



Evaluación fisicoquímica del suelo en una finca cafetera del municipio de Santa Bárbara, para el fortalecimiento del servicio ecosistémico de provisión asociado al cultivo de café, 2026.

Modalidad: Proyecto de investigación

Daniel Medina carrillo
CC. 1095580492
Cielo Sepúlveda Quintero
CC. 1095791442

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Manejo de Recursos Ambientales
Bucaramanga, 08 de septiembre de 2026



Evaluación fisicoquímica del suelo en una finca cafetera del municipio de Santa Bárbara, para el fortalecimiento del servicio ecosistémico de provisión asociado al cultivo de café, 2026.

Modalidad: Proyecto de investigación

Daniel Medina carrillo
CC. 1095580492
Cielo Sepúlveda Quintero
CC. 1095791442

**Informe de Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en Manejo de Recursos Ambientales**

DIRECTOR

Natalia Alexandra Bohórquez Toledo, Qca., M.Sc. Qca.

Grupo de Investigación en Ingeniería Verde - GRIIV

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Manejo de Recursos Ambientales
Bucaramanga, 08 de septiembre de 2026**

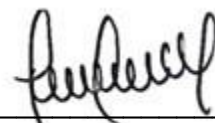
F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

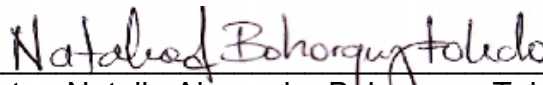
VERSIÓN: 2.0

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de
los requisitos exigidos por las Unidades
Tecnológicas de Santander
Para optar al título de Tecnólogas en Manejo de Recursos
Ambientales, según acta del comité de trabajos de grado
Número 22 del día 08 de septiembre de 2026
Evaluador: Edwin Mauricio Acosta Cardenas



Firma del Evaluador: Edwin Mauricio Acosta Cardenas



Firma del Director: Natalia Alexandra Bohorquez Toledo

DEDICATORIA

“Deseo dedicar este proyecto primeramente a Dios por darme la guía y la sabiduría para llegar hasta aquí, a mis padres, hermanos, amigos cercanos, que día a día me brindaron apoyo tanto económico, emocional, fuerzas para recorrer este camino que no ha sido fácil para mí, por último y no menos importante a mí mismo por haber llegado hasta aquí, si me lo preguntan hace unos semestres atrás no creería que seguiría, esto es por todo mi gran esfuerzo y todo lo que soy está plasmado en este trabajo” – Daniel Medina Carrillo.

“Primeramente, agradezco a Dios por permitirme alcanzar esta meta y darme la fortaleza para no rendirme. Dedico este proyecto a mi mamá y a mi familia, por su amor y apoyo incondicional durante mi carrera. A mi pareja, por acompañarme y motivarme en cada momento, y a mi gato, por ser fiel compañía en los días de estudio y desvelo” – Cielo Sepúlveda Quintero.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestra gratitud primeramente a Dios, el cual escuchó nuestras oraciones y nadie más que él sabe lo difícil y todos los esfuerzos que hemos puesto para llegar tan lejos a pesar de todas las dificultades que se nos presentaron, por darnos guía, inteligencia y amor por cada cosa que hacemos en la carrera.

Queremos extender nuestros agradecimientos a nuestra directora de proyecto, Natalia Alexandra Bohórquez Toledo, cuya guía y compañía ha sido muy importante durante nuestro proceso de formación, es una gran profesional a la cual admiramos demasiado y es gracias a eso que hoy día confiamos tanto en nuestras capacidades. Valoraremos siempre la confianza que depositó en nosotros, en nuestro potencial y capacidad de aprendizaje.

Asimismo, queremos extender nuestro agradecimiento a los profesionales de la institución (UTS) los cuales estuvieron presentes toda nuestra formación a lo largo de estos semestres por proporcionarnos información tan valiosa para el desarrollo de nuestro trabajo de grado. Agradecemos a la coordinación de Ambiental por brindarnos la confianza y la oportunidad de llevar nuestro trabajo de grado en su programa, así como por la información tan valiosa la cual nos permitió desarrollar nuestro Trabajo de grado.

Estoy profundamente agradecido por todas las personas y elementos que han contribuido a mi crecimiento y desarrollo durante este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	17
2. MARCO REFERENCIAL	22
2.1. MARCO TEÓRICO	22
2.1.1. EL SUELO COMO RECURSO NATURAL.....	22
2.1.2. CALIDAD, SALUD Y FERTILIDAD DEL SUELO	23
2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO.....	24
2.1.4. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	27
2.1.5. CULTIVO DE CAFÉ	31
2.1.6. AGROECOSISTEMAS CAFETEROS	31
2.1.7. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	32
2.1.8. SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PROVISIÓN	32
2.1.9. RELACIÓN ENTRE EL SUELO Y EL SERVICIO DE PROVISIÓN	33
2.2. MARCO GEOGRÁFICO	34
2.3. MARCO LEGAL.....	35
2.4. MARCO AMBIENTAL.....	37
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	41
4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO CAFETERO.....	41
4.2. RELACIÓN SUELO-PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ.....	45
4.3. ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO Y MANEJO DEL SUELO	52
5. RESULTADOS	53

5.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO CAFETERO.....	53
5.2.	RELACIÓN SUELO–PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ.....	57
5.3.	ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO Y MANEJO DEL SUELO	59
5.3.1.	APROVECHAMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS..	59
5.3.2.	CONSERVACIÓN DE HUMEDAD Y CONTROL DE LA EROSIÓN	60
5.3.3.	MANEJO DE LAS DEFICIENCIAS DE FÓSFORO Y AZUFRE	61
5.3.4.	CAPACITACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL MANEJO DEL SUELO	61
<u>6.</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>63</u>
<u>7.</u>	<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>64</u>
<u>8.</u>	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>66</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zona de muestreo	34
Figura 2. Ubicación finca cafetera	41
Figura 3. Retiro de capa vegetal	43
Figura 4 Excavación de 25cm	43
Figura 5. Muestra cortada de suelo	44
Figura 6. Mezcla de muestras	44
Figura 7. Información General de la muestra	45
Figura 8. Triángulo de textura	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Resultados de la caracterización fisicoquímica de la muestra del suelo</i>	55
Tabla 2. <i>Comparación de los resultados con criterios de referencia para café</i>	58

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Humedad gravimétrica</i>	<i>46</i>
<i>Ecuación 2. Porosidad total</i>	<i>47</i>
<i>Ecuación 3. Densidad aparente.....</i>	<i>47</i>
<i>Ecuación 4. Densidad real.....</i>	<i>47</i>
<i>Ecuación 5. Ecuaciones de textura.....</i>	<i>48</i>
<i>Ecuación 6. Capacidad de intercambio Catiónico.....</i>	<i>51</i>
<i>Ecuación 7. Materia orgánica</i>	<i>52</i>
<i>Ecuación 8. Acidez intercambiable</i>	<i>52</i>

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto de investigación tuvo como propósito evaluar las propiedades físicoquímicas del suelo de una finca cafetera ubicada en el municipio de Santa Bárbara, Santander, con el fin de determinar su aptitud para el establecimiento y manejo sostenible del cultivo de café, fortaleciendo el servicio ecosistémico de provisión asociado a este sistema productivo. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y de alcance descriptivo, mediante un muestreo asistemático en un lote con relieve de ladera, donde se recolectaron veinte submuestras para conformar una muestra compuesta representativa.

Posteriormente, la muestra fue preparada y analizada en laboratorio mediante metodologías estandarizadas para determinar propiedades físicas y químicas del suelo, incluyendo textura, densidad, porosidad, humedad, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y disponibilidad de fósforo, azufre y boro.

Los resultados evidenciaron que el suelo presenta condiciones físicas favorables para el establecimiento del cultivo, destacándose una textura franco arenosa, adecuada porosidad y baja compactación, características que favorecen el crecimiento radicular y el drenaje. Sin embargo, el análisis químico identificó limitaciones relacionadas con la baja disponibilidad de fósforo y azufre, así como una reducida capacidad de intercambio catiónico, factores que pueden afectar la eficiencia nutricional del cultivo.

Se concluye que el predio posee una alta aptitud para el cultivo de café; no obstante, requiere un programa de fertilización técnica y un manejo sostenible del suelo que mejoren la disponibilidad de nutrientes y contribuyan a la conservación de los servicios ecosistémicos, favoreciendo la productividad y sostenibilidad del sistema

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

cafetero. Este trabajo constituye un soporte técnico para la toma de decisiones fundamentadas en información analítica confiable.

PALABRAS CLAVE: Cultivo de café, Caracterización fisicoquímica, Fertilidad del suelo, Servicios ecosistémicos

INTRODUCCIÓN

El cultivo de café (*Coffea arabica*) representa uno de los pilares socioeconómicos y agrícolas más importantes de Colombia, cuya sostenibilidad y productividad dependen directamente de la calidad del recurso edáfico. En el ámbito de la agronomía moderna, el suelo se concibe como un reactor biogeoquímico dinámico donde las propiedades físicas y químicas determinan la eficiencia en el transporte de agua, aire y la asimilación de nutrientes esenciales (Jaramillo, 2022). Investigaciones desarrolladas en el contexto nacional evidencian que el monitoreo de variables edáficas clave, tales como el fósforo disponible, el pH y la densidad, influyen significativamente en la sostenibilidad y el rendimiento de los sistemas cafeteros, permitiendo identificar a tiempo las limitaciones y potencialidades de los agroecosistemas (Matituy Bastidas, Tepud Rosales, & Navia Estrada, 2017) ; (Arenas Estevez, 2020). Asimismo, la calidad integral del suelo se encuentra estrechamente vinculada con la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, tales como la regulación hídrica, el reciclaje de nutrientes y la resistencia a la degradación (Bedoya Gomez, Dossman Gill, & Fernández, 2021)

A pesar del extenso cuerpo de conocimientos disponibles sobre la fertilidad cafetera en el país, en múltiples regiones predomina un manejo empírico y tradicional de los sistemas productivos. En el municipio de Santa Bárbara, Santander, es común el establecimiento de cultivos e incorporación de enmiendas orgánicas basadas en el conocimiento tradicional, sin realizar previamente una caracterización fisicoquímica del terreno. De acuerdo con Khalajabadi & Gonzalez Osorio (2012), la aplicación de abonos orgánicos como la gallinaza sin un análisis previo del suelo suele generar graves desequilibrios en los nutrientes y alterar la reacción del suelo (pH), afectando de forma directa el desarrollo radicular del cultivo y la productividad general del

sistema agrícola. Aunque existen antecedentes sobre la fertilidad de suelos cafeteros en el departamento de Santander (Arenas Estevez, 2020), la falta de información analítica localizada en el municipio de Santa Bárbara genera incertidumbre sobre la viabilidad productiva y ambiental de estos terrenos.

Es allí donde radica el aporte significativo de la presente investigación para la comunidad académica y los productores locales. Ante la disponibilidad de teorías generales sobre el manejo de suelos, este trabajo aterriza el conocimiento científico a una problemática territorial específica, sustentando técnicamente el establecimiento del cultivo de café en el predio evaluado. Desde el enfoque tecnológico, el proyecto integra procesos de muestreo y análisis de laboratorio normalizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi ((IGAC), 2014) en lo económico, optimiza la inversión al evitar gastos innecesarios derivados del mal uso de los abonos orgánicos; y en lo ambiental, previene la degradación del recurso a través de la gestión ecoeficiente. Además, articulándose con la línea de Recurso Suelo del grupo de investigación en ingeniería verde (GRIIV) de las UTS, la propuesta incorpora un enfoque diferenciador que vincula la fertilidad química con el fortalecimiento del servicio ecosistémico de provisión agrícola.

El procedimiento metodológico inició con la ejecución de un muestreo asistemático en un lote con relieve de ladera. Posteriormente, esta fracción fue sometida a ensayos analíticos para cuantificar sus propiedades físicas y químicas elementales, confrontando los resultados numéricos obtenidos con los criterios agronómicos y rangos de suficiencia establecidos por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Alvarado, y otros, 2005); ((Cenicafé), 2018). Los hallazgos sirvieron de base para identificar los factores limitantes del suelo (como el déficit crítico de fósforo y azufre) y estructurar un plan de recomendaciones técnicas orientadas al mejoramiento sostenible del agroecosistema cafetero.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de Santa Bárbara, Santander, se plantea establecer un cultivo de café como una alternativa productiva dentro de una finca. Sin embargo, este proceso se ha considerado sin realizar previamente una caracterización fisicoquímica del suelo, lo que genera dudas sobre su capacidad de uso y sobre si el terreno realmente cuenta con las condiciones adecuadas para un desarrollo óptimo del cultivo.

De manera tradicional le han aplicado abonos orgánicos como la gallinaza para mejorar la fertilidad del suelo. Sin embargo, la aplicación de abonos orgánicos sin un análisis previo del suelo puede generar desequilibrios en los nutrientes y alterar la reacción del suelo (pH), lo que puede afectar el desarrollo del cultivo y la productividad del sistema agrícola (Khalajabadi, 2012).

Por esta razón, es fundamental realizar una caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo y compararlas con los requerimientos del cultivo de café. Este proceso permitirá establecer recomendaciones técnicas que faciliten un manejo adecuado y sostenible del suelo. De acuerdo a lo anterior surge la pregunta problema: ¿Cuál es la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y el desempeño del cultivo de café en el sistema productivo estudiado, y qué estrategias de manejo pueden implementarse para mejorar la calidad del suelo y la productividad del cultivo?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de grado se justifica ante la necesidad de sustentar técnicamente el establecimiento del cultivo de café en una finca del municipio de Santa Bárbara, Santander, considerando que la falta de una caracterización fisicoquímica previa puede generar incertidumbre sobre la viabilidad productiva y ambiental del terreno. El desarrollo de este proyecto permitió determinar las condiciones fisicoquímicas del suelo y, a partir de los resultados obtenidos, formular recomendaciones técnicas que favorezcan el uso sostenible del recurso suelo.

Desde el enfoque tecnológico, el proyecto integró procesos de muestreo y análisis de laboratorio que permitieron obtener información científica sobre las condiciones del suelo y aportar elementos para optimizar su manejo. Desde el punto de vista económico, la caracterización realizada contribuye a orientar de manera más eficiente la inversión de insumos y fertilizantes, evitando gastos innecesarios derivados de un manejo inadecuado de los abonos. En el ámbito ambiental, los resultados obtenidos permiten establecer recomendaciones orientadas a prevenir la degradación del suelo y promover un manejo sostenible del recurso.

Esta investigación fue relevante para las UTS al articularse con la línea de Recurso Suelo del grupo de investigación en ingeniería verde, GRIIV, aportando conocimiento aplicado en procesos ecoeficientes y sostenibles. Asimismo, fortalece la formación científica del estudiante mediante la aplicabilidad de herramientas técnicas en un contexto real, contribuyendo al desarrollo regional y al campo del conocimiento en gestión sostenible del suelo.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las condiciones fisicoquímicas del suelo en una finca con cultivo de café mediante monitoreo y análisis de laboratorio, para determinar su estado de calidad y su influencia en el servicio ecosistémico de provisión agrícola.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante muestreo representativo y análisis de parámetros físicos y químicos, para establecer las condiciones actuales del sistema productivo cafetero.

Analizar la relación entre las propiedades del suelo y el desempeño del cultivo de café mediante la interpretación de resultados técnicos y criterios agronómicos, para identificar limitaciones y potencialidades del sistema.

Proponer estrategias de mejoramiento del suelo mediante recomendaciones técnicas basadas en los resultados fisicoquímicos obtenidos, para optimizar la productividad del cultivo y fortalecer el servicio ecosistémico asociado.

1.4. ESTADO DEL ARTE

La evaluación de la calidad del suelo en sistemas cafeteros ha sido ampliamente estudiada en Colombia debido a su relación directa con la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. En este sentido, diversos estudios han analizado las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo como indicadores clave para comprender el funcionamiento de los agroecosistemas cafeteros.

Uno de los trabajos relevantes es el desarrollado por Matituy, (2017), quienes evaluaron la calidad del suelo en sistemas productivos cafeteros en el municipio de La Unión, Nariño. En esta investigación se analizaron diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo, entre ellas fósforo disponible, densidad real y otras variables relacionadas con la fertilidad, con el propósito de establecer su relación con la productividad de los cafetales. Los resultados evidenciaron que las características del suelo influyen significativamente en la sostenibilidad de los sistemas cafeteros, destacando la importancia de monitorear estos parámetros para mejorar la gestión agrícola.

En este contexto, la evaluación de la calidad del suelo en cultivos de *Coffea arabica* L. en el departamento del Huila, desarrollada por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), analizó diversos indicadores edáficos relacionados con la fertilidad y la respuesta de los cafetales a prácticas de fertilización. El estudio consideró variables fisicoquímicas del suelo para determinar su influencia en el desarrollo del cultivo, evidenciando la importancia de un manejo adecuado de nutrientes para mantener la productividad y la estabilidad del sistema productivo cafetero (Pérez Pérez, 2016).

Posteriormente, se realizó un estudio enfocado en las características químicas de suelos cafeteros en el departamento de Santander. La investigación analizó variables como textura, pH y disponibilidad de bases intercambiables, con el objetivo de comprender las condiciones edáficas que predominan en las fincas cafeteras de la región. Este trabajo aportó información local relevante sobre la fertilidad de los suelos utilizados para el cultivo de café, contribuyendo a la identificación de limitaciones y potencialidades para la producción agrícola en el contexto regional (Estevez, 2020).

En una perspectiva más amplia del papel ecológico del suelo, realizaron una valoración de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras de Belén de Umbría, Colombia. Los autores evaluaron propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y su relación con funciones ecosistémicas como la regulación hídrica, la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a la erosión. Los resultados evidenciaron que la calidad del suelo en sistemas cafeteros está estrechamente vinculada con la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la sostenibilidad de los agroecosistemas (Gómez, 2021).

En este contexto, Vania Torrez, (2023) desarrolló una revisión sistemática sobre la relación entre la calidad ecológica de los agroecosistemas y la calidad del café. El estudio analizó investigaciones a nivel global y evidenció que factores como la biodiversidad, la estructura del suelo y las funciones ecosistémicas asociadas — entre ellas el reciclaje de nutrientes y la regulación hídrica— influyen directamente en la sostenibilidad de los sistemas cafeteros y en la calidad del grano producido. Esta revisión destaca la importancia de considerar el suelo como un componente clave dentro de los procesos ecológicos que sostienen la producción cafetera.

Ese mismo año, Alefsi David Sánchez Reinoso, (2023) evaluaron la aplicación de biochar obtenido a partir de pulpa de café como estrategia para mejorar las propiedades del suelo en cultivos cafeteros. El estudio, publicado en el Journal of Soil Science and Plant Nutrition, demostró que la incorporación de biochar contribuye a mejorar características físicas, químicas y biológicas del suelo, tales como la retención de nutrientes, la estructura edáfica y la actividad microbiana. Los resultados sugieren que el aprovechamiento de subproductos del café puede representar una alternativa sostenible para mejorar la fertilidad del suelo y reducir impactos ambientales en la producción cafetera.

En la misma línea de investigación, Henriquez, (2024) analizó la comunidad de hongos presentes en suelos de plantaciones de café colombianas y su relación con las funciones ecológicas del suelo. El estudio evidenció que la diversidad de hongos edáficos desempeña un papel fundamental en procesos como la descomposición de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y la estabilidad del suelo, resaltando la importancia de las prácticas de manejo agrícola que promuevan la biodiversidad microbiana y la sostenibilidad del cultivo.

En conjunto, estas investigaciones evidencian que la calidad del suelo en sistemas cafeteros depende de la interacción entre sus propiedades químicas, físicas y biológicas, así como de las prácticas de manejo implementadas. Asimismo, resaltan la relevancia de integrar indicadores de fertilidad, biodiversidad microbiana y manejo sostenible del suelo para fortalecer la productividad y resiliencia de los agroecosistemas cafeteros en América Latina.

En los últimos años, la investigación sobre la calidad del suelo en sistemas cafeteros ha incorporado enfoques que integran indicadores fisicoquímicos, biológicos y ecológicos, con el fin de comprender mejor la sostenibilidad de los agroecosistemas y su relación con la productividad del cultivo.

Posteriormente, (Reyes Zubieta, Calderon Vargas, & Avellaneda Torres, 2024) analizaron indicadores de calidad del suelo en plantaciones de café bajo diferentes técnicas agrícolas, incluyendo prácticas sostenibles y convencionales. Los autores evaluaron parámetros edáficos y microbiológicos como pH, carbono orgánico, nitrógeno y fósforo, con el objetivo de identificar cambios en la calidad del suelo asociados a los sistemas de manejo. Los resultados evidenciaron que las prácticas agrícolas sostenibles favorecen la recuperación de la fertilidad del suelo y

promueven una mayor actividad biológica, lo cual contribuye a la resiliencia de los agroecosistemas cafeteros.

Las investigaciones recientes sobre suelos en sistemas cafeteros han ampliado el análisis de la calidad edáfica incorporando no solo parámetros fisicoquímicos tradicionales, sino también indicadores biológicos y su relación con la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Posteriormente, Zubieta, (2025) realizaron un estudio a nivel nacional en Colombia enfocado en la identificación de indicadores de calidad del suelo en plantaciones de café manejadas con técnicas de agricultura ecológica. Los autores evaluaron parámetros como pH, carbono orgánico, nitrógeno y fósforo disponible, demostrando que la implementación de prácticas agrícolas sostenibles contribuye a mejorar la estructura y fertilidad del suelo, además de favorecer procesos biogeoquímicos que fortalecen la resiliencia del agroecosistema cafetero.

Más recientemente, V. M. Apoorva Angadi, (2025) realizaron un estudio comparativo sobre la calidad del suelo y la diversidad microbiana en sistemas de cultivo de café orgánico y convencional en los Ghats Occidentales de la India, publicado en Scientific Reports. La investigación evidenció que los sistemas orgánicos presentan mayor diversidad microbiana y mejores condiciones estructurales del suelo en comparación con los sistemas convencionales. Estos hallazgos resaltan la influencia de las prácticas de manejo agrícola sobre la biodiversidad del suelo y su papel en el mantenimiento de la productividad y sostenibilidad de los sistemas cafeteros.

Más recientemente, un estudio publicado en la Revista Alfa (Acosta Trinidad, 2025) analizó la relación entre las características químicas del suelo y el desarrollo

vegetativo del cafeto en sistemas agroforestales en Perú. Los resultados mostraron que variables como el contenido de magnesio y carbono orgánico influyen significativamente en el crecimiento del cafeto, lo que evidencia la importancia de la fertilidad del suelo y su manejo adecuado para optimizar la productividad del cultivo en diferentes contextos agroecológicos.

En conjunto, estos estudios evidencian que la calidad del suelo en los cultivos de café está estrechamente relacionada con las prácticas de manejo agrícola, la biodiversidad edáfica y la implementación de estrategias sostenibles como el uso de biochar o sistemas de producción orgánica. Asimismo, resaltan la importancia de integrar indicadores fisicoquímicos y biológicos para evaluar de manera integral el estado del suelo y su capacidad para sostener la producción cafetera a largo plazo.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. EL SUELO COMO RECURSO NATURAL

El suelo es un recurso natural fundamental para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y para el desarrollo de actividades agrícolas. Está constituido por una combinación de minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos que interactúan continuamente. Además de proporcionar soporte físico para las plantas, interviene en el almacenamiento y circulación del agua, el reciclaje de nutrientes, la regulación del carbono y el mantenimiento de la biodiversidad (FAO, 2024).

Desde el punto de vista agrícola, el suelo constituye el medio en el cual se desarrolla gran parte del sistema radicular de las plantas y desde donde estas obtienen agua y nutrientes minerales. Sus características físicas, químicas y biológicas determinan, en buena medida, su capacidad para sostener la producción vegetal.

Por esta razón, el conocimiento del suelo representa una herramienta fundamental para planificar su uso, identificar limitaciones y formular prácticas de manejo adecuadas (Jaramillo, 2002).

En los sistemas cafeteros, las condiciones del suelo adquieren especial importancia, debido a que características como la textura, la porosidad, la densidad, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de agua condicionan el desarrollo de las raíces y la capacidad del cultivo para acceder a los nutrientes. Cenicafé señala que la sostenibilidad de la caficultura requiere conocer tanto las propiedades físicas como químicas y biológicas de los suelos de la región cafetera (Lince-Salazar, 2020).

2.1.2. CALIDAD, SALUD Y FERTILIDAD DEL SUELO

La calidad del suelo se relaciona con su capacidad para cumplir diferentes funciones dentro de un ecosistema, entre ellas sostener la productividad vegetal, regular el movimiento del agua, almacenar nutrientes, permitir el desarrollo de organismos y contribuir al equilibrio ambiental. Su evaluación no depende de una única variable, sino de la integración de indicadores físicos, químicos y biológicos sensibles a las condiciones naturales y a las prácticas de manejo (FAO, 2024).

La salud del suelo constituye un concepto estrechamente relacionado con su capacidad funcional. Entre los indicadores utilizados para evaluarla se encuentran la disponibilidad y retención de nutrientes, la presencia de oxígeno para las raíces, las condiciones de enraizamiento, la salinidad y la ausencia de sustancias tóxicas. Por esta razón, los análisis fisicoquímicos aportan información que permite reconocer posibles limitaciones del recurso y orientar decisiones de manejo (FAO, 2024).

La fertilidad del suelo corresponde específicamente a su capacidad para proporcionar a las plantas los nutrientes necesarios en cantidades y proporciones adecuadas. Sin embargo, la fertilidad no depende únicamente de la cantidad total de nutrientes presentes, puesto que factores como el pH, la materia orgánica, la humedad y la capacidad de intercambio catiónico determinan su disponibilidad. En caficultura, el análisis de suelo constituye una herramienta para establecer planes de nutrición de acuerdo con las necesidades reales del cultivo y reducir aplicaciones innecesarias de fertilizantes (Sadeghian, 2008).

2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas determinan la organización de las partículas, la distribución del espacio poroso, la circulación del agua y del aire y las condiciones mecánicas que encuentran las raíces durante su crecimiento. Su evaluación permite reconocer problemas relacionados con compactación, drenaje, infiltración, almacenamiento de agua y erosión. En la caficultura colombiana estas propiedades tienen especial importancia debido a la relación existente entre el suelo, el desarrollo radicular y la disponibilidad hídrica (Lince-Salazar, 2020).

Textura del suelo: Expresa la proporción relativa de arena, limo y arcilla que compone la fracción mineral del suelo. Su determinación tiene como finalidad conocer el comportamiento esperado del terreno frente a procesos como infiltración, drenaje, almacenamiento de humedad y retención de nutrientes. Los suelos con mayor proporción de partículas gruesas generalmente permiten una infiltración más rápida, mientras que aquellos con mayor contenido de partículas finas pueden presentar una mayor capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes (Jaramillo, 2002).

En sistemas cafeteros, la textura también permite comprender otras propiedades hidrofísicas, ya que se relaciona con la capacidad de almacenamiento de agua, la

densidad y la porosidad. Por esta razón, su determinación constituye uno de los parámetros básicos para interpretar el comportamiento físico del suelo (Lince-Salazar, 2020).

Densidad aparente: Expresa la relación entre la masa de suelo seco y el volumen total ocupado, incluidos los espacios porosos. Su determinación tiene como finalidad evaluar indirectamente el grado de compactación del suelo y las posibles restricciones que puede encontrar el sistema radicular.

La densidad aparente mantiene relación con la porosidad, la permeabilidad al agua y al aire, la capacidad de retención de humedad y la penetrabilidad de las raíces. Por ello, constituye un indicador importante para determinar si las condiciones estructurales del suelo pueden limitar el crecimiento del cafeto (Salamanca-Jiménez & Sadeghian, 2004).

Densidad real: Corresponde a la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen ocupado únicamente por estas partículas, sin considerar el espacio poroso. Su finalidad principal dentro de la caracterización física consiste en aportar información sobre la fase sólida del suelo y servir como variable para calcular la porosidad total al relacionarla con la densidad aparente (IGAC, 2021).

La interpretación conjunta de ambas densidades permite establecer de manera más completa las condiciones internas del suelo y la proporción de espacios disponibles para aire y agua.

Porosidad total: Representa la proporción del volumen total del suelo que se encuentra ocupada por espacios o poros. Estos espacios pueden contener agua o aire, razón por la cual su determinación permite evaluar las condiciones de aireación, infiltración, almacenamiento de agua y desarrollo radicular.

La porosidad está directamente relacionada con la densidad aparente y la densidad real. Un equilibrio adecuado entre los diferentes tipos de poros favorece la circulación del aire y del agua y permite condiciones apropiadas para las raíces y los microorganismos del suelo (IGAC, 2021; Lince-Salazar, 2020). El IGAC utiliza la porosidad total y las densidades entre los parámetros para interpretar la condición física de los suelos.

Humedad gravimétrica: Representa la cantidad de agua contenida en una muestra de suelo en relación con su masa seca. Su determinación tiene como finalidad cuantificar el contenido hídrico del suelo en el momento del muestreo y constituye una variable útil para estudiar la disponibilidad y dinámica del agua.

Este parámetro resulta relevante para el cultivo debido a que el agua interviene en la absorción y transporte de nutrientes y en diferentes procesos fisiológicos de la planta. Su interpretación debe efectuarse junto con características como textura, porosidad y capacidad de retención hídrica (Lince-Salazar, 2020).

Humedad volumétrica: Expresa el volumen de agua contenido respecto al volumen total del suelo. Su finalidad consiste en estimar qué proporción del espacio del suelo se encuentra ocupada por agua y facilitar el análisis del almacenamiento hídrico.

La determinación de este parámetro permite complementar la información obtenida mediante la humedad gravimétrica y relacionarla con las propiedades físicas del terreno. En los sistemas cafeteros, las propiedades hidrofísicas resultan importantes porque condicionan la cantidad de agua que permanece disponible para las plantas durante los periodos de menor precipitación (Lince-Salazar, 2020).

Lámina de agua: Permite expresar la cantidad de agua almacenada en una determinada profundidad de suelo mediante una altura equivalente en milímetros.

Su finalidad es facilitar la evaluación de la reserva hídrica que puede contribuir al abastecimiento de las plantas.

Esta variable integra información relacionada con la humedad y las características físicas del suelo. La capacidad de almacenamiento hídrico constituye un indicador relevante para la caficultura debido a que determina la posibilidad de amortiguar períodos con disminución de las precipitaciones (Lince-Salazar, 2020).

Color del suelo: Constituye una propiedad morfológica utilizada para describir el suelo y reconocer características relacionadas con materia orgánica, minerales, condiciones de drenaje y procesos de oxidación y reducción. Su determinación suele realizarse mediante las cartas de color Munsell, que permiten estandarizar la descripción de tonalidad, valor y croma (Munsell Color Services, 2009).

La finalidad del color dentro de una caracterización no consiste en establecer por sí solo la fertilidad del suelo, sino en complementar la interpretación de otras propiedades y proporcionar información descriptiva sobre sus condiciones y procesos de formación.

2.1.4. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Las propiedades químicas permiten conocer las condiciones relacionadas con la reacción del suelo, la concentración de sales, la retención de nutrientes y la disponibilidad de elementos esenciales para las plantas. Su análisis permite reconocer desequilibrios nutricionales y establecer posibles necesidades de fertilización o manejo.

El Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC indica que los análisis químicos permiten caracterizar los nutrientes y los compuestos orgánicos e inorgánicos

presentes en las muestras, información necesaria para orientar decisiones relacionadas con fertilidad y manejo agrícola (IGAC, 2024).

pH: Expresa el grado de acidez o alcalinidad del suelo. Su determinación tiene como finalidad conocer la reacción química del medio edáfico y evaluar su influencia sobre la disponibilidad de nutrientes y sobre diferentes procesos químicos y biológicos. En el cultivo de café, el pH constituye uno de los parámetros principales para la interpretación de la fertilidad, ya que valores demasiado bajos o elevados pueden modificar la disponibilidad de nutrientes y condicionar las recomendaciones de manejo de la acidez (Sadeghian, 2008).

Conductividad eléctrica: Permite estimar la concentración de sales solubles presentes en el suelo. Su finalidad consiste en identificar condiciones de acumulación de sales que puedan afectar la absorción de agua y el funcionamiento de las raíces.

La salinización constituye uno de los procesos asociados a la degradación química del suelo. Por ello, la conductividad eléctrica funciona como un indicador para reconocer posibles restricciones por exceso de sales y orientar medidas preventivas de manejo (FAO, 2024).

Materia orgánica: Está constituida por residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, microorganismos y sustancias húmicas. Su determinación tiene como finalidad estimar uno de los componentes más importantes de la fertilidad y calidad del suelo.

La materia orgánica participa en la formación y estabilidad de agregados, el almacenamiento de agua, la actividad biológica y la retención y liberación de

nutrientes. En la zona cafetera colombiana también guarda relación con la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre (Sadeghian, 2008).

Capacidad de intercambio catiónico: Representa la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes, entre ellos calcio, magnesio, potasio y amonio. Su determinación tiene como finalidad evaluar la capacidad potencial del suelo para conservar ciertos nutrientes y ponerlos a disposición de las plantas.

La CIC se relaciona con el contenido y tipo de arcillas y con la materia orgánica. Los suelos con baja capacidad de intercambio presentan una menor reserva de nutrientes intercambiables y pueden ser más susceptibles a pérdidas por lixiviación, aspecto que debe considerarse al definir estrategias de fertilización (Sadeghian, 2008).

Acidez intercambiable: Corresponde a una fracción de la acidez asociada a los sitios de intercambio del suelo, principalmente vinculada con hidrógeno y aluminio. Su finalidad consiste en complementar la evaluación de la acidez y determinar posibles restricciones químicas que no pueden establecerse únicamente mediante el pH.

En suelos cafeteros ácidos, este parámetro resulta útil para definir la necesidad y magnitud de prácticas de corrección de acidez, especialmente cuando existe presencia de aluminio intercambiable en concentraciones capaces de afectar el sistema radicular (Sadeghian, 2008).

Fósforo disponible: Es un macronutriente esencial relacionado con la transferencia de energía, el crecimiento radicular, la formación de nuevos tejidos y diferentes procesos metabólicos de las plantas. La finalidad de determinar fósforo

disponible consiste en conocer la fracción que potencialmente puede ser aprovechada por el cultivo.

La disponibilidad del fósforo está condicionada por las características químicas del suelo, especialmente su reacción y mineralogía. Por esta razón, su medición es fundamental dentro de los análisis de fertilidad utilizados para establecer planes de nutrición del café (Sadeghian, 2008).

Azufre disponible: Es un nutriente esencial que forma parte de aminoácidos, proteínas y enzimas. Su determinación tiene como finalidad conocer la cantidad disponible para cubrir las necesidades metabólicas de la planta y detectar posibles deficiencias.

La materia orgánica constituye una fuente importante de azufre, debido a que su mineralización permite liberar este elemento hacia formas aprovechables por la planta. Por ello, su interpretación debe relacionarse con la dinámica de la materia orgánica y demás propiedades químicas del suelo (Sadeghian, 2008).

Boro disponible: Es un micronutriente requerido en pequeñas cantidades y participa en procesos asociados con el crecimiento de tejidos jóvenes, la formación de paredes celulares y el desarrollo reproductivo de las plantas. La finalidad de su determinación consiste en reconocer tanto situaciones de deficiencia como concentraciones elevadas.

Debido a que los requerimientos de boro son reducidos y el intervalo entre deficiencia y exceso puede ser estrecho, su análisis permite evitar aplicaciones innecesarias y orientar una fertilización basada en las condiciones reales del suelo (Sadeghian, 2008).

2.1.5. CULTIVO DE CAFÉ

El café arábigo (*Coffea arabica* L.) constituye uno de los principales cultivos agrícolas de Colombia. Su crecimiento y productividad dependen de la interacción entre factores climáticos, características del material vegetal, prácticas agronómicas y condiciones del suelo.

El sistema radicular necesita un medio que permita suficiente aireación, disponibilidad de agua, penetración de las raíces y suministro equilibrado de nutrientes. Por esta razón, el manejo de la fertilidad no debe fundamentarse solamente en esquemas generales de fertilización, sino en la interpretación de análisis de suelo y en los requerimientos de cada etapa del cultivo (Sadeghian, 2008).

Las investigaciones de Cenicafé han permitido establecer criterios para orientar la nutrición de los cafetales colombianos según las condiciones particulares del suelo, de manera que la fertilización responda a necesidades identificadas analíticamente y contribuya a mejorar la eficiencia del uso de los nutrientes.

2.1.6. AGROECOSISTEMAS CAFETEROS

Un agroecosistema constituye un ecosistema modificado y manejado por el ser humano con fines productivos, en el cual interactúan componentes bióticos, abióticos y sociales. En una finca cafetera, el cultivo no funciona de manera aislada, sino que interactúa con el suelo, el agua, la vegetación asociada, los microorganismos, la fauna y las actividades humanas.

La sostenibilidad del agroecosistema cafetero depende de mantener un equilibrio entre productividad y conservación. Prácticas como la protección del suelo, el manejo de coberturas, el reciclaje de residuos orgánicos y el uso eficiente de

fertilizantes pueden contribuir simultáneamente al mantenimiento de la producción y de diferentes funciones ecológicas (González-González & Serna-Giraldo, 2018).

2.1.7. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Los servicios ecosistémicos corresponden a los beneficios que las personas obtienen directa o indirectamente de los ecosistemas. Entre ellos se encuentran los servicios de provisión, regulación, culturales y aquellos relacionados con el mantenimiento de los procesos ecológicos.

En los sistemas cafeteros pueden generarse servicios asociados con la provisión de alimentos, protección de microcuencas, regulación de flujos hídricos, conservación del suelo, captura de carbono, biodiversidad, polinización y reciclaje de nutrientes. La conservación de estos servicios depende de la interacción entre las prácticas productivas y los componentes naturales del agroecosistema (González-González & Serna-Giraldo, 2018).

2.1.8. SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PROVISIÓN

Los servicios de provisión corresponden a los productos materiales obtenidos de los ecosistemas y utilizados por la sociedad. En un agroecosistema cafetero, la producción de café y de otros productos vegetales asociados constituye una expresión de este tipo de servicio.

González-González y Serna-Giraldo (2018) incluyen específicamente el alimento vegetal, principalmente el café y sus cultivos asociados, dentro de los servicios de provisión identificados para los agroecosistemas cafeteros colombianos. En consecuencia, la capacidad productiva del sistema depende del mantenimiento de las condiciones ecológicas que permiten sostener la producción a través del tiempo.

2.1.9. RELACIÓN ENTRE EL SUELO Y EL SERVICIO DE PROVISIÓN

El suelo constituye la base biofísica que permite desarrollar el servicio ecosistémico de provisión agrícola. Su capacidad para suministrar agua y nutrientes, permitir el crecimiento de las raíces y mantener procesos de reciclaje de materia influye directamente en la posibilidad de producir biomasa y obtener productos agrícolas.

De esta manera, la degradación física o química del suelo puede reducir progresivamente su capacidad para sostener la producción. Por el contrario, el mantenimiento de condiciones adecuadas de fertilidad, estructura, cobertura y almacenamiento de agua permite conservar tanto la productividad como otras funciones ambientales del agroecosistema (FAO, 2018).

La evaluación fisicoquímica del suelo permite, por tanto, establecer un vínculo entre las condiciones del recurso y su capacidad para contribuir al servicio de provisión asociado al cultivo de café.

Manejo sostenible del suelo: Comprende el conjunto de prácticas orientadas a conservar o mejorar sus funciones físicas, químicas y biológicas sin comprometer su capacidad para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras.

Entre las prácticas de manejo sostenible aplicables a sistemas agrícolas se encuentran la conservación de coberturas, la prevención de la erosión, el manejo adecuado de residuos orgánicos, el uso racional de fertilizantes, la reducción de procesos de compactación y la evaluación periódica de las condiciones del suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2016).

Estas acciones son particularmente importantes en terrenos de ladera, debido a que la pendiente aumenta la susceptibilidad a la escorrentía y a la pérdida de partículas

y nutrientes. El conocimiento de las propiedades del suelo permite seleccionar prácticas ajustadas a sus condiciones y mejorar la toma de decisiones dentro de la finca.

2.2. MARCO GEOGRÁFICO

El trabajo de investigación se desarrolla en una finca cafetera ubicada en el municipio de Santa Bárbara, perteneciente al departamento de Santander, Colombia (Ver

Figura 1). Específicamente, el área de estudio corresponde a la Finca Santa Bárbara, en el sector Escuela Rural la Rayada, la cual cuenta con un clima que registra una temperatura promedio de 20°C, oscilando entre los 18°C y 24°C. En cuanto a las condiciones topográficas, la unidad productiva se caracteriza por presentar un relieve de ladera, donde el lote evaluado posee una pendiente pronunciada e irregular, además de exhibir una marcada heterogeneidad espacial.

Figura 1. Zona de muestreo



Fuente: Google Earth. Escuela Rural la Rayada. Santa Barbara, Santander, Colombia.

De acuerdo con el Esquema de Ordenamiento Territorial de Santa Bárbara, el municipio se localiza aproximadamente en las coordenadas 6°59'34" de latitud norte y 72°54'37" de longitud oeste** y presenta una extensión aproximada de 22.431,65

hectáreas. El territorio posee un marcado componente rural y se caracteriza por la presencia de zonas de vocación agropecuaria, agroforestal, forestal y áreas destinadas a protección ambiental (Municipio de Santa Bárbara, 2001).

El mismo instrumento de ordenamiento identifica sectores de la vereda La Rayada dentro de áreas que presentan importancia ambiental y establece para algunas zonas del municipio usos relacionados con sistemas silvopastoriles, agroforestales y conservación. Estas características evidencian la necesidad de que las actividades agrícolas desarrolladas en el territorio consideren simultáneamente la productividad y la conservación de los recursos naturales (Municipio de Santa Bárbara, 2001).

La ubicación del cultivo en un paisaje de ladera constituye un aspecto relevante para la presente investigación, debido a que la pendiente influye sobre la circulación superficial del agua y puede aumentar la susceptibilidad del suelo a la erosión y al transporte de nutrientes. Por esta razón, la caracterización fisicoquímica del terreno aporta información necesaria para formular prácticas de manejo ajustadas a las condiciones particulares del área de estudio.

2.3. MARCO LEGAL

La gestión y conservación del suelo en Colombia se encuentra respaldada por disposiciones constitucionales, legales y reglamentarias que establecen responsabilidades relacionadas con su uso sostenible y la prevención de su degradación.

La Constitución Política de Colombia de 1991, en su artículo 79, reconoce el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y establece el deber del Estado de proteger la diversidad y la integridad ambiental. A su vez, el artículo

80 determina que corresponde al Estado planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales con el propósito de garantizar su desarrollo sostenible, conservación y restauración (Constitución Política de Colombia, 1991).

El Decreto-Ley 2811 de 1974, mediante el cual se expidió el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, contiene disposiciones específicas sobre los suelos agrícolas. El artículo 178 determina que los suelos deben utilizarse de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos, mientras que el artículo 179 establece que su aprovechamiento debe realizarse de manera que se mantengan su integridad física y capacidad productora. Asimismo, los artículos 180 y 181 contemplan la aplicación de prácticas de conservación y la prevención de procesos como erosión, degradación y salinización (Presidencia de la República de Colombia, 1974).

La Ley 99 de 1993 establece los principios generales de la política ambiental colombiana y organiza el Sistema Nacional Ambiental —SINA—. Esta norma incorpora el concepto de desarrollo sostenible y establece que el aprovechamiento de los recursos naturales debe realizarse sin deteriorar la base natural que sostiene el bienestar de las generaciones actuales y futuras (Congreso de Colombia, 1993).

El Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece obligaciones específicas relacionadas con la protección y conservación del suelo. Entre ellas se encuentran utilizarlo de acuerdo con sus condiciones, mantener su capacidad productiva y aplicar técnicas que eviten procesos de compactación, erosión, salinización, contaminación y degradación (Presidencia de la República de Colombia, 2015). Estas disposiciones se relacionan directamente con el presente proyecto, cuyo propósito contempla evaluar el recurso suelo y formular estrategias para su manejo sostenible.

Los procesos de caracterización fisicoquímica, muestreo de campo y análisis analítico de laboratorio se rigen por los manuales de métodos estandarizados del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014).

Los criterios agronómicos, rangos de suficiencia nutricional y requerimientos técnicos del cultivo de café se fundamentan en las directrices establecidas por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).

El proyecto está enfocado en garantizar una gestión ecoeficiente orientada a la protección del recurso edáfico, siendo consecuente con la preservación del medio ambiente y la prevención de su degradación mediante estrategias técnicas sustentables.

2.4. MARCO AMBIENTAL

El recurso suelo desempeña múltiples funciones ambientales que superan su papel como soporte para la producción agrícola. Participa en la regulación del agua, el reciclaje de nutrientes, el almacenamiento de carbono, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de la productividad de los ecosistemas. En consecuencia, su degradación puede disminuir tanto la capacidad productiva de las tierras como la prestación de servicios ecosistémicos (MADS, 2016).

La Política para la Gestión Sostenible del Suelo, formulada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, reconoce la necesidad de avanzar en el conocimiento, conservación, restauración y manejo sostenible del suelo colombiano. Esta política promueve la generación de información sobre su estado, el monitoreo de sus propiedades y la implementación de prácticas que prevengan su degradación (MADS, 2016).

Desde una perspectiva ambiental, la caracterización fisicoquímica realizada en el predio permite reconocer condiciones que pueden influir en la regulación hídrica, la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad del suelo. Este conocimiento adquiere mayor importancia debido a que el cultivo se encuentra localizado en un terreno de ladera, donde la escorrentía puede transportar partículas del suelo y nutrientes hacia sectores inferiores o cuerpos de agua.

La erosión constituye uno de los principales procesos de degradación asociados a terrenos inclinados. Su intensidad está condicionada por factores como pendiente, cobertura vegetal, propiedades del suelo y características de la precipitación. Mantener una adecuada cobertura y aplicar prácticas de conservación contribuye a disminuir el impacto de las gotas de lluvia y la velocidad de la escorrentía superficial (FAO, 2024).

El manejo de nutrientes también presenta una dimensión ambiental. Las aplicaciones de fertilizantes que exceden las necesidades reales del sistema pueden aumentar el riesgo de pérdidas por lixiviación o escorrentía, mientras que una fertilización basada en análisis de suelo permite utilizar los insumos de forma más eficiente. De esta manera, la evaluación fisicoquímica contribuye tanto a la productividad como a la prevención de impactos sobre otros componentes ambientales (Sadeghian, 2008).

Los residuos orgánicos generados por podas y otras actividades de manejo también pueden incorporarse dentro de estrategias sostenibles mediante procesos de transformación controlada, siempre que su utilización considere las condiciones del suelo y las necesidades del cultivo. El aprovechamiento adecuado de estos materiales permite favorecer el reciclaje de nutrientes y reducir la disposición inadecuada de biomasa.

Finalmente, los agroecosistemas cafeteros pueden aportar diferentes servicios ecosistémicos cuando las actividades productivas se integran con estrategias de conservación. Entre ellos se encuentran la provisión de alimentos, la protección del suelo y de microcuencas, el reciclaje de nutrientes, la conservación de biodiversidad y la regulación hídrica. Por esta razón, el fortalecimiento del servicio de provisión asociado al cultivo de café debe plantearse sin separar la productividad de la conservación del recurso suelo (González González & Serna Giraldo, 2018).

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo se empleó una investigación de tipo descriptiva, con un enfoque cuantitativo, orientada a caracterizar las propiedades físicas y químicas del suelo de una finca cafetera ubicada en el municipio de Santa Bárbara, Santander. La investigación fue de carácter no experimental, debido a que las condiciones naturales del suelo no fueron manipuladas, sino que se realizó la observación, muestreo y análisis de sus características en las condiciones existentes del área de estudio. El enfoque cuantitativo se fundamentó en la obtención de datos numéricos mediante la medición de diferentes variables edáficas, cuyos resultados fueron organizados, analizados y comparados con criterios y rangos de referencia para determinar las condiciones del suelo y su aptitud para el establecimiento y manejo del cultivo de café.

Como método de investigación se empleó principalmente el método inductivo, partiendo de la observación directa del área de estudio y de la recolección de datos obtenidos a partir de las submuestras de suelo, para posteriormente establecer conclusiones generales sobre el estado del recurso y su aptitud agrícola. De manera complementaria, se aplicó un método analítico, mediante el cual se estudiaron de

forma individual las diferentes propiedades físicas y químicas determinadas en laboratorio, permitiendo integrar posteriormente los resultados en un diagnóstico técnico de las condiciones del suelo y en la formulación de recomendaciones para su adecuado manejo y mejoramiento.

Para la obtención de la información se emplearon técnicas de observación directa, muestreo de campo y análisis fisicoquímico de laboratorio.

El desarrollo del proyecto se estructuró en tres etapas:

Etapas 1: Planeación y reconocimiento del entorno, se realizó la identificación y delimitación cartográfica del predio, el reconocimiento del área de estudio y la selección del lote destinado al cultivo de café, además de la preparación de los sitios de muestreo mediante la limpieza de la superficie y retiro de material vegetal.

Etapas 2: Ejecución y recolección de muestras, se llevó a cabo la obtención de 20 submuestras de suelo a una profundidad de 25 cm, seguida de los procesos de mezcla, homogenización y cuarteo para la conformación de una muestra compuesta destinada al análisis de laboratorio

Etapas 3: Análisis y diagnóstico, se consolidaron e interpretaron los resultados obtenidos en laboratorio, realizando una comparación con los requerimientos y criterios de referencia asociados al cultivo de café. A partir de esta interpretación se estableció el diagnóstico de las condiciones del suelo y se formularon recomendaciones técnicas orientadas a su manejo, conservación y mejoramiento para favorecer el desarrollo del cultivo.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO CAFETERO

La ejecución del proyecto inició con una visita de reconocimiento técnico al predio seleccionado en el municipio de Santa Bárbara, Santander (Ver **Figura 2**), con el propósito de identificar las condiciones topográficas y delimitar el lote establecido con el cultivo joven de café (*Coffea arabica*). Al constatar que la unidad de producción presentaba un relieve característico de ladera con pendiente pronunciada y una marcada heterogeneidad espacial, se determinó la viabilidad de implementar un muestreo asistemático. Esta estrategia de muestreo se seleccionó para asegurar la representatividad de la muestra final, permitiendo capturar de manera integral la variabilidad de las propiedades edáficas a lo largo del terreno.

Figura 2. Ubicación finca cafetera



Fuente: Google Earth. Escuela Rural la Rayada. Santa Barbara, Santander, Colombia.

Una vez delimitada el área de aproximadamente 1,565.26 m², se procedió con la recolección del material edáfico en campo. La delimitación del área permitió establecer la unidad de muestreo correspondiente al terreno destinado para el establecimiento del cultivo de café. Para la obtención de una muestra compuesta representativa, se seleccionaron 20 puntos de muestreo distribuidos de manera dispersa dentro del lote, dicha cantidad se estableció considerando las condiciones

del terreno y, particularmente, su condición de pendiente, debido a que este puede generar variaciones en las características del suelo dentro de una misma área. Por esta razón, se buscó abarcar diferentes sectores del lote y obtener una mayor representatividad de las condiciones edáfica presentes. En cada uno de los 20 puntos de muestreo distribuidos de forma dispersa en el lote, el número de puntos de muestreo se estableció considerando el área objeto de estudio, sus características de homogeneidad y los lineamientos técnicos establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para el muestreo de suelos con fines agropecuarios.

De acuerdo con las recomendaciones del IGAC, cuando el terreno presenta características relativamente homogéneas, puede considerarse como una unidad de muestreo y, para su caracterización, se recomienda tomar aproximadamente entre 15 y 20 submuestras distribuidas a lo largo y ancho del área, las cuales permiten obtener una muestra representativa del suelo (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2021).

En concordancia con este procedimiento, para el presente estudio se establecieron 20 puntos de muestreo, buscando garantizar una adecuada representación espacial del área destinada al cultivo de café y reducir el efecto de la heterogeneidad natural del suelo sobre los resultados analíticos. Por tanto, la selección de los 20 puntos no fue arbitraria, sino que respondió a criterios técnicos de representatividad espacial y a las recomendaciones metodológicas del IGAC para el muestreo de suelos.

Se realizó una limpieza superficial previa para retirar de forma selectiva la cobertura vegetal y la hojarasca acumulada (Ver Figura 3), evitando así la incorporación de materia orgánica fresca que pudiese alterar los análisis químicos posteriores. Posteriormente, empleando herramientas como el machete y la pala debidamente

limpias, se efectuó una apertura en forma de "V" hasta alcanzar una profundidad uniforme de 25 cm (Ver

Figura 4). De una de las paredes laterales de la excavación se extrajo una porción de suelo de aproximadamente 3 cm de espesor, descartando los bordes laterales para evitar contaminación por arrastre (Ver Figura 5).

Figura 3. Retiro de capa vegetal



Fuente: Autores

Figura 4 Excavación de 25cm



Fuente: Autores

Figura 5. Muestra cortada de suelo



Fuente: Autores

Las 20 submuestras obtenidas en el recorrido fueron recolectadas en un balde plástico limpio y sometidas a un proceso manual de mezcla y homogenización (Ver Figura 6). Mediante la técnica de cuarteo, se redujo el volumen del material hasta consolidar una muestra compuesta representativa con un peso aproximado de 2 kg. Finalmente, el suelo seleccionado fue empacado en bolsas plásticas con cierre hermético y debidamente rotulado con datos de información general de la muestra (fecha de recolección, ubicación geográfica, profundidad del muestreo y tipo de sistema productivo) (Ver Figura 7) para garantizar su conservación durante el traslado.

Figura 6. Mezcla de muestras



Fuente: Autores.

Figura 7. Información General de la muestra

INFORMACIÓN GENERAL
Fecha de toma: 28 de febrero 2026
Fecha de entrega: 5 marzo 2026
Solicitada por: Javier Ascanio
Tomada por: Daniel Medina Carrillo, Cielo Sepúlveda Quintero
Análisis solicitado: Análisis de caracterización física y química de suelos
Responsable/Entidad: Unidades Tecnológicas de Santander
Persona de contacto: Daniel Medina Carrillo
Dirección: Av. Los Estudiantes #9-82, Bucaramanga, Santander
Teléfono: 3138964806
Usuario/Propietario: Javier Ascanio
Finca/Predio: Finca Santa Barbara
Municipio: Santa Bárbara
Departamento: Santander
Clima: 20°C
Temperatura promedio: 18°C-24°C
Topografía: Ladera pronunciada/ irregular
Profundidad muestreo cm: 25 cm
Cultivo actual: café
Cultivo anterior: sin cultivar
Antecedentes del lote: uso de pollinaza/gallinaza

Fuente: Autores

4.2. RELACIÓN SUELO–PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ

Una vez trasladada la muestra compuesta al laboratorio de suelos de las Universitaria Tecnológica de Santander (UTS), se dio inicio a la fase experimental mediante la aplicación de protocolos estándar de laboratorio. El proceso comenzó con el acondicionamiento previo del material edáfico, el cual consistió en un secado al aire durante 5 días, a temperatura ambiente, protegido de la luz solar directa y de contaminantes externos, hasta lograr la estabilización de su peso. Posteriormente, la preparación de la muestra esta fue sometida a un proceso de tamizaje sucesivo a través de mallas de acero inoxidable número 10 y número 60, obteniendo de esta manera la fracción de tierra fina seca al aire requerida. Los parámetros físicoquímicos cuantificados en la muestra fueron:

Color: El color del suelo se determinó mediante comparación con los patrones establecidos en la tabla Munsell, considerando las variaciones de matiz (10YR), claridad (Marrón amarillento grisáceo) y pureza (6/2). Para el procedimiento se utilizaron dos condiciones de la muestra: suelo seco, previamente tamizado con malla #60, y suelo sin tamizar, considerado como suelo húmedo. Se tomaron pequeñas cantidades de cada muestra y se compararon individualmente con los patrones de la tabla Munsell hasta identificar el color correspondiente a cada condición.

%HG (Humedad gravimétrica): La humedad gravimétrica se determinó mediante el método gravimétrico. Para ello, se pesaron 100 g de muestra de suelo húmedo, los cuales se llevaron a una estufa a 105 °C durante varias horas hasta su secado. Posteriormente, la muestra se retiró y se realizó un segundo pesaje para determinar la pérdida de masa asociada al contenido de agua. Finalmente, con los pesos obtenidos se aplicó la fórmula establecida (Ver Ecuación 1) para calcular el porcentaje de humedad gravimétrica del suelo.

$$\%HG = \frac{\text{peso muestra húmeda} - \text{peso muestra seca}}{\text{peso muestra seca}} * 100 \quad \text{Ecuación 1. Humedad gravimétrica}$$

%HV (Humedad volumétrica): La humedad volumétrica se determinó mediante la relación entre el contenido de humedad gravimétrica y la densidad aparente del suelo. Para ello, se multiplicaron los valores previamente obtenidos de humedad gravimétrica (%) y densidad aparente (g/mL), aplicando la relación establecida para obtener el porcentaje de humedad volumétrica del suelo.

Porosidad total: La porosidad total del suelo se determinó a partir de los valores previamente obtenidos de densidad real y densidad aparente. Con estos resultados se aplicó la fórmula establecida en el procedimiento estándar de laboratorio (Ver Ecuación 2) para calcular el porcentaje de porosidad total de la muestra.

$$\%Pt = \left[1 - \frac{(Da)}{(Dr)} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 2. Porosidad total}$$

Densidad aparente: Se determinó utilizando un vaso precipitado como recipiente de medición. Inicialmente, se pesó la probeta con 30 mL de agua y posteriormente se adicionaron 5 g de muestra de suelo. Se registró el volumen desplazado por la muestra y, a continuación, se realizó un nuevo pesaje. Finalmente, con los datos de masa y volumen obtenidos se aplicó la fórmula establecida en el procedimiento (Ver Ecuación 3) para calcular la densidad aparente del suelo.

$$Dr = \frac{\text{Peso probeta con suelo} - \text{probeta vacía}}{\text{volumen desplazado}} \quad \text{Ecuación 3. Densidad aparente}$$

Densidad real: La densidad aparente del suelo se determinó mediante el método del picnómetro, inicialmente se pesó un vaso una probeta con 30 mL de agua y posteriormente se pesó con 5g de suelo, se observa la cantidad de agua desplazada

y se realizó nuevamente el pesaje, se anotaron los datos y mediante la fórmula (Ver Ecuación 4) se determinaron los resultados.

$$Dr = \frac{\text{Peso de la muestra}}{(\text{volumen final} - \text{volumen inicial})} \quad \text{Ecuación 4. Densidad real}$$

Lámina de agua: La lámina de agua se determinó mediante la relación entre la humedad gravimétrica y la profundidad de muestreo, correspondiente a 25 cm. Para ello, se relacionaron ambos valores y el resultado se expresó en milímetros (mm), obteniendo así la lámina de agua contenida en el suelo.

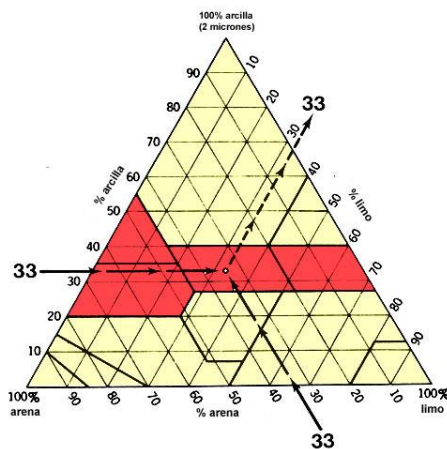
Textura: Se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, utilizando hexametafosfato de sodio como agente dispersante. Se pesaron 50 g de suelo previamente tamizado con malla #10 y se transfirieron a un Erlenmeyer, donde se adicionaron 100 mL de agua potable y 10 mL de hexametafosfato de sodio. La mezcla se agitó durante 10 minutos y posteriormente se transfirió a una probeta, completando el volumen hasta 1130 mL con agua potable. Luego, la suspensión se agitó enérgicamente durante 1 minuto mediante un pistón y se realizó la primera lectura con el hidrómetro (L1). La suspensión se dejó en reposo durante 2 horas, tras lo cual se efectuó la segunda lectura (L2).

Con las lecturas obtenidas se calcularon las fracciones texturales mediante las fórmulas expresadas en la Ecuación 5. Finalmente, los porcentajes obtenidos se ubicaron en el diagrama triangular de texturas o diagrama de Lyon para determinar la clase textural del suelo.

Ecuación 5. Ecuaciones de textura

$$\begin{aligned} \%Arena &= 100 - 2L1 \\ \%Arcilla &= 2 * L2 \\ \%Limo &= 100 - (\%Arena + \%Arcilla) \end{aligned}$$

Figura 8. Triángulo de textura



Fuente: www.fao.org

pH: Se determinó mediante el método potenciométrico, utilizando un pH-metro previamente calibrado. Para ello, se pesaron 30 g de muestra de suelo tamizada con malla #10 y se transfirieron a un vaso de precipitado. Posteriormente, se midieron 30 mL de agua destilada, que fueron adicionados a la muestra, y la suspensión se agitó durante 10 minutos. Luego, el recipiente se tapó para evitar el intercambio excesivo de CO_2 y se dejó en reposo durante 1 hora. Finalmente, la suspensión se agitó suavemente y se realizó la lectura del pH con el equipo previamente calibrado.

Conductividad eléctrica: Se determinó mediante conductivimetría en el extracto de saturación, con el propósito de evaluar la concentración de sales disueltas en el suelo. Para ello, se pesaron 50 g de muestra de suelo previamente tamizada con malla #10 y se transfirieron a un vaso de precipitado. Posteriormente, se midieron 50 mL de agua destilada, se adicionaron a la muestra y se agitó durante 10 minutos. La suspensión obtenida se filtró y el filtrado se introdujo en la celda del conductímetro para realizar la lectura de conductividad eléctrica.

Fósforo disponible: Se determinó mediante el método colorimétrico: Bray II. Para ello, se pesaron 2,85 g de muestra de suelo previamente tamizada con malla #10 y

se adicionaron 20 mL de solución extractora de fósforo en un vaso de reacción. La mezcla se tapó y se agitó durante 40 segundos. Posteriormente, se filtró en un Erlenmeyer utilizando un embudo y papel filtro, obteniendo el extracto correspondiente a la muestra problema. De manera complementaria, se preparó una curva de calibración utilizando tubos de ensayo con diferentes concentraciones de la solución extractora. A partir de la curva obtenida, se determinó la concentración de fósforo mediante regresión lineal.

Azufre disponible: Se determinó mediante el método turbidimétrico por espectrofotometría. Para ello, se pesaron 10 g de muestra de suelo previamente tamizada con malla N.º 10 y se adicionaron 25 mL de solución extractora de B y S. La mezcla se agitó durante 10 minutos y posteriormente se filtró en un Erlenmeyer, obteniendo el extracto correspondiente a la muestra problema. Para la elaboración de la curva de calibración, se adicionaron 10 mL de solución ácida y 4 mL de reactivo turbidimétrico en diferentes tubos de ensayo; las soluciones se agitaron y se dejaron en reposo durante 20 minutos. Finalmente, mediante la curva de calibración y la aplicación de regresión lineal, se determinó la concentración de azufre disponible en la muestra.

Boro disponible: Se determinó mediante el método colorimétrico: Azometina –H por espectrofotometría. Para ello, se pesaron 10 g de muestra de suelo previamente tamizada con malla N.º 10 y se adicionaron 25 mL de solución extractora de B y S. La mezcla se agitó durante 10 minutos y posteriormente se filtró en un Erlenmeyer, obteniendo el extracto correspondiente a la muestra problema. Para la elaboración de la curva de calibración, se prepararon soluciones con concentraciones de 0,4; 0,8 y 1,2 ppm, a las cuales se adicionaron 4 mL de solución buffer y 2 mL de azometina H. Las soluciones se agitaron y se dejaron en reposo durante 40 minutos para permitir el desarrollo de la coloración. Finalmente, las muestras se analizaron

en el espectrofotómetro para obtener la curva de calibración y, mediante regresión lineal, determinar la concentración de boro disponible en la muestra de suelo.

Capacidad de intercambio catiónico: Se determinó mediante el método de titulación. Para ello, se pesaron 5 g de muestra de suelo previamente tamizada con malla N.º 10 y se transfirieron a un Erlenmeyer. Posteriormente, se adicionaron 25 mL de acetato de amonio 1 N y neutro, y la mezcla se agitó durante 30 segundos. Luego, se filtró y se eliminó el exceso de amonio mediante 50 mL de alcohol antiséptico, distribuidos en cinco porciones de 10 mL. El filtrado obtenido se transfirió a otro Erlenmeyer y se realizó un segundo lavado con 50 mL de cloruro de sodio (NaCl) al 10 %, igualmente distribuidos en cinco porciones de 10 mL. Al filtrado final se adicionaron 3 gotas de fenolftaleína y 10 mL de formaldehído, para posteriormente realizar la titulación con NaOH 0,1 N hasta obtener una coloración rosa pálido. Finalmente, con el volumen de titulante obtenido se realizaron los cálculos correspondientes mediante la fórmula establecida (Ver Ecuación 6) para determinar la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

Ecuación 6. Capacidad de intercambio Catiónico

$$CIC \left(\frac{meq}{100 g} \right) = \frac{(Vol NaOH inicial - Vol NaOH final) * N NaOH}{peso de la muestra} * 100$$

Materia Orgánica: Se determinó mediante el método colorimétrico. Inicialmente, se preparó una solución de dicromato de potasio, para lo cual se pesaron y secaron 49,04 g a 103 °C, posteriormente se disolvieron y aforaron a 1 L. Asimismo, se preparó una solución de sacarosa, disolviendo 50 g y aforando a 1 L con agua destilada. A partir de esta solución se prepararon diferentes concentraciones en mg/L para elaborar la curva de calibración. A los Erlenmeyer que contenían las

soluciones de calibración se les adicionaron 2 mL de la solución correspondiente y se llevaron a la estufa a 105 °C hasta alcanzar un secado casi completo.

Para la preparación de la muestra problema, se pesaron 0,5 g de suelo previamente tamizado con malla N.º 60 y se transfirieron a un Erlenmeyer. Posteriormente, a la muestra y a las soluciones de calibración se les adicionaron 10 mL de dicromato de potasio 1 N y se agitaron durante 1 minuto. Luego, se agregaron 20 mL de H₂SO₄ a cada Erlenmeyer y se dejó reaccionar durante 3 horas. Transcurrido este tiempo, se adicionaron 70 mL de agua destilada y se realizaron las lecturas mediante espectrofotometría. Finalmente, a partir de las lecturas obtenidas y la curva de calibración, se realizaron los cálculos correspondientes mediante la fórmula establecida (Ver

Ecuación 7) para determinar el contenido de materia orgánica del suelo.

Ecuación 7. Materia orgánica

$$\%CO = \frac{(ABS \pm b) * 100 * 1.333}{\text{peso de la muestra} * m * 1000}$$

$$\%MO = \frac{(ABS \pm b) * 1,333 * 1,724}{m * Wm * 1000} * 100$$

Acidez intercambiable: Se determinó mediante el método de titulación. Para ello, se pesaron 5 g de muestra de suelo previamente tamizada con malla N.º 10 y se transfirieron a un vaso de precipitado. Posteriormente, se adicionaron 25 mL de KCl 1 N y se agitó durante 10 minutos. La suspensión se filtró y se completó el volumen del filtrado hasta 60 mL con KCl 1 N, para luego transferirlo a un Erlenmeyer. Al filtrado se le adicionaron 3 a 5 gotas de fenolftaleína al 0,1 % y se tituló con NaOH 0,1 N hasta obtener una coloración rosa pálido. Finalmente, con los datos obtenidos se realizaron los cálculos mediante la fórmula establecida (Ver Ecuación 8) para determinar el porcentaje de acidez intercambiable del suelo.

$$Acidez = \frac{VNaOH * NNaOH}{wm} * 100 \quad \textbf{Ecuación 8. Acidez intercambiable}$$

4.3. ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO Y MANEJO DEL SUELO

La última etapa del desarrollo del proyecto se centró en la compilación, ordenamiento e interpretación de los datos de parámetros fisicoquímicos. Los valores obtenidos para cada propiedad física y química fueron tabulados y contrastados sistemáticamente con los rangos de suficiencia y criterios agronómicos establecidos para el cultivo de café (*Coffea arabica*) en Colombia por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Sadeghian, 2008; Cenicafe, 2018). Este análisis comparativo permitió estructurar un diagnóstico del recurso suelo del predio, mediante el cual se identificaron tanto las potencialidades físicas del terreno (textura franco-arenosa y niveles óptimos de porosidad) como las limitaciones químicas críticas que restringen su productividad, destacando el déficit severo de fósforo disponible y azufre, la baja capacidad de intercambio catiónico y la reacción moderadamente ácida del suelo. Una vez identificadas las falencias que tenía el terreno se formularon las estrategias para mejorar las condiciones del terreno.

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL SUELO CAFETERO

De acuerdo al procedimiento ejecutado en el desarrollo del trabajo se logró obtener una muestra representativa de todo el sitio del muestreo. Se definió como unidad de muestreo un lote de cultivo de café joven en relieve de ladera, por ende, el muestreo fue asistemático, debido a la heterogeneidad y pendiente pronunciada del terreno.

Inicialmente se realizó el proceso de tamizaje, este permite la obtención de la tierra fina seca al Aire. Este procedimiento es fundamental para garantizar la homogeneidad de la muestra y eliminar interferencias (como raíces o gravas) en las determinaciones posteriores. Para la caracterización del suelo, se determinaron sus propiedades físicas y químicas siguiendo los manuales de métodos analíticos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014). En el componente físico, la textura se definió mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos con hexametafosfato de sodio, clasificándose según el triángulo de la USDA. Las relaciones de masa y volumen se evaluaron estableciendo la densidad aparente por el método gravimétrico y la densidad real mediante el picnómetro de agua, lo que permitió calcular la porosidad total. Asimismo, el color (en estados de humedad y sequedad) se contrastó con las cartas Munsell y la humedad se cuantificó por el método gravimétrico. Por otro lado, en el componente químico, el pH se determinó con un potenciómetro calibrado y la conductividad eléctrica mediante conductivimetría. Los contenidos de fósforo, azufre, boro y materia orgánica se analizaron por colorimetría y turbidimetría espectrofotométrica, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la acidez intercambiable se cuantificaron por titulación. Los valores obtenidos a partir de la aplicación de estos métodos se consolidan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra de suelo se efectuaron en el Laboratorio de la Institución Universitaria Tecnológica de Santander y se realizaron por duplicado, aplicando los procedimientos analíticos establecidos para cada determinación.

Los análisis fisicoquímicos se realizaron por duplicado como mecanismo de control de la consistencia de las determinaciones. Para efectos de la presentación e interpretación de los resultados, se reportó el promedio aritmético de las dos

determinaciones realizadas para cada parámetro, conservando los valores individuales obtenidos como datos primarios del estudio. Esta forma de reporte permite obtener un valor representativo de la determinación analítica y evitar que un resultado individual sea utilizado de manera aislada para la caracterización del suelo.

En concordancia con las prácticas de control analítico empleadas en el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, que contempla procedimientos específicos para el seguimiento de duplicados, el uso de réplicas constituye un mecanismo de control de la calidad de los resultados (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2023). Por tanto, el resultado presentado para cada parámetro corresponde al promedio de las dos determinaciones, mientras que los resultados individuales se mantienen como soporte técnico del análisis (Ver Tabla 1).

Tabla 1.
Resultados de la caracterización fisicoquímica de la muestra del suelo

Parámetro	Valor obtenido	Unidades
Color	Malla 60(suelo seco): 10YR 6/2: marrón amarillento grisáceo Suelo húmedo: 7,5YR 5/2: marrón grisáceo	---
%HG (Humedad gravimétrica)	23,32	%
%HV (Humedad volumétrica)	24	%
Porosidad total	59,1	%
Densidad aparente	1,03	g/mL
Densidad real	2,5	g/mL
Lámina de agua	60	mm
Textura	%Arena:74% %Arcilla:2% %Limo:24% Franco Arenosa	%
pH	5,10	---
Conductividad eléctrica	144,3	µS/cm
Fósforo disponible	0,934	ppm
Azufre disponible	2,914	ppm
Boro disponible	2,1822	ppm
Capacidad de intercambio catiónico	4	meq/100g
Materia Orgánica	21,22	%

Acidez Intercambiable	6	meq/100g
-----------------------	---	----------

Nota: Datos experimentales cuantificados a partir de la muestra compuesta del lote evaluado, contrastados con los manuales de fertilidad cafetera de Cenicafé.

Los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra de suelo se efectuaron en el Laboratorio de la Institución Universitaria Tecnológica de Santander y se realizaron por duplicado, aplicando los procedimientos analíticos establecidos para cada determinación.

Los análisis fisicoquímicos se realizaron por duplicado como mecanismo de control de la consistencia de las determinaciones. Para efectos de la presentación e interpretación de los resultados, se reportó el promedio aritmético de las dos determinaciones realizadas para cada parámetro, conservando los valores individuales obtenidos como datos primarios del estudio. Esta forma de reporte permite obtener un valor representativo de la determinación analítica y evitar que un resultado individual sea utilizado de manera aislada para la caracterización del suelo. En concordancia con las prácticas de control analítico empleadas en el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, que contempla procedimientos específicos para el seguimiento de duplicados, el uso de réplicas constituye un mecanismo de control de la calidad de los resultados (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2023). Por tanto, el resultado presentado para cada parámetro corresponde al promedio de las dos determinaciones, mientras que los resultados individuales se mantienen como soporte técnico del análisis.

Es importante precisar que el alcance del proyecto correspondió a un estudio de investigación orientado a la caracterización fisicoquímica y valoración de la calidad del suelo para el cultivo de café, y no a un proceso de validación o acreditación de los métodos analíticos empleados. En este sentido, se establece que la repetibilidad y la reproducibilidad pueden constituir características de desempeño a considerar en la validación de métodos, particularmente cuando se trata de métodos no

normalizados, desarrollados por el laboratorio, modificados o utilizados fuera de su alcance previsto. Asimismo, la norma contempla los ensayos replicados como uno de los mecanismos posibles para el seguimiento de la validez de los resultados.

Por tanto, para los objetivos y alcance de esta investigación se consideró técnicamente pertinente la realización de dos determinaciones independientes (duplicados) por parámetro, como estrategia de control de consistencia de los resultados. La realización de los análisis por triplicado no constituye, por sí misma, un requisito general para la caracterización fisicoquímica de un suelo, salvo que dicho número de réplicas haya sido establecido previamente por el protocolo específico del método, el diseño experimental o los objetivos estadísticos del estudio.

En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del alcance y propósito del proyecto de investigación, como una caracterización fisicoquímica del suelo, y no como resultados derivados de un proceso formal de validación o acreditación del método analítico.

5.2. RELACIÓN SUELO-PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ

De acuerdo a la caracterización obtenida de los parámetros fisicoquímicos se pudo determinar que, el análisis físico del suelo evidenció una densidad aparente de 1,03 g/mL, indicando una estructura suelta y sin problemas de compactación. Esta potencialidad favorece una porosidad total del 59,1%, garantizando un intercambio gaseoso eficiente y un desarrollo radicular óptimo para el cafeto (Jaramillo, 2002). La textura franco-arenosa facilita el drenaje interno; sin embargo, presenta una lámina de agua disponible limitada (60 mm), lo que sugiere una baja capacidad de retención hídrica ante periodos críticos de sequía. El color marrón grisáceo en

estado húmedo refleja procesos de oxidación y la incorporación de enmiendas orgánicas como la gallinaza, mejorando la agregación de partículas (IGAC, 2014).

En el componente químico, el pH se estableció en 5,10 (moderadamente ácido), situándose dentro del rango óptimo para la disponibilidad de nutrientes en el cultivo de café. La conductividad eléctrica (144,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) confirmó una condición no salina, descartando riesgos de toxicidad radicular. Se cuantificó un 21,22% de materia orgánica, superando el rango óptimo del 5% al 12% (Sadeghian, 2008), lo cual contrasta con una baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 4 meq/100g frente al ideal de 10 meq/100g, sugiriendo una acumulación de biomasa poco humificada. Respecto a la acidez intercambiable (6 meq/100g), la ausencia total de aluminio descartó riesgos de fitotoxicidad (Sadeghian, 2008; Carrillo, 2015), determinándose que dicha acidez deriva de la misma descomposición orgánica. El boro disponible alcanzó 2,18 ppm; sin embargo, Cenicafé señala que para los micronutrientes estos valores son principalmente informativos y no constituyen rangos de suficiencia específicos para Café (Sadeghian, 2018)

Con el fin de relacionar los resultados obtenidos con los requerimientos del cultivo, se realizó su comparación con los criterios de interpretación establecidos por Cenicafé (Ver *Tabla 2*)

Tabla 2.

Comparación de los resultados con criterios de referencia para café

Parámetro	Resultado	Referencia Cenicafé	Interpretación
pH.	5,10	5,0-5,5	Adecuado
Materia orgánica	21,22 %	>16%	Alta
Fósforo	0,93 ppm	<10 ppm	Muy bajo
Azufre	2,91 ppm	<6 ppm	Bajo
CIC	4 meq/100g	<15 meq/100g	Bajo
Aluminio	0	<0,5 meq/100g	Favorable
Boro	2,18 ppm	>0,4 ppm	Alto

Nota: Los valores de micronutrientes son de carácter informativo y no corresponden a rangos de fertilidad específicos para café. Para el establecimiento del cultivo, Cenicafé considera

especialmente importante evaluar la disponibilidad de fósforo, cuyo nivel de referencia es cercano a 30 ppm.

Los resultados muestran que las principales limitaciones nutricionales corresponden al fósforo disponible (0,93 ppm) y al azufre (2,91 ppm). El bajo contenido de fósforo podría estar relacionado con procesos de fijación o retención del elemento en el suelo, asociados a su composición mineralógica y a las características de la materia orgánica; no obstante, esta causa no puede confirmarse únicamente con el análisis realizado. En el caso del azufre, su baja disponibilidad podría relacionarse con pérdidas por lixiviación, especialmente considerando la textura franco-arenosa y la baja CIC del suelo. Estas condiciones deben ser consideradas al momento de establecer el plan de fertilización, el cual debe fundamentarse en el análisis del suelo. Cenicafé destaca la importancia de utilizar los resultados del análisis para orientar una fertilización racional.

Desde el punto de vista ambiental, el suelo presenta condiciones favorables para el establecimiento del cultivo; sin embargo, la textura franco-arenosa, la baja CIC y la pendiente del terreno pueden aumentar la susceptibilidad a pérdidas de agua y nutrientes y a procesos erosivos. Por ello, se recomienda mantener cobertura vegetal, evitar dejar el suelo desnudo y realizar prácticas de conservación que permitan mantener su fertilidad y reducir la degradación del recurso.

En conjunto, el suelo presenta condiciones favorables principalmente por su pH, baja salinidad y ausencia de aluminio intercambiable, pero la baja disponibilidad de fósforo y azufre y la reducida CIC constituyen las principales limitaciones para el establecimiento y desarrollo del cultivo de café.

5.3. ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO Y MANEJO DEL SUELO

A partir de los factores limitantes identificados en la caracterización del suelo, se formularon estrategias de manejo orientadas al mejoramiento de sus condiciones

fisicoquímicas, la conservación del recurso y el aprovechamiento de los residuos generados en la finca. Las propuestas se plantean de acuerdo con las condiciones observadas en el lote y con las capacidades de implementación propias del proyecto.

5.3.1. APROVECHAMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Debido a la cantidad de residuos vegetales presentes en el lote, se propone realizar su acopio y clasificación, aprovechando hojas, hojarasca y material proveniente de las podas como materia prima para la elaboración de compost. Estos residuos podrán combinarse con gallinaza como fuente orgánica de nitrógeno, siguiendo un proceso controlado de compostaje que permita transformar los materiales y obtener un abono orgánico estable (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2015).

Para su elaboración, se recomienda disponer los materiales en un área cubierta, seca y firme, triturar previamente los residuos de mayor tamaño y formar capas alternadas de material vegetal y estiércol. Durante el proceso se deberá realizar seguimiento a la humedad, temperatura y pH, además de efectuar los volteos necesarios para favorecer la aireación y descomposición de la materia orgánica. El ICA establece que el compost debe alcanzar condiciones adecuadas de estabilización antes de su aplicación al suelo (ICA, 2015).

La aplicación del compost deberá realizarse de acuerdo con los resultados del análisis del suelo y las necesidades del cultivo, evitando aplicaciones indiscriminadas de materia orgánica (ICA, 2015).

5.3.2. CONSERVACIÓN DE HUMEDAD Y CONTROL DE LA EROSIÓN

Debido a la pendiente del terreno, la textura franco-arenosa y la lámina de agua disponible de 60 mm, se propone mantener una cobertura permanente sobre el suelo. Los residuos foliares y materiales vegetales finos podrán distribuirse alrededor de los cafetos como cobertura muerta o *mulch*, evitando su acumulación excesiva junto al tallo. De igual manera, las ramas gruesas que no sean utilizadas para compostaje podrán organizarse transversalmente a la pendiente como barreras de residuos vegetales.

Estas prácticas permitirán disminuir el impacto directo de las gotas de lluvia, reducir la velocidad de la escorrentía y favorecer la conservación de la humedad. Cenicafé recomienda en terrenos cafeteros de ladera el manejo de coberturas, las coberturas muertas y las prácticas realizadas a través de la pendiente como medidas de conservación del suelo.

5.3.3. MANEJO DE LAS DEFICIENCIAS DE FÓSFORO Y AZUFRE

El fósforo (0,93 ppm) y el azufre (2,91 ppm) presentaron los valores más bajos entre los nutrientes evaluados, por lo que se propone implementar un manejo nutricional correctivo basado en los resultados del análisis de suelo. La aplicación de fertilizantes deberá realizarse de manera localizada y fraccionada en función de los requerimientos del cultivo, evitando aplicaciones excesivas que puedan generar pérdidas de nutrientes por escorrentía o lixiviación.

Para el fósforo se recomienda seleccionar la fuente de acuerdo con las características del suelo y la etapa de establecimiento del cultivo. La cantidad y frecuencia de aplicación deberán ser definidas técnicamente a partir del análisis de suelo y de las recomendaciones de Cenicafé, evitando establecer una dosis fija sin contar con información adicional del cultivo. Cenicafé señala que la fertilización debe

fundamentarse en el análisis del suelo y advierte que las recomendaciones generales pueden generar desbalances cuando no consideran las características particulares del suelo.

El manejo deberá complementarse con un seguimiento periódico mediante nuevos análisis de suelo, con el fin de evaluar la respuesta del terreno y ajustar posteriormente las recomendaciones nutricionales.

5.3.4. CAPACITACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL MANEJO DEL SUELO

Como estrategia transversal se propone realizar jornadas de capacitación dirigidas al personal encargado de la finca. Estas deberán abordar la correcta separación y aprovechamiento de los residuos vegetales, elaboración y manejo del compost, distribución de coberturas, establecimiento de barreras en terrenos inclinados y aplicación adecuada de fertilizantes.

Asimismo, se propone llevar un registro sencillo de las actividades realizadas, las cantidades de materiales incorporados y las aplicaciones de fertilizantes. Este seguimiento permitirá evaluar el cumplimiento de las prácticas propuestas y facilitará la comparación de futuros análisis de suelo con los resultados obtenidos en el presente estudio.

En conjunto, las estrategias buscan integrar el aprovechamiento de los residuos disponibles en la finca con prácticas de conservación y manejo nutricional, de manera que el mejoramiento de las condiciones del suelo se realice de forma gradual y compatible con la sostenibilidad ambiental del sistema cafetero.

6. CONCLUSIONES

La metodología de muestreo y los procedimientos analíticos empleados permitieron obtener y caracterizar una muestra representativa del área de estudio, considerando las condiciones de pendiente, heterogeneidad y alta presencia de raíces y biomasa superficial del terreno. La realización de los análisis por duplicado permitió verificar la consistencia de las mediciones y fortalecer la confiabilidad de los resultados obtenidos para la caracterización fisicoquímica del suelo.

La caracterización fisicoquímica permitió establecer un diagnóstico integral del suelo y su relación con el establecimiento y productividad potencial del cultivo de café. Se identificaron condiciones favorables como un pH apropiado, baja conductividad eléctrica y ausencia de aluminio intercambiable; sin embargo, las principales limitaciones correspondieron a la muy baja disponibilidad de fósforo, el bajo contenido de azufre y la baja capacidad de intercambio catiónico. Estos resultados evidencian la necesidad de realizar un manejo nutricional fundamentado en el análisis de suelo y de implementar prácticas de conservación acordes con la pendiente y las características físicas del terreno.

La formulación de estrategias de manejo y mejoramiento permitió plantear alternativas técnicamente viables y ambientalmente sostenibles frente a las limitaciones identificadas. Entre ellas se propusieron el aprovechamiento de residuos vegetales y gallinaza mediante compostaje, el uso de coberturas y barreras para disminuir la erosión y conservar la humedad, y un manejo nutricional orientado a corregir las deficiencias de fósforo y azufre. Asimismo, la elaboración de una cartilla digital y las actividades de capacitación constituyen herramientas para facilitar la apropiación de los resultados y promover prácticas de manejo del suelo orientadas a la sostenibilidad del sistema cafetero.

7. RECOMENDACIONES

A partir de las experiencias adquiridas y los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto de grado, se formulan las siguientes recomendaciones dirigidas a futuros investigadores, estudiantes y actores interesados en dar continuidad a esta línea de trabajo:

Para futuras investigaciones orientadas a la caracterización edáfica en sistemas cafeteros, se recomienda establecer un control riguroso sobre el cronograma de muestreo. Es fundamental garantizar que exista un periodo de al menos tres meses (90 días) desde la última aplicación de abonos o fertilizantes antes de recolectar las muestras de suelo. Esta precaución evitará alteraciones temporales en los parámetros químicos y asegurará que los resultados reflejen la condición real y estable del terreno, minimizando el sesgo por el efecto residual inmediato de las enmiendas.

Debido a las dificultades topográficas y a la alta acumulación de biomasa fresca (hojas, raíces y restos de árboles por podas recientes) encontradas en el lote, se

sugiere para futuros trabajos implementar un protocolo estricto de remoción de la capa orgánica superficial antes de tomar la muestra de suelo. Alternativamente, resultaría de gran valor investigativo realizar un análisis fisicoquímico independiente de esta capa de biomasa frente al suelo mineral. Esto evitará que la materia orgánica "cruda" sobrestime los porcentajes en los resultados de laboratorio y distorsione la interpretación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Se sugiere tomar este trabajo de grado como línea base para un nuevo proyecto de investigación que se encargue de implementar las recomendaciones técnicas diseñadas (como el compostaje de los residuos de poda y la fertilización fraccionada). Un estudio futuro podría realizar un monitoreo a mediano plazo para evaluar cuantitativamente cómo estas prácticas de economía circular mejoran las condiciones del suelo y el rendimiento del cultivo de café.

Para facilitar la labor de futuros tecnólogos ambientales frente a condiciones de campo complejas, se recomienda la gestión y adquisición de equipos portátiles de diagnóstico rápido (como medidores *in situ* de humedad del suelo, penetrómetros para evaluar compactación en laderas y medidores de pH portátiles). El uso de estas herramientas tecnológicas en campo permitiría realizar validaciones previas que optimicen la toma de decisiones antes de enviar las muestras definitivas al laboratorio.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta Trinidad, L. T., Acosta Huaman, G. C., Arizapana Soto, N., Victorio Piedra, C. A., Davila Ordaya, A., & Cespedes Ratto, J. B. (2025). Relación entre características químicas del suelo y desarrollo vegetativo del cafeto en diferentes arreglos agroforestales. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 9(26), 380–397.

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.353>

Angadi, V. M. A., Krishna Murthy, R., Govinda, K., Bhavya, N., Manjunatha, M. H., Raghu, H. B., Veeranagappa, P., Sathish, B. N., & Hareesh, T. S. (2025). Soil quality and microbial diversity across organic and conventional coffee in central Western Ghats India. *Scientific Reports*, 15, 34184.

<https://doi.org/10.1038/s41598-025-15437-3>

Bastidas Matituy, Y. A., Tepud Rosales, O. A., & Navia Estrada, J. F. (2017). Evaluación de la calidad del suelo en sistemas productivos cafeteros, municipio de La Unión, Nariño. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias* – *FAGROPEC*, 9(1), 17–24.

<https://editorial.uniamazonia.edu.co/fagropec/article/view/348>

Bedoya-Gómez, B. D., Dossman-Gil, M. Á., & 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), 160–181. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.8>

Carrillo, P. (2015). *Manejo de la acidez del suelo en la zona cafetera* (Avances Técnicos No. 455). Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).

Cenicafé. (2018). *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Tomo 2). Centro Nacional de Investigaciones de Café; Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. <https://www.cenicafe.org>

Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA*. Diario Oficial No. 41.146.

Constitución Política de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Arts. 79–80.

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2017). *Guía para la descripción de suelos* (4.^a ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*. FAO.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

Gómez, B. D. (2021, junio). [Fuente en SciELO].

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962021000100160

González-González, M., & Serna-Giraldo, C. (2018). Servicios ecosistémicos potenciales en el sector cafetero colombiano. *Revista Cenicafé*, 69(2), 35–46. <https://doi.org/10.38141/10778/69204>

Henriquez, V. H. (2024). Colombian coffee (*Coffea arabica* L.) plantations: A taxonomic and functional survey of soil fungi. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1345383. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1345383>

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2015). *Abono orgánico compostado en producción ecológica*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Instituto Colombiano Agropecuario; Servicio Nacional de Aprendizaje. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/agricultura-ecologica-1/documentos/cartilla-elaboracion-abono-organico-solido-28-11-2>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2014). *Métodos de análisis de suelos para fines agrícolas* (7.^a ed.). Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2021). *Descripción y muestreo de suelos* (Código IN-GAG-PC05-05, Versión 1). IGAC.

Jaramillo, J. S. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de
Colombia, Facultad de Ciencias.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70354>

Khalajabadi, S. S. (2012). *Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/1107>

Lince-Salazar, L. A. (2020). Propiedades físicas de los suelos y su relación con la sostenibilidad de la caficultura colombiana. *Memorias Seminario Científico Cenicafe*, 71(1), e71143. <https://doi.org/10.38141/10795/71143>

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

Municipio de Santa Bárbara. (2001). *Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Santa Bárbara, Santander 2001–2003*. Alcaldía Municipal de Santa Bárbara.

Munsell Color Services. (2009). *Munsell soil color charts*. X-Rite, Incorporated.

Ochoa-Henriquez, V. H., Faggioli, V., Gómez-Godínez, L. J., Rivarola, M., & Cristancho, M. (2024). Colombian coffee (*Coffea arabica* L.) plantations: A taxonomic and functional survey of soil fungi. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1345383. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1345383>

Pérez Pérez, M. A., & Ortiz Molina, I. R. (2016). *Evaluación de la calidad del suelo en cultivos de Coffea arabica L. var. Caturra, en tratamientos de fertilización orgánica y convencional en Pitalito, Huila*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13257>

Presidencia de la República de Colombia. (1974). *Decreto-Ley 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*.

Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*.

Reyes-Zubieta, M. G., Calderón-Vargas, M., & Avellaneda-Torres, L. M. (2024). Soil quality indicators in coffee plantations managed with ecological farming techniques in San Francisco, Cundinamarca, Colombia. *Acta Agronómica*, 73(2), 133–142. <https://doi.org/10.15446/acag.v73n2.112428>

Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín Técnico Cenicafé*, 32, 1–44. <https://doi.org/10.38141/10781/032>

Salamanca-Jiménez, A., & Sadeghian, S. (2004). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *Avances Técnicos Cenicafé*, (326).

Sánchez-Reinoso, A. D., Ávila-Pedraza, E. Á., Lombardini, L., & Restrepo-Díaz, H.

(2023). The application of coffee pulp biochar improves the physical, chemical, and biological characteristics of soil for coffee cultivation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 2512–2524.

<https://doi.org/10.1007/s42729-023-01208-4>

Torrez, V., Benavides-Frias, C., Jacobi, J., & Ifejika Speranza, C. (2023). Ecological

quality as a coffee quality enhancer: A review. *Agronomy for Sustainable*

Development, 43(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00874-z>