas investigaciones que se han desarrollado en la zona han sido llevadas a cabo por la universidad Santo Tomás seccional Villavicencio, con proyectos como “Evaluación del potencial ecoturístico de la quebrada Guaicaramo de la vereda El Encanto, municipio de Barranca de Upía, a partir de la valoración integral de sus servicios ecosistémicos” en el año 2020. El cual también permitió volcar los esfuerzos en nuevos campos de estudio, entre ellos, el estudio del potencial de los suelos, con el fin de maximizar y proteger los suelos del sector y que impulsaron el desarrollo del proyecto FODEIN que actualmente se está desarrollando en la vereda Las Moras en la finca Los 3 Romiles y Los Yopos.

Los objetivos propuestos por la unidad de investigación en marco del proyecto FODEIN fueron:

Objetivo General

Evaluar la calidad de suelos y sus servicios ecosistémicos en sistemas productivos agrícolas (SPA) del Municipio de Barranca de Upía-Meta.

Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico del estado general de la calidad del suelo.
- Valorar los servicios ecosistémicos del suelo asociados a los cultivos objeto de estudio.
- Proponer recomendaciones de manejo sostenibles del suelo y sus servicios ecosistémicos

Como parte del proyecto FODEIN se tiene un primer acercamiento al contexto de las fincas los 3 Romiles y Los Yopos del municipio de Barranca de Upía, donde Buitrago Álvarez & Cote Mendoza (2022), evaluaron la calidad y los servicios ecosistémicos en estos agroecosistemas; utilizando principalmente indicadores físicos y mediante un conjunto mínimo de datos conformado por 9 variables, índice de estabilidad, estabilidad de agregados, densidad aparente, diámetro geométrico medio, porosidad, resistencia a la penetración, conductividad eléctrica, pH y catalasas, se desarrolló un Índice de calidad del suelo; evidenciando una mayor calidad edáfica en la finca 3 Romiles, aun cuando cuenta con una mejor calidad, las practicas actuales no son lo suficientemente sostenibles, lo cual paulatinamente ira degradando el suelo. En lo que respecta a los SE presentaron casi la misma puntuación en las dos fincas, la regulación del clima, regulación de gases, asimilación de residuos, mantenimiento de la diversidad biológica, Control biológico y protección contra el riesgo de erosión su valoración fue baja; entretanto la producción de alimento y materia prima su valoración fue media en ambas; en cuanto al abasteciendo de agua la valoración para la finca los 3 Romiles fue baja y para los Yopos fue media, esta diferencia se debe a una mayor eficiencia en los sistemas de irrigación.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Calidad del suelo

El termino de calidad o salud del suelo se viene utilizando como una forma de medir y monitorear su estado y como una herramienta para la toma de decisiones referentes a su preservación, restauración y uso sostenible (MADS, 2016).

De igual forma el concepto se asocia a la capacidad especifica que tiene para: promover la productividad sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; amortiguar los contaminantes ambientales y patógenos; mantener la calidad del medio ambiente y promover la salud vegetal, animal y humana; disponibilidad de los servicios ecosistémicos asociados al suelo. Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo, estas variables se conocen como indicadores, los cuales pueden ser físicos, químicos y biológicos, que representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (MADS, 2016; MADS 2018).

3.2.2 Agricultura ecológica

La necesidad de satisfacer la necesidad de alimento a una población mundial que cada día va en aumento obliga a replantear la forma en que se está desarrollando la agricultura, buscando alternativas sustentables de ahí nace la urgencia de hablar de agroecología o agricultura sostenible.

Es una técnica de producción agrícola donde se mejora la biodiversidad y conduce a una menor degradación ambiental, se reduce el uso de insumos agrícolas de origen petroquímicos y sintético, reduce el gasto de energía y promueve prácticas que garantizan la inocuidad en toda la cadena productiva de alimentos. Para impulsar la agricultura ecológica y que ofrezca soluciones concretas para la crisis rural se requiere de una serie de condiciones tales como: el uso de tecnologías agropecuarias sustentables; la puesta en marcha de experiencias por parte de grupos y

organizaciones locales, el apoyo de instituciones externas y políticas agrícolas favorables (Guzmán Casado, G., & Morales Hernández, J., 2011).

3.2.3 Servicios ecosistémicos

Son aquellos procesos y funciones de los ecosistemas que son percibidos por el humano como un beneficio (de tipo ecológico, cultural o económico) directo o indirecto. Incluyen aquellos de aprovisionamiento, como comida y agua; servicios de regulación, como la regulación de las inundaciones, sequías, degradación del terreno y, enfermedades; servicios de sustento como la formación del sustrato y el reciclaje de los nutrientes; y servicios culturales, ya sean recreacionales, espirituales, religiosos u otros beneficios no materiales (MADS, 2018).

3.2.4 Capacidad de uso del suelo

Esta se define como “el potencial que tiene la tierra para ser utilizada bajo cierto tipo general de uso con prácticas específicas de manejo”, la clasificación de las tierras por su capacidad se da en 8 clases agroecológicas según el IGAC (2014). La agrupación se da inicialmente para un potencial máximo de aprovechamiento y a partir de ese potencial podrían ser utilizadas en usos diferentes al definido inicialmente, pero con condiciones de no crear conflictos de uso del suelo por subutilización.

Las clases se reúnen en tres grandes grupos, de la clase 1 a la 4 con capacidad para ser utilizadas en agricultura y ganadería tecnificada de tipo intensivo y semi intensivo; de la clase 5 a la clase 7 tierras que pueden ser utilizadas en forma restringida, en actividades agrícolas, ganaderas, agroforestales y/o forestales; por último, la clase 8 son tierras que deben ser utilizadas sólo en preservación, conservación y ecoturismo (IGAC, 2014).

3.2.5 Vocación de uso del suelo

La vocación de uso del suelo determinar el uso más apropiado de los suelos, relacionada a la clase mayor que una unidad de tierra está en capacidad natural de soportar con características de sostenibilidad, según sus condiciones biofísicas, ofreciendo mayores ventajas desde el punto de vista de desarrollo sostenible. Se subdivide en cinco clases: agrícola, ganadera, agroforestal, forestal y de conservación del suelo; la vocación principal de los suelos del país es forestal y en segundo lugar es la vocación agrícola (IGAC, 2012).

3.2.6 Análisis de suelo

Antes de tomar cualquier decisión sobre la intervención y siembra de un cultivo en determinada zona es muy importante conocer las principales propiedades físicas, químicas y biológicas que en conjunto aportan información sobre el estado nutricional y potencial del suelo. El éxito de un análisis de suelos depende en gran medida de la representatividad de las muestras tomadas. El conocimiento de las condiciones del suelo facilita elegir el cultivo que se puede sembrar y la programación de las prácticas agrícolas más apropiadas, así se garantiza las inversiones económicas y la obtención de buenas cosechas y ganancias (Blanco, J. O., 2002).

3.2.7 Conflicto de uso del suelo

El campo colombiano ha presentado dificultades en materia de productividad, generación de procesos de degradación de las tierras y en consecuencia la disminución de la sostenibilidad y competitividad de los sistemas productivos, debido a que en que gran parte del territorio se realiza actividades agrícolas sin considerar las características específicas de los suelos, el relieve, el clima, las características ambientales, sociales y económicas particulares de cada región del país, lo cual

resulta en incompatibilidad entre la forma como se utilizan las tierras y su aptitud de uso, generando conflictos entre los usos de las tierras (UPRA, 2013).

3.3 Marco conceptual

Suelo: Es un sistema complejo y dinámico que cumple diversas funciones y servicios ecosistémicos vitales para la supervivencia humana. Es el resultado de la transformación del material parental por la influencia de diversos procesos químicos, físicos y biológicos en el transcurso del tiempo (Casas Flores, 2011; MADS, 2013).

Macronutrientes: Son elementos utilizados por las plantas en grandes cantidades, siendo el oxígeno, hidrógeno y carbono extraído del aire y del agua del suelo; se presentan una clasificación en nutrientes principales los cuales son: nitrógeno, fósforo, potasio; nutrientes secundarios: calcio, magnesio y azufre (Casas Flores, 2011).

Micronutrientes: Son elementos esenciales obtenidos del suelo y que en este caso son requeridos en cantidades pequeñas entre los que se destacan hierro, zinc, cobre, manganeso, molibdeno, boro y cloro (Casas Flores, 2011).

Fósforo: La principal fuente de fósforo en el suelo proviene de rocas sedimentarias que por procesos de mineralización se convierte en formas inorgánicas de iones fosfatos como H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} aprovechadas por las plantas para su funcionamiento (Salamanca, 1984).

Nitrógeno: Las fuentes de nitrógeno asimilables por las plantas se encuentran en formas de iones de nitratos (NO_3^-) y de amonio (NH_4^+) que toman de la solución del suelo (Salamanca, 1984).

Materia orgánica (MO): Es el producto de descomposición y síntesis biológica, donde además intervienen cambios de temperatura y humedad. La MO es usada como fuente de alimento

para otros organismos los cuales transforman sustancias orgánicas no utilizadas por las plantas a formas inorgánicas asimilables (Salamanca, 1984).

Intercambio iónico del suelo: Es un proceso dinámico reversible, por el cual aniones y cationes son intercambiados entre fases líquidas y sólidas, gracias a este proceso se toma gran parte de nutrientes por las raíces de las plantas para su desarrollo y producción (Burbano Orjuela & Silva Mojica, 2013).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Proceso reversible por el cual las partículas sólidas coloidales del suelo adsorben cationes de la fase acuosa, y de igual manera hay una desorción de cantidades equivalentes de otros cationes para establecer un equilibrio en ambas fases; los principales cationes del suelo Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , Na^{+2} , Al^{+3} , Fe^{+2} , Mn^{+2} y H^{+} (Burbano Orjuela & Silva Mojica, 2013).

Textura del suelo: Es la proporción relativa de cada una de las fracciones minerales del suelo: arcilla, limo y arena. Arcilla con un tamaño a 0,002 mm, es muy compacta, retiene mucha agua. Limo: con un tamaño entre 0,02 mm y los 0,002 mm. Arena: con un tamaño comprendido entre 0,2 mm y 0,02 mm (Casas Flores, 2011).

Acidez activa (pH): la acidez en el suelo se determina midiendo la concentración de iones H^{+} y OH^{-} se expresa con el parámetro potencial de hidrogeno (pH); por lo tanto, la acidez o basicidad de un suelo depende de la cantidad de H^{+} , cuanto mayor sea la proporción de este ion los valores de pH serán más bajos, más ácido. Mientras que un aumento de grupos OH^{-} el valor de pH aumenta a condiciones básicas (Burbano Orjuela & Silva Mojica, 2013).

Propiedades físicas del suelo: Son indicadores que reflejan la manera en que el suelo almacena, infiltra o mueve el agua; en las plantas determina el crecimiento de las raíces asociado

al arreglo de partículas y poros que conforman el suelo. Las principales características físicas son color, textura, estructura, porosidad y retención del agua (Burbano Orjuela & Silva Mojica, 2013).

Propiedades químicas del suelo: Son indicadores que relacionan la calidad y disponibilidad de nutrientes para las plantas, las cuales son: intercambio iónico, reacción del suelo (acidez, alcalinidad y sodicidad), condiciones de oxidación y reducción, coagulación y peptización de los coloides del suelo (Burbano Orjuela & Silva Mojica, 2013).

Propiedades biológicas del suelo: Son indicadores que estudian las modificaciones de la composición, estructura y funcionamiento del suelo generada por macro, meso y microfauna (Ramírez Carvajal, 1997).

Prácticas agrícolas sostenibles: son aquellas acciones que contribuyen a usar de forma más eficiente los recursos naturales, reduciendo el impacto de la agricultura en el medio ambiente y aumentar la resistencia al cambio y la variabilidad climática (Piñeiro et al., 2021).

3.4 Marco legal

En materia ambiental referente a la protección, calidad y aprovechamiento del suelo, está enmarcado inicialmente por la Constitución Política de 1991 donde se establece el uso, acceso y conservación de los componentes del ambiente, entre ellos el suelo. Disponiendo en el artículo 79 que *“Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo”*. Y en el artículo 80 *“El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución”*. La normatividad establecida por diferentes entidades gubernamentales sobre insumos agrícolas y gestión sostenible de suelo están establecidas a continuación:

Decreto Ley 2811 de 1974: “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”. Donde establece que “El uso de los suelos debe realizarse de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos. Adicionalmente, indica que, se debe determinar su uso potencial y clasificación según los factores físicos, ecológicos y socioeconómicos de cada región”.

Decreto número 1443 de 2004: “Por el cual se reglamenta parcialmente el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 253 de 1996, y la Ley 430 de 1998 en relación con la prevención y control de la contaminación ambiental por el manejo de plaguicidas y desechos o residuos peligrosos provenientes de los mismos, y se toman otras determinaciones” (Ministerio De Ambiente, 2004).

Política nacional para la gestión integral ambiental del suelo (GIAS): “El cual promueve la gestión integral y conservación del suelo en Colombia, componente determinante de los ciclos del agua, del aire y de los nutrientes e indispensable para la preservación de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos” (MADS, 2013).

Decreto 1071 de 2015 “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural” (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

Decreto 1076 de 2015 “Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”. Con relación al artículo 2.2.1.1.18.6. Protección y Conservación de suelos (MADS, 2015).

Política para la gestión sostenible del suelo: el cual busca promover el manejo sostenible del suelo en Colombia, a partir de seis líneas estratégicas: fortalecimiento institucional; educación; fortalecimiento de instrumentos de planificación ambiental y sectorial; monitoreo y seguimiento a

la calidad de los suelos; investigación, innovación y transferencia de tecnología y; preservación, restauración y uso sostenible del suelo (MADS, 2016).

Resolución ICA 30021 de 2017: “Por medio de la cual se establecen los requisitos para la Certificación en Buenas Prácticas Agrícolas en producción primaria de vegetales y otras especies para consumo humano”. Modificado por Resolución No.082394 del 2020 Por medio de la cual se Modifica los artículos 2, 3, 4, 12, y 14 de la Resolución 30021 de 2017 (Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), 2020).

Resolución 261 de 2018: “Por la cual se define la frontera agrícola nacional y se adopta la metodología para la identificación general (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018).

4 Metodología

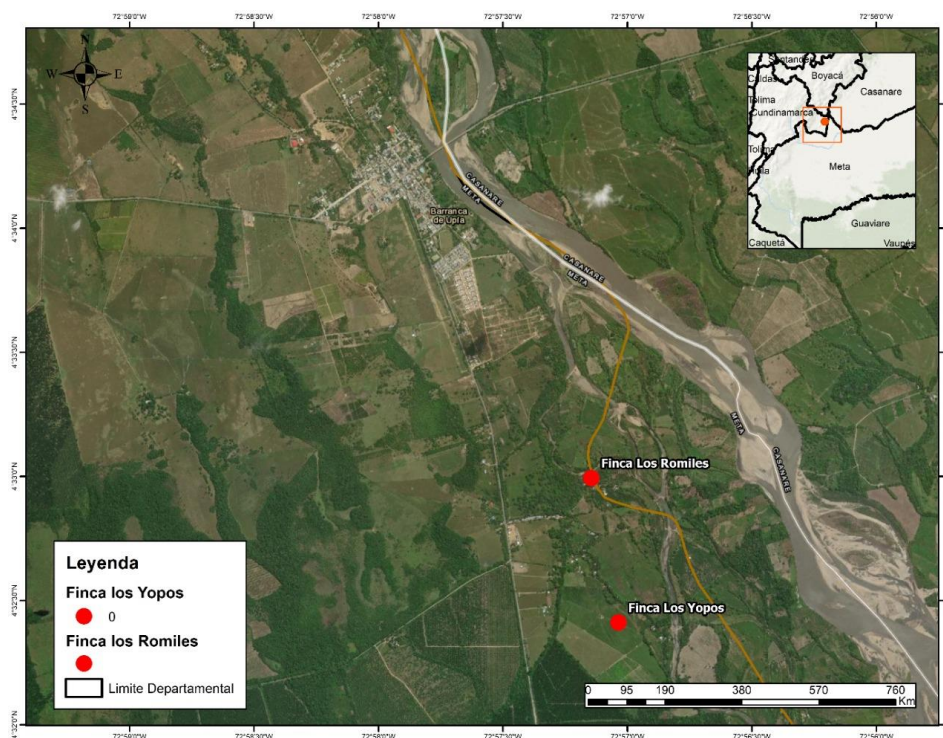
4.1 Área de estudio

El presente proyecto se llevó a cabo en la zona rural del municipio de Barranca de Upía, en la vereda las Moras, ubicado al norte del departamento del Meta a 2 horas de Villavicencio. Este municipio comparte límites con Boyacá, Cundinamarca y Casanare, característica clave para que posea grandes ventajas en materia productiva al tener acceso a cuatro poblaciones distintas, así mismo presenta condiciones favorables de clima, suelos y luminosidad, que le permiten obtener producciones rentables (*Esquema de Ordenamiento Territorial, Barranca de Upia*, 2000).

La zona de estudio (figura 1) correspondiente a dos fincas, Los 3 Romiles y Los Yopos que tienen en conjunto de 29 hectáreas, la distancia entre ambas fincas es de aproximadamente 1 km. Las fincas pertenecen a una asociación de campesinos, su mayor producción se debe al cultivo de

plátano y la comunidad está proyectando a cambiar sus formas de producción a procesos sostenibles y generar valor agregado produciendo harina de plátano orgánico.

Figura 1. Localización geográfica del municipio de Barranca de Upía.



Adaptado de Software ArcGIS, 2023.

En la finca Los 3 Romiles se tomaron seis (6) puntos de muestreo, la Zona A1, A2, B1 y B2 predominan cultivos de plátano hartón y las prácticas de agricultura que llevan a cabo es la labranza de manual y tradicional, uso de cipermetrina un insecticida sintético; las otras dos zonas D1 y D2 se realiza la siembra de algunos árboles de limón y naranja que no cuentan con prácticas agrícolas específicas, más que la adición de algunos residuos vegetales.

Mientras que en la finca Los Yopos se seleccionaron cuatro (4) puntos de muestreo, las zonas A1 y A2 cuentan también cultivo de plátano hartón, donde se realiza labranza tradicional y

aplicación de fertilizantes compuestos y herbicidas Roundup. Por su parte la Zona D1 y D2 no cuenta con algún tipo de cultivos desde hace un año y se utiliza en ocasiones para ganadería.

4.2 Muestreo de suelos

El muestreo se realizó en el mes de junio del 2022 en temporada de lluvia. En la finca los 3 Romiles se tomaron seis (6) puntos de muestreo y para los Yopos cuatro (4), cada punto con su respectivo duplicado para un total de 20 muestras durante todo el estudio. En cada agroecosistema se construyeron cuadrantes (2,5 x 2,5 m) donde se removió la capa vegetal y se tomaron muestras compuestas aleatorias, construidas a partir de 25 submuestras a una profundidad de 0 a 15 cm las cuales se mezclaron para homogeneizar. Finalmente, cada muestra compuesta se guardó en bolsas de plástico sellables debidamente rotuladas (Tabla 1) y conservadas a temperatura ambiente para análisis físicos y químicos en laboratorio.

Tabla 1. Descripción de los puntos de muestreo.

Nº muestra	Nombre	Coordenadas
1	Zona A1 Los 3 Romiles Muestra 1	72° 57' 08.7''W 04° 32' 59.6'' N
2	Zona A1 Los 3 Romiles Muestra 2	72° 57' 08.7''W 04° 32' 59.6'' N
3	Zona A2 Los 3 Romiles Muestra 1	72° 57' 09.1''W 04° 32' 59.7'' N
4	Zona A2 Los 3 Romiles Muestra 2	72° 57' 09.1''W 04° 32' 59.7'' N
5	Zona B1 Los 3 Romiles Muestra 1	72° 57' 02.4''W 04° 33' 03.3'' N
6	Zona B1 Los 3 Romiles Muestra 2	72° 57' 02.4''W 04° 33' 03.3'' N
7	Zona B2 Los 3 Romiles Muestra 1	72° 57' 02.5''W 04° 33' 03.2'' N
8	Zona B2 Los 3 Romiles Muestra 2	72° 57' 02.5''W 04° 33' 03.2'' N

N° muestra	Nombre	Coordenadas
9	Zona D1 Los 3 Romiles Muestra 1	72° 57'06.5'' W 04° 32' 58.2'' N
10	Zona D1 Los 3 Romiles Muestra 2	72° 57'06.5'' W 04° 32' 58.2'' N
11	Zona D2 Los 3 Romiles Muestra 1	72° 57'06.1'' W 04° 32' 58.1'' N
12	Zona D2 Los 3 Romiles Muestra 2	72° 57'06.1'' W 04° 32' 58.1'' N
13	Zona A1 Los Yopos Muestra 1	72° 57'02.17'' W 04° 32' 24.69'' N
14	Zona A1 Los Yopos Muestra 2	72° 57'02.17'' W 04° 32' 24.69'' N
15	Zona A2 Los Yopos Muestra 1	72° 57'02.22'' W 04° 32' 24.71'' N
16	Zona A2 Los Yopos Muestra 2	72° 57'02.22'' W 04° 32' 24.71'' N
17	Zona D1 Los Yopos Muestra 1	72° 57' 19.68" W 04° 32' 32.74" N
18	Zona D1 Los Yopos Muestra 2	72° 57' 19.68" W 04° 32' 32.74" N
19	Zona D2 Los Yopos Muestra 1	72° 57 '19.73"W 04 °32'32.77" N
20	Zona D2 Los Yopos Muestra 2	72° 57 '19.73"W 04 °32'32.77" N

4.3 Caracterización y evaluación de la calidad del suelo.

Los parámetros analizados en laboratorio de investigaciones ambientales de la Universidad Santo Tomás seccional Bucaramanga fueron textura, acidez intercambiable, carbono orgánico, pH, capacidad de intercambio catiónico, boro, azufre y fósforo disponible; mientras que bases cambiables y micronutrientes fueron analizados por laboratorio externo acreditado SIAMA SAS en la tabla 2 se presenta con mayor detalle el método y técnica que se utilizó para cada parámetro.

Tabla 2. *Métodos fisicoquímicos desarrollados en laboratorio.*

Parámetro	Método	Técnica
Textura	NTC 6299-2018	Bouyoucos
Acidez, aluminio e hidrogeno intercambiable	NTC 5263-2017	Volumétrico
Carbono orgánico	Schulte, E.E. and Hopkins, B.G. (1996)	Pérdida por ignición
pH o acidez activa	NTC 5264-2018	Potenciometría
Capacidad de intercambio catiónico	NTC 5268-2014	Volumétrico
Bases cambiables (Calcio y Magnesio) *	Métodos analíticos de laboratorio de suelos, IGAC. 6ª edición, 2006.	Espectrofotometría de absorción atómica
Bases cambiables (Sodio y Potasio) *	NTC 5349-2016	Espectrofotometría de absorción atómica
Micronutrientes (Cobre, Zinc, Hierro, Manganese) *	EPA 3050 B, SM 3111 B	Espectrofotometría de absorción atómica
Determinación de boro	NTC 5404:2011	Colorimétrico
Azufre disponible.	NTC 5402:2006	Turbidimetría
Fósforo disponible	NTC 5350:2020 Bray II	Colorimétrico

Nota: *parámetros realizados por laboratorio externo.

En vista de que en el proyecto general se desprender otros trabajos de grado, donde también se analizaron algunos parámetros físicos, químicos y biológicos, el alcance de esta investigación y finalidad de la auxiliatura y aporte al proyecto FODEIN va relacionado a fortalecer, entender y caracterizar los nutrientes que están disponibles en el suelo de los dos agroecosistemas.

Con respecto al análisis de calidad, inicialmente se evaluó la disponibilidad de nutrientes de manera individual considerando los factores que intervienen sobre estos como son los factores formadores del suelo, parámetros como pH, materia orgánica, tipo de textura y capacidad de

intercambio catiónico, apoyándose en literatura para corroborar y relacionar la concentración de los nutrientes analizados con el contexto de la zona. La calidad se valoró en función del cultivo de plátano el cual predominó en el momento del muestreo, para esto se tuvo en cuenta el libro “El cultivo de plano en el trópico” de Belalcázar Carvajal (1991) donde se describen las características ecofisiológicas que deben tener los cultivos de plátano para un desarrollo adecuado.

4.4 Formulación de hoja de ruta y estrategias agrosostenibles

Teniendo en cuenta la caracterización físicos y químicos, así como la valoración de los servicios ecosistémicos que se llevó en conjunto con el proyecto FODEIN, se propusieron una serie de estrategias para el manejo sostenible del suelo y de producción de los agroecosistemas, que fueron formuladas por su enfoque sostenible e impacto positivo que estas tienen sobre los recursos naturales, y que de igual forma fueran económicamente viables para su ejecución por parte de los agricultores. Para esto se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos, revistas científicas, páginas web especializadas en temas agrícolas, investigaciones académicas de organizaciones e instituciones públicas y privadas donde se resaltó el beneficio de la aplicación de dichas prácticas sostenibles sobre la calidad del suelo y la producción agrícola.

Con lo anterior, se elaboró la hoja de ruta para el manejo sostenible del suelo, donde se incluyen conceptos relacionados a la calidad del suelo, caracterización cualitativa de la disponibilidad de nutrientes y las practicas agrosostenibles; así mismo como parte de la hoja de ruta se elaboraron unos programas ambientales siguiendo la “Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales” propuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la

Agricultura en el año 2018, allí se describen aspectos generales que deben tener los programas de intervención para la gestión sostenible del suelo.

5 Resultados

5.1 Caracterización física y química

Los resultados obtenidos de los análisis químicos y físico en laboratorio de cada uno de los agroecosistemas se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Valores promedio de las características físicas y químicas de cada agroecosistema.

Análisis	Unidades	Agroecosistema	
		Los 3 Romiles	Yopos
Textura		Franco arcillo arenoso	Franco arenoso
pH		6,59±0,37	4,55±0,42
CIC	cmol(+)/kg	15,40±1,02	13,48±2,63
Sodio	cmol(+)/kg	0,577±0,324	0,903±0,072
Potasio	cmol(+)/kg	0,174±0,007	0,319±0,133
Calcio	meq/100g	1,643±0,031	0,955±0,365
Magnesio	meq/100g	0,4±0,04	0,26±0,07
Cobre	mg/kg	<20	<20
Zinc	mg/kg	67,773±3,757	31,065±17,905
Hierro	mg/kg	26060±5126,6	7708±5818
Manganeso	mg/kg	235,98±2,73	123,4±99,3
Boro	mg/kg	0,0162±0,0012	0,0171±0,0022
Azufre	mg/kg	0,041±0,007	0,069±0,009
Carbono Orgánico	%	4,428±0,636	6,915±1,612
Acidez Intercambiable	cmol(+)/kg	0,149±0,046	0,631±0,482
Aluminio Intercambiable	cmol(+)/kg	No se detecto	0,588 ±0,136
Fósforo	mg/kg	12,65±3,74	2,29±1,14

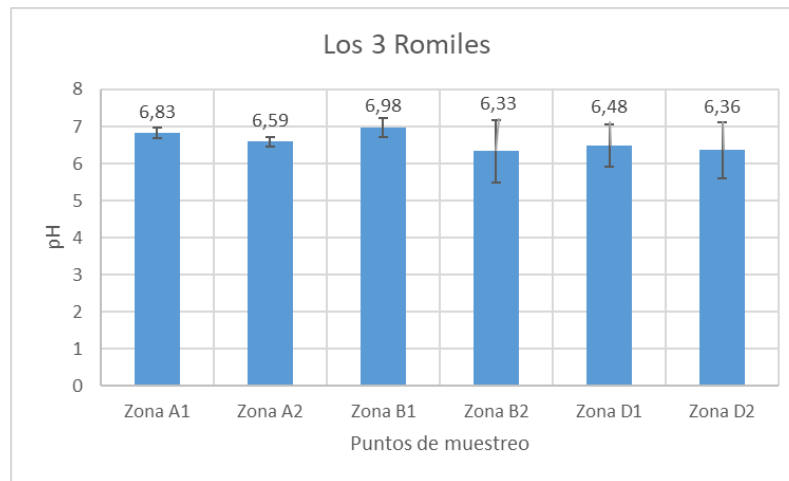
5.1.1 Textura

La finca Los 3 Romiles presenta una clasificación textural entre franco arenoso y franco arcillo arenoso; mientras que la finca Los Yopos tuvo una clasificación textural entre franco arenoso y franco arcillo arenoso. Los suelos francos contienen varias subclasificaciones las cuales difieren de la composición de arena, limo y arcilla; desde el punto agrícola son fácilmente laborables para el cultivo de plátano (Belalcázar Carvajar, 1991).

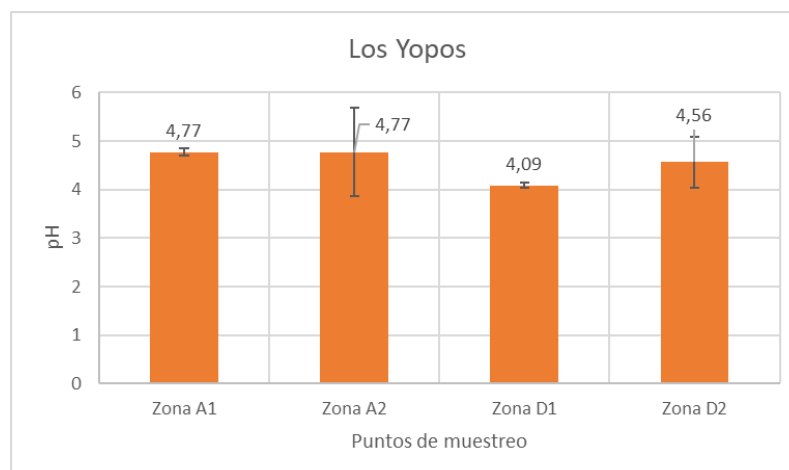
El porcentaje de arcilla que corresponde a una parte de la fracción coloidal en el suelo no supera el 35% en los sistemas productivos, lo cual reduce la capacidad de retener iones y moderada disponibilidad de nutrientes, pero predominan los óxidos de hierro (Fe) que al meteorizarse se transforman en sus iones que los conforman, por lo cual se observa alta disponibilidad de Fe en los dos agroecosistemas como se observa en la tabla 3; al poseer en su textura mayor relación de arena que arcilla son suelos con buen drenaje (Zapata Hernández, 2022).

5.1.2 Acidez activa (pH)

Dada la extensión de los agroecosistemas y por sus diferentes características que tienen dentro de los mismos, se evaluó el pH por zonas de muestreo, el pH en la finca Los 3 Romiles varió desde los 6,33 hasta los 6,98 como se puede observar en la figura 2, con un pH promedio de $6,59 \pm 0,374$; lo cual indica que el suelo tiene características entre ligeramente ácido a neutro según la clasificación de suelos adoptada por (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 1999).

Figura 2. Valores de pH por punto de muestreo, finca Los 3 Romiles.

Por su parte el valor de pH en las diferentes zonas de la finca Los Yopos oscilo desde los 4,09 hasta 4,77 lo cual indica que el suelo tiene condiciones extremadamente acidas para la zona D1 y fuertemente ácidos para las demás zonas según la clasificación de suelos adoptada por (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 1999), con un valor promedio pH para toda la finca de $4,55 \pm 0,424$.

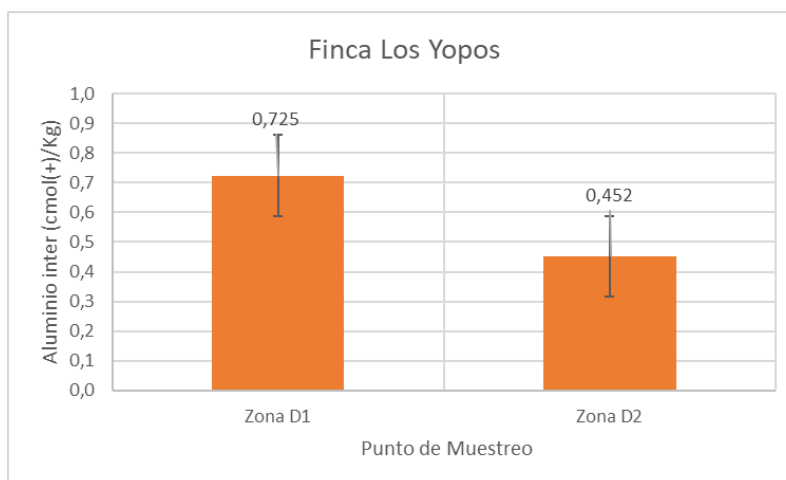
Figura 3. Valores de pH por punto de muestreo, finca Los Yopos

Autores como Ibarra Castillo et al. (2009) sugieren que el pH óptimo para el desarrollo de cultivos se encuentra entre 6,5 y 7,5; sin embargo, cada planta tiene algunas condiciones específicas para su crecimiento. El pH del suelo es uno de los parámetros más influyentes por su relación con otros procesos y reacciones en el suelo como la disponibilidad de nutrientes, toxicidad de algunos elementos, retención de plaguicidas y en el funcionamiento de los microorganismos que son esenciales para los procesos ecológicos (Porta Casanellas et al., 2008).

Las plantaciones de plátano pueden llevarse a cabo en un amplio rango de pH desde los 4 a los 8; no obstante, según Belalcázar Carvajal (1991) el pH óptimo para mejorar la eficiencia del cultivo se encuentra entre los 6 a los 7, puesto que en estas condiciones se muestra el mejor equilibrio entre los agentes químicos y biológicos generando mayor disponibilidad y aprovechamiento de los nutrientes. Por lo anterior es necesario proponer estrategias que mejoren la situación actual de acidez especialmente en la finca los Yopos, puesto que está por debajo de las condiciones ideales.

5.1.3 Acidez, aluminio e hidrógeno intercambiable

La acidez intercambiable (A_i) se refiere a los iones de hidrógeno libres (H^+) presentes en el suelo, está asociada a la disponibilidad de hidrógeno intercambiable (H_i) y aluminio intercambiable (Al_i) este en forma de iones de aluminio como Al^{3+} o iones de hidróxido de aluminio $Al(OH)^{2+}$ y $Al(OH)_2^+$ los cuales son factores que controlan el pH en los diferentes rangos de acidez. El aluminio intercambiable (Al_i) se detectó únicamente en la finca Los Yopos en las zonas D1 y D2 donde el valor de pH fue de 4,09 y 4,56 respectivamente, los cuales son los más bajos de la zona. A continuación, se muestran los valores de aluminio intercambiable para las dos zonas.

Figura 4. *Aluminio intercambiable en la finca los Yopos.*

Lo anterior está asociado a la presencia de Al^{3+} en suelos con $\text{pH} < 4,5$; mientras que las formas de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ estas ligados a suelos con pH entre 4,5 y 5,5; para suelos entre pH 5,6 y 6,5 el contenido de las diferentes fuentes de aluminio cambiabile es reducido y casi nulo (Jaramillo, 2002), por lo tanto, se corrobora que a mayor pH iones de aluminio no están disponibles en el suelo.

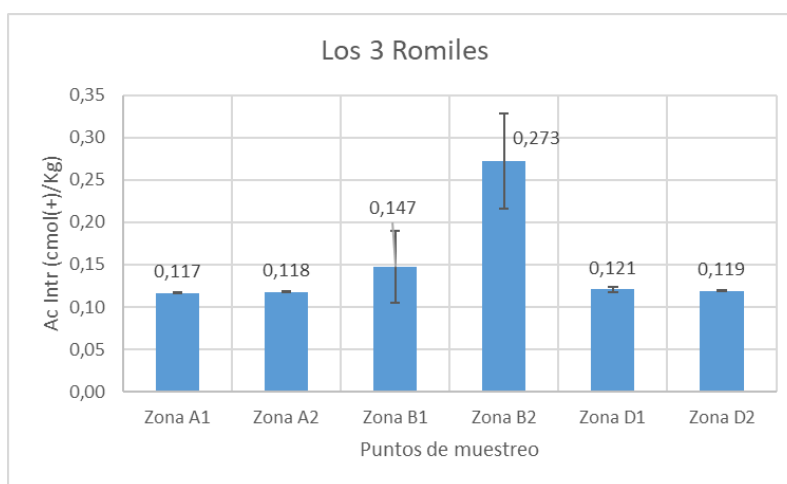
En suelos ligeramente ácidos el aluminio, proveniente de óxidos de aluminio o aluminosilicatos, es el elemento que más influye de manera negativa sobre el desarrollo de las especies vegetales dificultando la producción agrícola, debido a la toxicidad que genera este metal (aunque esta depende de la tolerancia de las plantas), se ha reportado que altera el patrón de crecimiento celular y el crecimiento longitudinal de las raíces, lo cual tiene como consecuencia una reducción en la toma de agua y nutrientes (Forero-Ulloa et al., 2011). Concentraciones de Al que oscilan entre 0,2 a 6,0 mg/kg son suficientes para limitar el crecimiento de varias especies y limitar la producción agrícola (Rivera Méndez et al., 2016; Sancho & Molina, 2016).

Para poder neutralizar el aluminio y transformarlo en su forma insoluble se lleva a cabo la práctica de encalamiento, donde se utiliza materiales como carbonatos de calcio (CaCO_3),

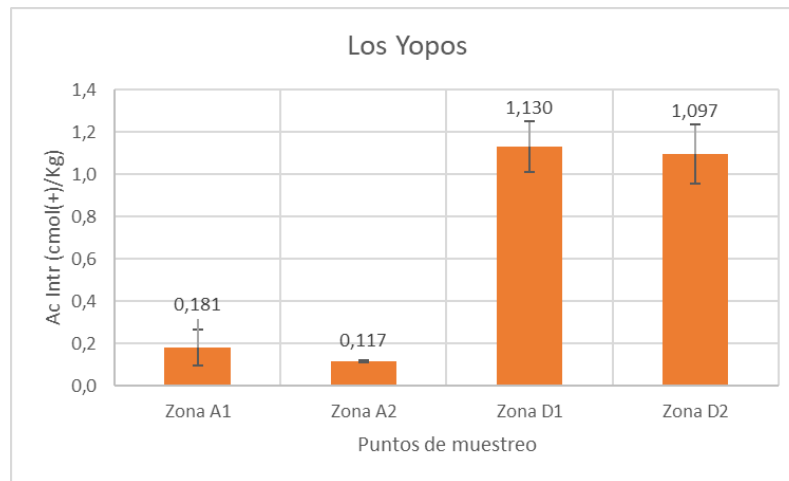
carbonatos de magnesio (MgCO_3) y cal dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], para corregir la acidez, aumentar el pH y mejorar Ca y Mg intercambiable (Zapata Hernández, 2004).

Los valores de A_i para la finca Los 3 Romiles se observa en la figura 5, y con un promedio de $0,149 \pm 0,046$ $\text{cmol}(+)/\text{kg}$. Dado que no se determinaron iones de aluminio en la finca Los 3 Romiles, el valor del H_i corresponde al mismo cuantificado en la acidez intercambiable.

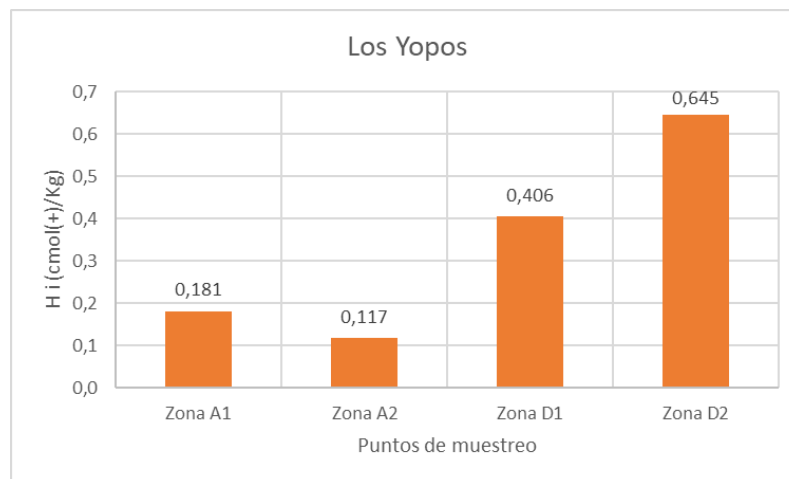
Figura 5. *Acidez intercambiable finca Los 3 Romiles*



Mientras tanto la A_i para Los Yopos presento un promedio de $0,631 \pm 0,482$ $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, a continuación, se presenta los valores para cada uno de los puntos.

Figura 6. Acidez intercambiable Los Yopos

Los Yopos en la zona A1 y A2 al no reportar contenido de Al_i el valor de hidrogeno intercambiables es el mismo; mientras que la zona D1 y D2 con contenidos de Al_i el hidrogeno intercambiables cambia con valores de 0,406 cmol(+)/kg y 0,645 cmol(+)/kg respectivamente.

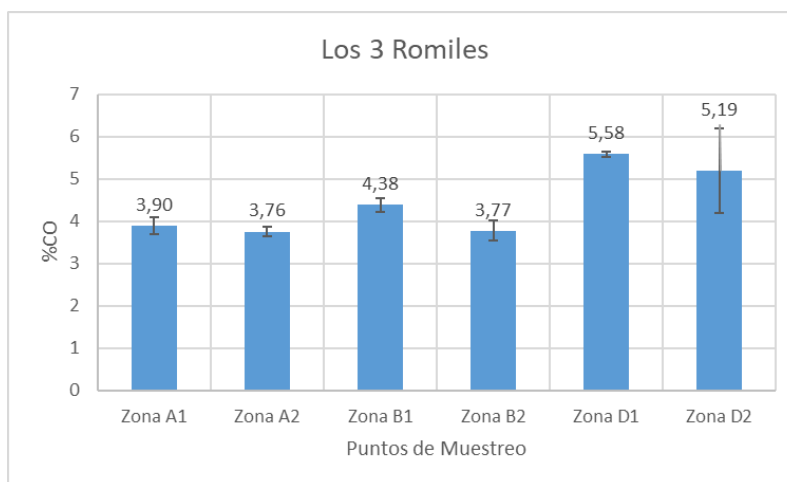
Figura 7. Hidrogeno intercambiable finca Los Yopos

5.1.4 Carbono orgánico

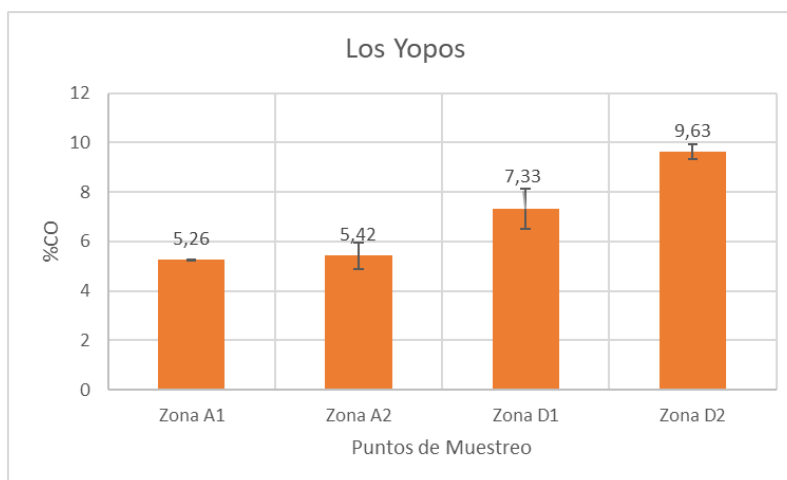
Para determinar la materia orgánica (MO) del suelo se lleva a cabo bajo la estimación indirecta del contenido de carbono orgánico (CO), este parámetro es importante en la calidad y productividad edáfica y tiene gran relación con los contenidos de macronutrientes como el fósforo y el nitrógeno también afecta la capacidad de retención de agua de un suelo, su porosidad y capacidad de intercambio catiónico (Fernández Martínez, 2020).

El porcentaje más bajo de carbono orgánico para la finca Los 3 Romiles se reportó en las zonas A1, A2 y B2; mientras que la de mayor carbono orgánico fue la D1 y D2 como se evidencia en la figura 8, esos valores se relacionan a que en estas dos zonas se adicionan residuos vegetales lo que incrementa la materia orgánica. El porcentaje promedio de CO para Los 3 Romiles fue de $4,428 \pm 0,636$ %CO lo cual indica bajo contenido de materia orgánica dificultando la fertilidad del agroecosistema.

Figura 8. Valores de carbono orgánico por punto de muestreo, finca Los 3 Romiles.



El promedio de CO para el agroecosistema Los Yopos fue de $6,915 \pm 1,612$ %, con mejores valores que la otra zona de interés, con valores mínimos CO de 5,257% y máximos de 9,634 %CO.

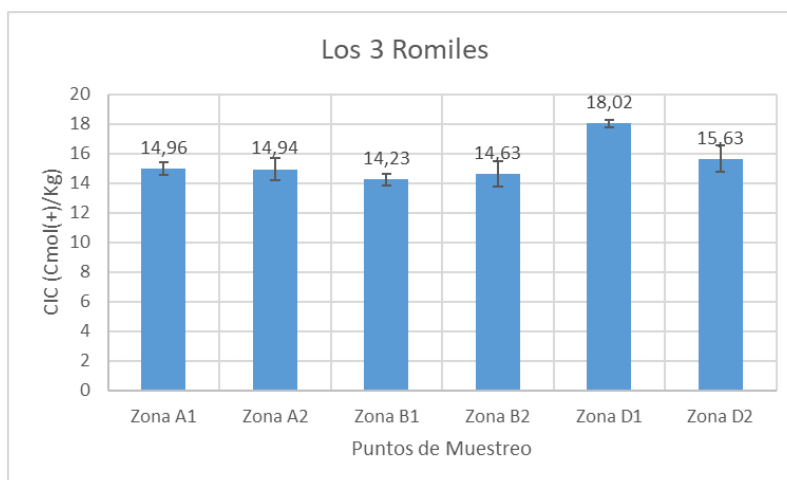
Figura 9. Valores de carbono orgánico por punto de muestreo, finca Los Yopos.

A pesar de que los valores de CO en las dos fincas son moderadamente bajos, estos son superiores a los reportados por Medina Mendoza & Vélez Medina (2018) en el municipio de Granada Meta los cuales se encontraron entre un 0,3% y 1,4% de MO, esto se debe a que en los llanos orientales la temperatura y la constante precipitación impiden su acumulación (Rey Rodríguez, 2020).

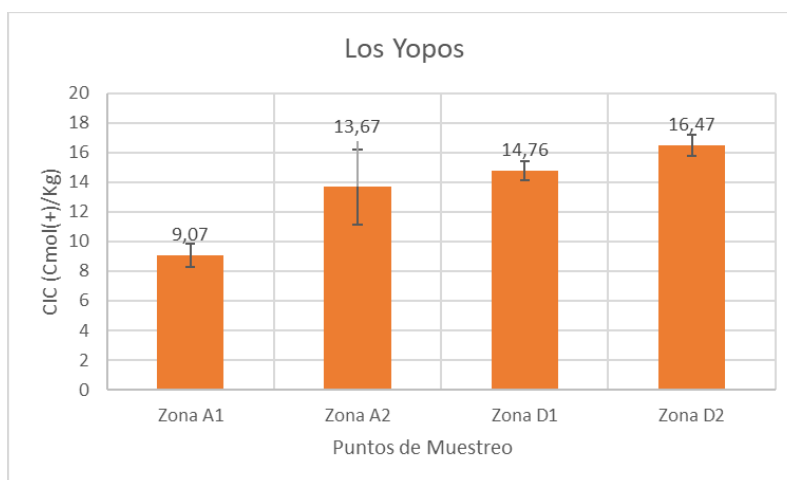
5.1.5 Capacidad de intercambio catiónico

Los procesos de intercambio iónico son importantes en las reacciones del suelo, debido a que estos determinan la capacidad para retener iones y que a su vez estén disponibles para la absorción por parte de las plantas y no se vean afectados por procesos de lixiviación llevando a la pérdida de nutrientes (Sparks, 2023).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) promedio expresado en centimoles por kilogramo (cmol(+)/kg) para la finca Los 3 Romiles fue de $15,40 \pm 1,02$; la zona con mejor CIC fue la D1 que también reportó mejor %CO.

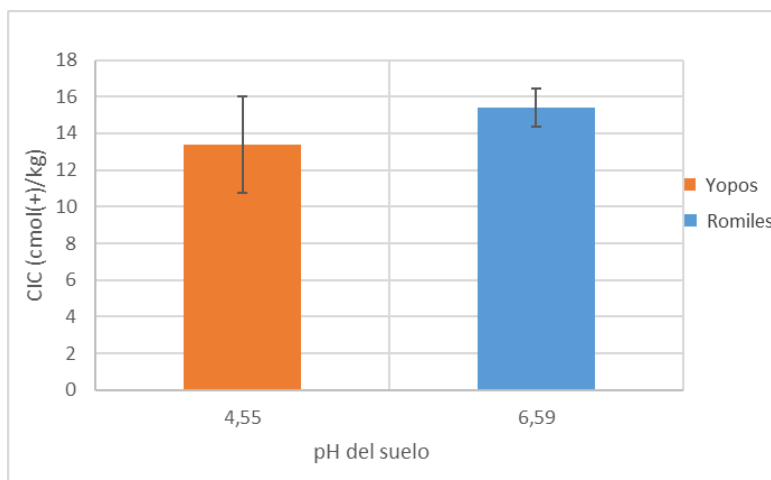
Figura 10. Valores de CIC por punto de muestreo, finca Los 3 Romiles.

La CIC para los Yopos (figura 11) no presento grandes variaciones con respecto a la otra finca, y los valores presentan el mismo comportamiento de materia orgánica, a mayor MO mayor CIC, la Zona D2 fue la que mayor CIC registro respecto a todos los puntos de muestreo. La CIC promedio fue de $13,48 \pm 2,63$ valores que indica que el suelo tiene una fertilidad media y moderada aptitud para retener y almacenar cationes como sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}).

Figura 11. Valores de CIC por punto de muestreo, finca Los Yopos

Los niveles de CIC mostrados en los dos agroecosistemas se le atribuyen al poco contenido de arcilla que tiene el suelo por presentar una textura franco arcillo arenosa y un bajo contenido de materia orgánica en los suelos, dos elementos que determinan la CIC (Doménech, 2000). De manera similar como el pH influye en la disponibilidad de nutrientes, también lo hace en el comportamiento de CIC y aumenta su valor al incrementar el pH, lo que mejorara la fertilidad del suelo (Jaramillo, 2002); dicho la anterior, en la figura 9 se observa este proceso en donde la finca con un mayor pH también presenta mejor CIC.

Figura 12. Relación del pH sobre la CIC



Nota: se comparan los valores promedio de cada parámetro para poder interpretar de manera general cada agroecosistema.

La importancia de comprender la CIC en los agroecosistemas se fundamenta al momento de tomar decisiones de corrección y de adecuación de la tierra para cultivo, donde la fijación de fertilizantes o enmiendas depende de este parámetro; si no se conoce la CIC se puede caer en el error de invertir recursos en resolver problemas de fertilidad sin saber los requerimientos previos que necesita el suelo para absorber y retener los fertilizantes.

5.1.6 Boro disponible

En cuanto al boro en forma de anión borato BO_3^{3-} el cual es asimilado por las plantas, en condiciones ácidas como las encontradas en este estudio, se presenta poco dissociado y no puede ser adsorbido por la parte coloidal del suelo, por consiguiente, este micronutriente es fácilmente lixiviado (Navarro & Navarro, 2003), lo que permite confirmar la poca disponibilidad que se encontró en los análisis de laboratorio de ambas fincas. La deficiencia de boro produce retraso en el crecimiento al desarrollar de manera incompleta e irregular las hojas, también genera oscurecimiento de los tejidos por la acumulación de compuesto fenólicos provocando necrosis y muerte de las plantas (Bolaños et al., 2023).

Así mismo el boro adsorbido por el suelo depende de su textura, incrementando con el contenido de arcilla, el suelo de los agroecosistemas de Barranca de Upía no superan el 35% de arcilla en su clase textural dificultando su disponibilidad. La aplicación de carbonato de calcio (CaCO_3) que también se utiliza para corregir la acidez del suelo, es una de las alternativas para incrementar la retención de boro por los procesos de intercambio con los grupos carbonato, junto con la incorporación de materia orgánica a través de biofertilizantes y abonos orgánicos ayudan en la distribución de este elemento entre la fase sólida y líquida lo que permite reducir la lixiviación e incrementar la nutrición para las plantas (Malavé Acuña, 2005).

5.1.7 Azufre disponible

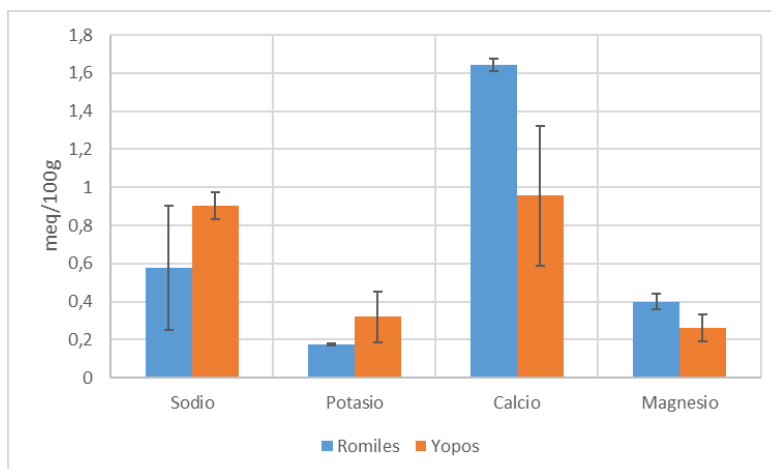
En las dos fincas se presenta una deficiencia de azufre (S) disponible, el cual se encuentra en forma de sulfatos, lo que puede estar asociado al bajo contenido de MO, debido a que es fuente orgánica de azufre a través de transformaciones de mineralización (Colacelli, 2001), además a condiciones de $\text{pH} < 5,5$ las concentraciones de azufre deberían ser bajas (Osorio, 2012); a pesar de

que el pH en el suelo de los Yopos es menor que al de los 3 Romiles, los Yopos tienen un leve aumento de azufre por tener mayor materia orgánica. Si se compara con la literatura Calderón-Medina et al. (2018) obtuvieron valores entre 4 y 13 mg/kg de S en el departamento del Meta, en contraste con los datos en este estudio es extremadamente escaso siendo $<0,1$ mg/kg.

5.1.8 Bases cambiables

El análisis de calcio, magnesio, sodio y potasio para cada una de las fincas se pueden observar en la figura 13. De acuerdo con los valores encontrados, los bajos contenidos de bases cambiables en las dos áreas de estudio están relacionados a que estos nutrientes son deficientes en suelos ácidos (Tan, 2011), además suelos de orden oxisoles característicos de esta región de Colombia se caracterizan por el bajo contenido de bases intercambiables (Moreno-Conn et al., 2022). No obstante, el Ca^{2+} presenta mayor disponibilidad en ambas fincas, seguido del Na^+ y con baja retención de Mg^{2+} y K^+ como se muestra a continuación.

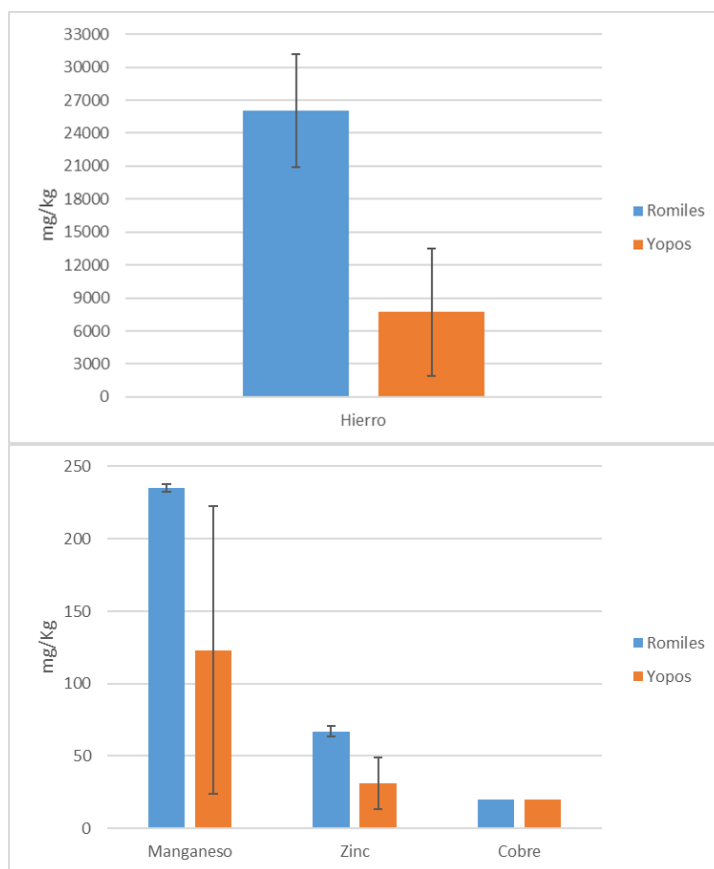
Figura 13. Comparación de bases cambiables en cada finca.



5.1.9 Micronutrientes disponibles en suelos

La disponibilidad de nutrientes está estrechamente relacionada con la acidez o alcalinidad del suelo, el hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) son altamente disponibles a pH ácidos (Navarro & Navarro, 2003). En la figura 14 se observa una mayor participación de estos 3 elementos en la finca los 3 Romiles que, en los Yopos, dado que el pH de la primera se encuentra en niveles óptimos para su disponibilidad. Por su parte el hierro es el nutriente más abundante en casi todos los suelos a excepción de los más salinos o básicos (Casas Flores, 2011) y es el que presenta mayor concentración en el área de estudio; la literatura reporta que niveles excesivos de Fe puede generar toxicidad en las plantas, provocan estrés oxidativo en las plantas y decoloración de las hojas al manifestar manchas marrones diminutas las puntas de las hojas, no obstante los síntomas de toxicidad por Fe varían en diferentes plantas (Zaid et al., 2020).

El contenido de cobre en las dos áreas fue inferior a los 20 mg/kg, a pesar de que el pH ligeramente ácido es ideal para que este elemento sea asequible al suelo, la materia orgánica y la presencia de los otros elementos en grandes cantidades puede ser las limitantes para su baja concentración (Navarro & Navarro, 2003).

Figura 14. Comparación de micronutrientes en cada finca.

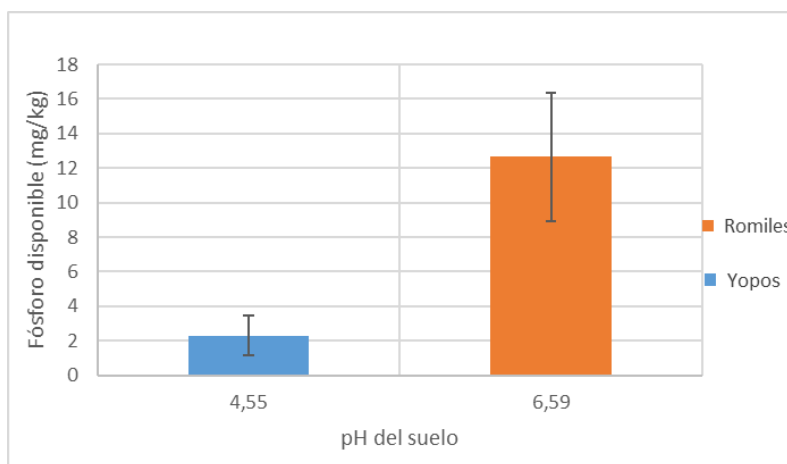
5.1.10 Fósforo y nitrógeno

Si bien existen formas orgánicas e inorgánicas de fósforo (P) en el suelo, el aprovechamiento de este depende de su solubilidad, por lo tanto, el fósforo que es asimilado por las plantas presenta baja disponibilidad, lo que afecta el crecimiento y la productividad agrícola, siendo necesario el uso de fertilizantes para incorporarlo al suelo (Moreno-Conn et al., 2021).

La menor disponibilidad de fósforo en el sistema productivo los Yopos se debe a una mayor acidez en el suelo, por una alta fijación de este elemento que lo lleva a formar compuestos completamente insolubles, al incrementar el pH aumenta la disponibilidad del fósforo como lo muestra la figura 15. Cabe señalar que la presencia del catión más soluble Al^{+3} tiene relación con

los bajos contenidos de fósforo y cationes intercambiables que se reportaron en los resultados encontrados. Se han reportado valores de 15,8 mg/Kg de fósforo disponible en sistemas productivos de la misma región (Huertas et al., 2018). Donde concentraciones entre 10 a 15 mg/Kg se clasifica como una disponibilidad medio baja, concentraciones menores a 5 se clasifica como disponibilidad muy baja (Belalcázar Carvajar, 1991).

Figura 15. Relación entre pH y fósforo disponible.



Por lo que se refiere a nitrógeno, en condiciones naturales este no proviene de la descomposición de la roca madre, si no que existe en la corteza terrestre a través de distintos procesos de fijación biológica, por medio de reacciones los organismos integran el nitrógeno molecular de la materia orgánica o de la atmosfera en compuestos asimilable por las plantas como nitritos, nitratos y amoníaco; es por esto que, los contenidos de nitrógeno de manera natural son demasiado bajos y se requiere de la adición de fertilizantes nitrogenados para cumplir con la demanda que requieren los cultivos (Navarro & Navarro, 2003). A pesar de que en el presente estudio no se cuantifico nitrógeno en los agroecosistemas, se puede deducir de manera cualitativa que el contenido de nitrógeno es reducido, atribuido a los bajos valores de materia orgánica, el tipo

de textura franco arcillo arenoso y franco arenoso con mayor porcentaje de arena en su composición, lo cual está ligado a un buen drenaje y alta aireación del suelo. Por esto el uso de abonos orgánicos, biofertilizantes y residuos de cosecha surgen como una solución para incrementar los niveles de este macronutriente en la zona de estudio. La deficiencia de este nutriente se caracteriza por una clorosis en las hojas, al igual que reduce el tamaño de los racimos (Belalcázar Carvajar, 1991).

5.2 Hoja de ruta y estrategias agrosostenibles

A partir del análisis químico y físico enfocado en caracterizar e identificar el estado en el que se encuentra el suelo de los sistemas agrícolas productivos del municipio de Barranca de Upía, en este capítulo se proponen una serie de prácticas agrícolas que permiten mejorar las condiciones edáficas y que fueron utilizadas en el diseño de la hoja de ruta y programas ambientales (ver apéndices A, B y C) que establecen acciones medibles a través de indicadores que favorecen el manejo sostenible del suelo y del agroecosistema. Tanto los resultados como las estrategias serán entregados a los agricultores por medio de un concepto técnico y de una cartilla (figura 16) como entregables para cumplir con los objetivos del proyecto FODEIN, con esto se pretende apropiar a la comunidad sobre la problemática del uso inadecuado de este recurso y sus impactos a nivel económico, social y ambiental. A continuación, se describen las practicas sostenibles que se sugieren implementar en los agroecosistemas para mejorar la calidad edáfica.

5.2.1 Rotación de cultivos

Una de las practicas recomendadas para mejorar la calidad del suelo es la rotación de cultivos, ya que esta permite modificar las características físicas, químicas y biológicas de este,

buscando incrementar la productividad y optimizar el uso de los recursos, que con el tiempo se genera un efecto de retroalimentación planta-suelo (Xiao et al., 2022), además es efectivo en el control de enfermedades y plagas, dado que el ciclo de vida de los insectos y patógenos se ve interrumpido por la modificación del cultivo, lo que reduce el uso de pesticidas y herbicidas (Liu et al., 2023).

El diseño de la rotación de cultivos debe estar enfocado en la oferta agrícola de la zona, donde predominan cultivos de plátano, cítricos, aguacate, yuca, maíz, caña de azúcar, piña, palma de aceite y arroz, de estos los de mayor rendimiento ton/ha son la caña de azúcar, piña, maíz forrajero, y cítricos (Asamblea Departamental del Meta, 2020), es por lo que se debe integrar cultivos de ciclo corto y con altos rendimientos para que sea económicamente rentable.

Así mismo se debe considerar el uso de semillas o especies nativas, lo cual permite diversificar la producción y consumo de alimentos, controlar la afectación por plagas y enfermedades, preservación de la agrobiodiversidad, alcanzar la seguridad y soberanía alimentaria donde los pueblos tienen el derecho a elegir lo que consumen y de qué manera quieren producirlo, proteger y regular la producción nacional agropecuaria y a resguardar el mercado doméstico (Aguilar et al., 2019; FAO, 2011).

5.2.2 Biofertilizantes y abonos orgánicos.

Se ha generado una dependencia de pesticidas y fertilizantes sintéticos para mejorar la eficiencia de los cultivos; sin embargo, no toda la dosis empelada es asimilada por las plantas, ocasionado lixiviación de nutrientes y de contaminantes deteriorando el agua superficial y subterránea, también ocasionado un impacto en la atmosfera y el suelo (Mahapatra et al., 2022). De manera que los biofertilizantes son una opción que permite satisfacer los requerimientos de los

cultivos y reducen los impactos ambientales, puesto que los microorganismos presentes en estos ayudan a fijar a la rizosfera los nutrientes mediante la solubilización de fósforo, zinc, nitrógeno y otros macro y micronutrientes (Chaudhary et al., 2022). Otra alternativa para incorporar nutrientes al suelo y que puedan ser aprovechados por las plantas de una mejor manera, son los fertilizantes minerales biorgánicos, que están compuestos por de microorganismo, materia orgánica y polvo mineral natural, que es extraído de minales como moscovita-potasio; dolomita-magnesio; calcita-calcio; yeso-azufre. Este tipo de fertilizantes aumentan significativamente el contenido orgánico en los suelos, ya que proporcionan un equilibrio estabilizador entre los componentes minerales, biológicos y orgánicos (Li et al., 2017; Syed et al., 2021).

La aplicación de abono orgánico permite mejorar la estructura, aireación y capacidad de retención del agua del suelo, mejora las características químicas y biológicas, aporta nutrientes, disminuye los costos de producción al evitar la dependencia de insumos externos de origen sintético (ICA, 2015). Al momento de suministrar algún abono o biofertilizante se debe considerar la composición elemental de este, la influencia sobre la acidificación o alcalinización que pueda tener al emplearlo en el suelo, verificar y asegurarse que no sean portadores de patógenos, fitopatógenos, metales pesados y otros que puedan alterar la calidad e inocuidad del abono, así mismo tener presente los requerimientos de nutrientes de cada cultivo (Jaramillo, 2002).

A nivel de investigación y en miras a continuar trabajando en proyectos que permitan dar soluciones al manejo sostenible de sistemas productivos agrícolas, se propone trabajar bajo Nano-Biofertilizantes, los cuales combinan la nanotecnología y los biofertilizantes, que por sus propiedades permite la liberación controlada de nutrientes a su sitio objetivo, generando mayor eficiencia, disponibilidad y absorción de nutrientes (Sharma et al., 2023); sin embargo, este tipo

de tecnología sigue desarrollándose y evaluando el efecto en la salud de los nanomateriales en los alimentos (Jakhar et al., 2022).

5.2.3 Residuos de cosecha o enmiendas orgánicas

Teniendo en cuenta los resultados, se evidenció que los dos sistemas agrícolas cuentan con una moderada capacidad de intercambio catiónico asociada a su textura y poca materia orgánica, por lo que la adición de residuos de cosecha como hojas, tallos, cascara, frutos, raíces entre otros que quedan después de la postcosecha aportan materia orgánica sobre el suelo, a través del incremento de la actividad biológica se generan procesos de mineralización, aportando nutrientes especialmente de nitrógeno y fósforo que son asimilados por las plantas, mejorando la fertilidad a largo tiempo (Monsalve Camacho et al., 2017). Investigadores como Bueno Buelvas & Fernández Lizarazo (2022) mostraron el efecto de la adición de residuos de cosecha sobre la capacidad de intercambio catiónico de entisoles en Casanare, encontrando un valor de CIC más alto al final del estudio.

5.2.4 Labranza de conservación

Las prácticas de labranza convencional o tradicional requieren el uso intensivo de implementos de arado, discos, rastras, rastrillos y pulidores que ayudan a remover la superficie del suelo para prepararlos a la hora de sembrar, ocasionando erosión, pérdida de la materia orgánica, afectando el almacenamiento de carbono, destruyendo importantes redes de hongos y demás fauna edáfica (Alonso Báez & Aguirre Medina, 2011; Marín & Feijoo, 2007). La transición a una labranza de conservación a través de maquinaria especializada como engarzadora de rodillos, estrategias como rotación de cultivos, uso de cobertura de residuos de plantas después de la

siembra, manejo integrado de plagas y malezas, mejora las condiciones del suelo (CONtextoganadero, 2021).

García R. et al. (2018) evaluaron la efectividad de tres tipos de labranza: reducida, de conservación y siembra directa, sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo en Villanueva Casanare. Se vio favorecida la población de hongos y bacterias con la labranza de conservación, mientras que la siembra directa aumentó el porcentaje de la materia orgánica del suelo.

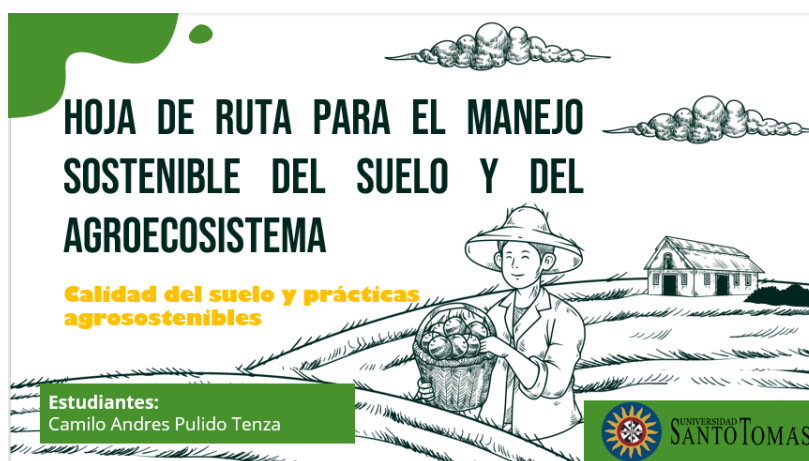
5.2.5 Uso eficiente del agua.

La gestión del agua en el sector agrícola desempeña un papel fundamental en la seguridad alimentaria, se estima que casi el 70% del agua que se consume en el mundo se usa en la agricultura, y un 46% de las áreas cultivables en el mundo requieren ser irrigadas; debido a factores relacionados con el cambio climático y el aumento de la población, en los próximos años se va a ocasionar una presión sobre el recurso hídrico (Banco Mundial, 2022; Betancourt-Aguilar et al., 2017). Así que se debe orientar proyectos enfocados en promover e implementar el uso eficiente y ahorro del agua en este sector; el diagnóstico relacionado con el manejo del recurso hídrico en los sistemas productivos mostro que la finca los 3 Romiles tiene una eficiencia del 65% en sistemas superficiales de riego de aspersión y manguera. Por su parte la finca los Yopos tiene una eficiencia de 86% por sistemas presurizado por riego por goteo, lo cual garantiza mejor aprovechamiento debido a que no hay perdidas por escorrentía por la buena disposición y distribución del agua en el cultivo (Buitrago Álvarez & Cote Mendoza, 2022).

A pesar de que la eficiencia de los sistemas de riego no es baja, se recomienda tener en cuenta la calidad del agua con la que se riega el cultivo para determinar si cumplen con los requisitos establecidos de acuerdo con su uso. Mejorar el sistema de riego para la finca los 3

Romiles y hacer verificación y mantenimiento a los sistemas ya existentes para evitar pérdidas y fugas dentro de las redes de distribución de agua. Recopilar información sobre oferta hídrica de la fuente de abastecimiento, periodos de lluvia y de sequía que ayuden a identificar fuentes alternas de suministro. Involucrar el uso de tecnologías avanzadas, como sensores de humedad y de evapotranspiración, cálculo de dosis de riego para una agricultura de precisión que mejora la eficiencia, reduce costos y ayuda a tomar decisiones con mayor certeza (Rambauth Ibarra, 2022).

Figura 16. Portada hoja de ruta calidad del suelo y estrategias agrosostenibles



Nota: este documento se encuentra en revisión para ser publicado.

6 Conclusiones

Las actividades agrícolas que se están desarrollando actualmente no son lo suficientemente sostenibles, lo cual poco a poco ocasiona la pérdida del funcionamiento del suelo, por lo que se requiere de mayores inversiones en el uso de agroquímicos para mejorar las condiciones de fertilidad, lo cual no resulta rentable económica y ambientalmente para la comunidad.

Conocer las condiciones del suelo permite identificar líneas de acción que ayuden a mejorar la calidad del suelo y de sus cultivos, lograr la adaptación al cambio climático y la crisis que esto

genera en productores y campesinos de estas áreas; de igual manera, la protección de la biodiversidad y generar modelos de desarrollo donde también se integre la responsabilidad social por parte de los agricultores sobre los recursos naturales.

El análisis fisicoquímico permitió evidenciar que los dos sistemas productivos presentan moderada materia orgánica y bajo contenido de arcilla en su textura, los cual determinan la baja disponibilidad de nutrientes y retención de iones, afectando la productividad agrícola. Los suelos de esta región tienen condiciones ácidas, aunque estas pueden ser usadas para el cultivo de plátano, se debe incrementar el pH hasta ser neutralizados para mejorar la eficiencia del cultivo, primordialmente en la finca los Yopos que contiene iones de aluminio y rangos de pH más bajos los cuales pueden causar toxicidad en los cultivos; mientras que el agroecosistema los 3 Romiles presenta un pH más adecuado y mejores condiciones de fertilidad.

Para suplir con el requerimiento de nutrientes específicos de cada cultivo la aplicación de biofertilizantes y abonos verdes en conjunto con otras estrategias agrosostenibles como la rotación de cultivos, incorporando semillas nativas y apostando por una labranza de conservación van a permitir mejorar la calidad edáfica y de las cosechas, al optar por agricultura orgánica se genera un valor agregado a sus productos.

7 Recomendaciones

Con el fin de obtener una mejor radiografía de las condiciones del suelo se sugiere realizar estudios en diferentes épocas del año, de esta manera comparar los resultados y evidenciar como cambia la calidad edafológica a través del tiempo y como influyen factores climáticos y antropogénicos sobre la misma.

Adicionalmente se recomienda ejecutar una fase de implementación y seguimiento a las estrategias agrosostenibles, con el propósito de evaluar la eficacia y eficiencia de las medidas tomadas, y que puedan ser reproducidas en otras zonas y sistemas productivos de la misma región o a nivel nacional. Por último, se reconoce el valor del conocimiento campesino en los sistemas agrícolas, por lo tanto, se recomienda que todas las estrategias que se planteen sean consultadas con las comunidades y puedan acordar alternativas afines a sus necesidades.

Referencias

- Afanador-Barajas, L. N., Peña, D. A. C., Giraldo, A. F. V., Murcia, M. F. B., Hernández, A. M., & Quintero, V. E. V. (2020). Evaluation of soil quality in agroecosystems of Colombia through the selection of a minimum data set. *Colombia Forestal*, 23(1). <https://doi.org/10.14483/2256201X.14856>
- Aguilar, T., García, M., & García, A. (2019). Construcciones de casas comunitarias de semillas nativas - criollas con sistemas participativos de garantía de calidad en Colombia. In *Experiencias comunitarias para la Agricultura Familiar en Colombia*. Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO.
- Alonso Báez, M., & Aguirre Medina, J. (2011). Efecto de la labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29, 113–121.
- Ariza Marín, L, Bolaños Briceño, J, Martínez Molina, S, Guevara Ortiz, K y García González, L. (2020). Concepto Técnico: Evaluación del Potencial Ecoturístico de la quebrada Guaicáramo en la vereda El Encanto, Municipio de Barranca de Upía, a partir de la valoración integral de sus servicios ecosistémicos.
- Asamblea Departamental del Meta. (2020). *Plan de Desarrollo Económico y Social Departamental “Hagamos Grande al Meta” para el periodo 2020 - 2023*.
- Banco Mundial. (2022, October 5). *El agua en la agricultura*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#:~:text=El%20agua%20es%20un%20insumo,alimentos%20en%20todo%20el%20mundo>.
- Bautista, E. H. D., Suárez, L. R., & Salazar, J. C. S. (2018). Relationship between macroinvertebrates and soil properties under different agroforestry arrangements in the

- Colombia Andean Amazon. *Acta Agronomica*, 67(3), 395–401.
<https://doi.org/10.15446/acag.v67n3.67266>
- Bedoya-Gómez, B. D., Dossman-Gil, M. A., & Marín-Fernández, J. (2021). Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras en Belén de Umbría, Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 160–185.
<https://doi.org/10.15359/rca.55-1.8>
- Belalcázar Carvajal, S. (1991). *El cultivo del plátano (Musa AAB Simmonds) en el trópico*. Instituto Colombiano Agropecuario.
- Betancourt-Aguilar, C., Tartabull Puñales, T., & Labaut-Betancourt, Y. (2017). El manejo integrado del agua en la agricultura: necesidad de implementación y aspectos vinculados. *Revista Científica Agroecosistemas*, 5, 40–54. <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/index>
- Blanco, J. O. (2002). Vocación de uso de los suelos y recomendaciones de manejo. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/19128>.
- Bolaños, L., Abreu, I., Bonilla, I., Camacho-Cristóbal, J. J., & Reguera, M. (2023). ¿Qué nos pueden decir los síntomas de la deficiencia de boro sobre su función y regulación? In *Plants* (Vol. 12, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants12040777>
- Bueno Buelvas, R., & Fernández Lizarazo, J. C. (2022). Impacto de los residuos de cosecha en la capacidad de intercambio catiónico de suelos Entisoles. In *Impacto de los residuos de cosecha en la capacidad de intercambio catiónico de suelos Entisoles*. Universidad de La Salle. Utopía. <https://doi.org/10.19052/wp.utopia.2022.1>
- Buitrago Álvarez, A. S., & Cote Mendoza, E. L. (2022). *Evaluación de la calidad de suelos y sus servicios ecosistémicos en sistemas productivos agrícolas en el municipio de Barranca de Upía- Meta (Colombia)*. Universidad Central.

- Burbano Orjuela, H., & Silva Mojica, F. (2013). Propiedades Químicas del Suelo. In *Ciencia del Suelo: Principios Básicos*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Calderón-Medina, C., Bautista-Mantilla, G., & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22, 141–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.22579/20112629.524>.
- Casas Flores, R. (2011). *El suelo de Cultivos y las Condiciones Climáticas*.
- Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Soil quality evaluation: Generation and interpretation of indicators. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.698>
- Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina y el Caribe (CODS). (2021). *Los retos de la agricultura colombiana frente al cambio climático*.
- Chaudhary, P., Singh, S., Chaudhary, A., Sharma, A., & Kumar, G. (2022). Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*.
- Colacelli, N. (2001). *Azufre en el suelo* (1.a ed). Librería y editorial Alsina.
- CONtextoganadero. (2021, February 9). *Estos son los tipos de labranza que usted puede utilizar en su predio*. CONtextoganadero. <https://www.contextoganadero.com/agricultura/estos-son-los-tipos-de-labranza-que-usted-puede-utilizar-en-su-predio>

- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J., Novoa-Yanez, R.-S., & Tamara-Morelos, R. (2020). Una evaluación de las propiedades fisicoquímicas de suelo en sistema productivo de maíz - algodón y arroz en el Valle del Sinú en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2).
<https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1375>
- Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR). (2018). *Diagnóstico por Erosión*.
<https://www.car.gov.co/uploads/files/5b9045459a4e5.pdf>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo (USDA)*.
- Doménech, X. (2000). *Química del suelo, el impacto de los contaminantes* (3ra ed.). Miraguano.
- Esquema de Ordenamiento Territorial, Barranca de Upia*. (2000).
- Fernández Martínez, F. (2020). *Desarrollo de modelo para determinar el stock de carbono orgánico del suelo con base en reflectancia difusa. Caso: Carimagua – Meta*. . Universidad Nacional de Colombia.
- Forero-Ulloa, F. E., Serrano-Cely, P. A., y Balaguera-López, W. A. (2011). *El aluminio en el suelo y algunas estrategias de manejo*. *Ciencia y Agricultura*, 7(1), 19–28. Retrieved from https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_agricultura/article/view/329
- García R., D. Y., Cárdenas H., J. F., & Silva Parra, A. (2018). Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades físico-químicas y microbiológicas en un Inceptisol. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 16. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.79>
- Guzmán Casado, G., & Morales Hernández, J. (2011). Agroecología y agricultura ecológica. Aportes y sinergias para incrementar la sustentabilidad agraria. *Agroecología*, 6, 55–62. Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/160671>

- Huertas, H. D., Rangel, J. A., & Parra, A. S. (2018). Chemical characterization of soil fertility in production systems of a flat High Plateau, Meta, Colombia. *Revista Luna Azul*, 46, 54–69. <https://doi.org/10.17151/luaz.2018.46.5>
- Ibarra Castillo, Ruiz Corral, González Eguiarte, & Flores Garnica. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. . *Agricultura Técnica En México*, 35(3), 267–276.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2015). *Cartilla para la elaboración de abono orgánicos compostado en producción ecológica*.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2020). *Resolución No.082394 del 2020*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2015). *Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2016). *Más del 60 por ciento de la cuenca del río Upía tiene suelos mal utilizados: IGAC*. <https://www.igac.gov.co/es/noticias/mas-del-60-por-ciento-de-la-cuenca-del-rio-upia-tienesuelos-mal-utilizados-igac>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2012). *Conflictos de uso del territorio colombiano*. Escala 1:100.000. Bogotá (Colombia).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*.
- Jakhar, A. M., Aziz, I., Kaleri, A. R., Hasnain, M., Haider, G., Ma, J., & Abideen, Z. (2022). Nano-fertilizers: A sustainable technology for improving crop nutrition and food security. *NanoImpact*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100411>
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

- Li, M., Li, Q., Yun, J., Yang, X., Wang, X., Lian, B., & Lu, C. (2017). Bio-organic-mineral fertilizer can improve soil quality and promote the growth and quality of water spinach. *Canadian Journal of Soil Science*, 97(4), 552–560. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0090>
- Liu, Q., Zhao, Y., Li, T., Chen, L., Chen, Y., & Sui, P. (2023). Changes in soil microbial biomass, diversity, and activity with crop rotation in cropping systems: A global synthesis. In *Applied Soil Ecology* (Vol. 186). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104815>
- Mahapatra, D. M., Satapathy, K. C., & Panda, B. (2022). Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprosects and challenges. In *Science of the Total Environment* (Vol. 803). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149990>
- Malavé Acuña, A. (2005). Los suelos como fuente de boro para las plantas. *Revista UDO Agrícola*, 5(1), 10–26.
- Marín, P., & Feijoo, A. M. (2007). Efecto de la labranza sobre macroinvertebrados del suelo en Vertisoles de un área de Colombia. *Terra Latinoamericana*, 25, 297–310.
- Medina Mendoza, S., & Vélez Medina, A. (2018). *Evaluación de la calidad del suelo por el empleo de agroquímicos, en sistemas productivos de arroz y plátano de la trocha cuatro del municipio de Granada (Meta)*. Universidad Santo Tomás.
- MinAgricultura, & Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2018). *Identificación General de la Frontera Agrícola en Colombia*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). *Decreto Numero 1071 de 2015*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). *Resolución 261 de 2018*
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Un campo para la equidad. Política Agropecuaria y de Desarrollo Rural*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2013). *Política Nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo (GIAS)*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2015). *Decreto 1076 de 2015 “Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*.

Ministerio De Ambiente, V. Y. D. T. (2004). *Decreto Número 1443 DE 2004*.

Monsalve Camacho, O. I., Gutiérrez D., J. S., & 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. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>

Montenegro-Gómez, S. P., Nieto-Gómez, L. E., & Giraldo-Díaz, R. (2022). Efecto de prácticas agroecológicas en la conservación del suelo de la Zona de Reserva Campesina de San Isidro, Pradera, Valle del Cauca. *Entramado*, 18(2). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.8002>

Mora Marín, A. M., Ríos Pescador, L., Ríos Ramos, L., & Luis Almario Charry, J. (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia Livestock impact on the ground in Colombia. *Ingeniería Y Región*, 17, 1–12. <https://doi.org/10.25054/issn.2216-1325>

Moreno-Conn, L. M., López-Casallas, M., & Barrera Cruz, F. M. (2021). Solubilización de fosfatos por bacterias del género *Burkholderia* aisladas de oxisoles de la altillanura

colombiana. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 22(2).

https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL22_NUM2_ART:1897

Moreno-Conn, L. M., Rodríguez-Hernandez, N. S., Arguello, J. O., Gallo Gordillo, O., Bernal-Riobo, J. H., Arango, M., & Baquero, J. E. (2022). Land use change and its effect on ecosystem services in an Oxisol of the eastern High Plains of meta department in Colombia.

Frontiers in Environmental Science, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.687804>

Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.cepal.org/es/suscripciones

Navarro, S., & Navarro, G. (2003). *Química Agrícola* (2da ed.). Ediciones Mundi-Prensa.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2016). *Estado mundial del Recurso Suelo: resumen técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), & Agencia de Desarrollo Rural. (2019). *Plan Integral de Desarrollo Agropecuario y Rural con Enfoque Territorial. Departamento de Meta*.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Seguridad alimentaria y nutricional. Conceptos básicos. Programa Especial para la Seguridad Alimentaria - PESA*.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Hacia una agricultura sostenible y resiliente en América Latina y el Caribe - Análisis de siete trayectorias de transformación exitosas*. <https://doi.org/10.4060/cb4415es>

Osorio, N. W. (2012). pH del Suelo y Disponibilidad de Nutrientes. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4).

- Perfetti, J. J., Balcazár, Á., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el desarrollo: de la agricultura en Colombia. SAC y Fedesarrollo*.
- Piñeiro, V., Arias, J., Elverdin, P., Ibáñez, M., Morales, C., Prager, S., & Torero, M. (2021). *Promover Prácticas Agrícolas Sostenibles: De los incentivos a la adopción y los resultados*.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0003228>
- Porta Casanellas, J., López Acevedo, M., & Poch Claret, R. (2008). *Introducción a la Edafología: Uso y Protección del suelo* (Ediciones Multi-Prensa, Ed.).
- Rambauth Ibarra, G. E. (2022). Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. *Computer and Electronic Sciences: Theory and Applications*, 3(1), 34–38. <https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.04>
- Ramírez Carvajal, R. (1997). *Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los suelos* .
- Rey Rodríguez, A. (2020). *Biofertilizantes, una alternativa para el mejoramiento de la calidad de suelos de los Llanos Orientales: el cultivo y promoción del crecimiento del árbol nativo Yopo (Anadenanthera peregrina) suplementado con la bacteria biofertilizante Lysinibacillus spphae*. Uniandes.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16, 66–77.
- Rico Muñoz, A. (2022, June 28). Solo se está aprovechando 13,5% de los 39,2 millones de hectáreas con potencial. *La República*.
- Rivera Méndez, Y., Moreno Chacón, L., Herrera Corzo, M., & Romero Angulo, H. (2016). La toxicidad por aluminio (Al^{3+}) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Palmas*, 37(1), 11–23.

Salamanca, R. (1984). *Suelos y Fertilizantes*.

Sancho, H., & Molina, E. (2016). Efecto del Mg y pH en la reducción de la toxicidad de Al en plantas de banano cultivadas en solución hidropónica. *Siembra*, 3(1), 53–66.

Sharma, B., Tiwari, S., Kumawat, K. C., & Cardinale, M. (2023). Nano-biofertilizers as bio-emerging strategies for sustainable agriculture development: Potentiality and their limitations. In *Science of the Total Environment* (Vol. 860). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160476>

Sparks, D. (2023). *Environmental soil chemistry* (2.a). Elsevier Science.

Syed, S., Wang, X., Prasad, T. N. V. K. V., & Lian, B. (2021). Bio-organic mineral fertilizer for sustainable agriculture: Current trends and future perspectives. In *Minerals* (Vol. 11, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/min11121336>

Taghavi, M., Darvishiyan, M., Momeni, M., Eslami, H., Fallahzadeh, R. A., & Zarei, A. (2023). Ecological risk assessment of trace elements (TEs) pollution and human health risk exposure in agricultural soils used for saffron cultivation. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31681-x>

Tan, K. (2011). *Principles of Soil Chemistry* (Fourth Edition). Taylor & Francis Group.

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). (2022). *Soluciones basadas en la Naturaleza –SbN: acelerando la transición hacia una agricultura sustentable en Guatemala*.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2013). Evaluación de Tierras para la Zonificación con Fines Agropecuarios a nivel nacional. Metodología a escala General (1:100.000). Bogotá.

- Xiao, H., van Es, H. M., Chen, Y., Wang, B., Zhao, Y., & Sui, P. (2022). Crop Rotational Diversity Influences Wheat–Maize Production Through Soil Legacy Effects in the North China Plain. *International Journal of Plant Production*, 16(3), 415–427. <https://doi.org/10.1007/s42106-022-00198-0>
- Zaid, A., Ahmad, B., Jaleel, H., Wani, S.H., Hasanuzzaman, M. (2020). A Critical Review on Iron Toxicity and Tolerance in Plants: Role of Exogenous Phytoprotectants. In: Aftab, T., Hakeem, K.R. (eds) *Plant Micronutrients*. Springer, Cham. https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/978-3-030-49856-6_4
- Zapata Hernández, R. (2004). Corrección de la toxicidad por aluminio en el suelo. In *Química de la acidez del suelo*.
- Zapata Hernández, R. (2022). *Los procesos químicos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

Apéndices

Apéndice A. Programa uso eficiente y ahorro del agua sector agrícola.

Programa uso eficiente y ahorro del agua en el sector agrícola		
Objetivo		
Optimizar el uso del recurso hídrico por parte de los campesinos de los agroecosistemas Los 3 Romiles y Los Yopos.		
#	Actividades	Indicadores
1	Identificar las fuentes de abastecimiento.	$\frac{N^{\circ} \text{ de fuentes caracterizadas}}{N^{\circ} \text{ de fuentes identificadas}} * 100$
2	Analizar la calidad del agua.	Comparar los parámetros con la normatividad asociada al uso del agua.
3	Cuantificar la cantidad de agua utilizada para las actividades agrícolas.	$\frac{\text{Consumo agua mes anterior} - \text{consumo mes actual}}{\text{Consumo agua mes anterior}} * 100$
4	Monitorear los sistemas de riego utilizados en los dos agroecosistemas.	$\frac{N^{\circ} \text{ de fugas reparadas}}{N^{\circ} \text{ de fugas identificadas}} * 100$
5	Capacitar a los agricultores sobre la importancia del uso eficiente del agua	$\frac{N^{\circ} \text{ personas capacitadas}}{N^{\circ} \text{ de participantes registrados}} * 100$
Responsable		Actores involucrados
✓ Unidad de investigación USTA Villavicencio ✓ Facultad de Ingeniería ambiental		✓ Campesinos de la asociación ✓ Alcaldía municipal ✓ Autoridad ambiental
Plazo de ejecución		Corto y mediano

Apéndice B. Programa rotación de cultivos y semillas nativas.

Programa rotación de cultivos y semillas nativas		
Objetivos		
✓ Incrementar la productividad del suelo y alcanzar alto rendimiento en los cultivos. ✓ Diversificar los productos cultivados y asegurar la soberanía alimentaria en la región.		
#	Actividades	Indicadores
1	Realizar rotación de cultivos mediante la siembra de diferentes especies que se desarrollen en la región.	$\frac{N^{\circ} \text{ de especies sembradas}}{N^{\circ} \text{ de especies identificadas}} * 100$
2	Calcular el rendimiento de la cosecha con prácticas de rotación y con prácticas de monocultivo y realizar su comparación.	$\frac{\text{Toneladas recolectadas para una misma especie}}{\text{Hectarias cultivadas con rotacion}}$ $\frac{\text{Toneladas recolectadas para una misma especie}}{\text{Hectarias cultivadas sin rotacion}}$
3	Identificar y elaborar un vivero con semillas nativas	$\frac{N^{\circ} \text{ de especies sembradas}}{N^{\circ} \text{ de especies identificadas}} * 100$
4	Caracterizar el suelo para evaluar los cambios al ejecutar la rotación de cultivos	Comparación de las propiedades físicas, químicas y biológicas antes y después de la rotación de cultivos.
Responsable		Actores involucrados
✓ Unidad de investigación USTA Villavicencio ✓ Facultad de Ingeniería ambiental		✓ Campesinos de la asociación ✓ Alcaldía municipal ✓ Autoridad ambiental
Plazo de ejecución		Mediano y largo

Apéndice C. Programa cultivos orgánicos

Programa cultivos orgánicos		
Objetivo		
Reducir el uso de pesticidas y fertilizantes de origen sintético y disminuir los costos de producción mediante la aplicación de fertilizantes orgánicos, para mejorar la eficiencia de los cultivos.		
#	Actividades	Indicadores
1	Realizar talleres para elaborar abonos y fertilizantes mediante técnicas como pacas biodigestoras.	$\text{Talleres realizados} = \frac{\text{Talleres realizados}}{\text{Talleres Propuestos}} * 100$
2	Calcular la cantidad de insumos agrícolas usados de origen sintético.	$\text{Reducción de insumos} = \frac{\text{Cantidad aplicada anteriormente} - \text{cantidad aplicada actual}}{\text{Cantidad aplicada anteriormente}} * 100$
3	Caracterizar el suelo para evaluar los cambios producidos por de esta práctica agrícola.	Comparación de las propiedades físicas, químicas y biológicas antes y después de la aplicación de abonos orgánicos.
Responsable		Actores involucrados
✓ Unidad de investigación USTA Villavicencio ✓ Facultad de Ingeniería ambiental		✓ Campesinos de la asociación
Plazo de ejecución		Corto y mediano