

**AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TEXTO COMPLETO**

Puerto Colombia, 29 de Junio del 2024

Señores

DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS

Universidad del Atlántico

Puerto Colombia

Asunto: Autorización Trabajo de Grado

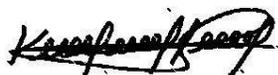
Cordial saludo,

Yo, **KARINA PAOLA MARTÍNEZ PÉREZ.**, identificado(a) con **C.C. No. 1.140.869.779** de **BARRANQUILLA**, autor(a) del trabajo de grado titulado **PROPIEDADES EDÁFICAS Y ACTIVIDAD AMIOLITICA BACTERIANA EN SUELOS ASOCIADOS A PAISAJES EN UN PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL DEPARTAMENTO DEL CESAR – COLOMBIA.** presentado y aprobado en el año **2023** como requisito para optar al título Profesional de **MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.**; autorizo al Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico para que, con fines académicos, la producción académica, literaria, intelectual de la Universidad del Atlántico sea divulgada a nivel nacional e internacional a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios del Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web institucional, en el Repositorio Digital y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad del Atlántico.
- Permitir consulta, reproducción y citación a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Esto de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Atentamente,



Firma

KARINA PAOLA MARTÍNEZ PÉREZ.

C.C. No. 1.140.869.779 de BARRANQUILLA

DECLARACIÓN DE AUSENCIA DE PLAGIO EN TRABAJO ACADÉMICO PARA GRADO

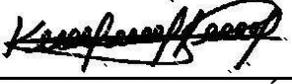
Este documento debe ser diligenciado de manera clara y completa, sin tachaduras o enmendaduras y las firmas consignadas deben corresponder al (los) autor (es) identificado en el mismo.

Puerto Colombia, **29 de junio del 2024**

Una vez obtenido el visto bueno del director del trabajo y los evaluadores, presento al **Departamento de Bibliotecas** el resultado académico de mi formación profesional o posgradual. Asimismo, declaro y entiendo lo siguiente:

- El trabajo académico es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, en consecuencia, la obra es de mi exclusiva autoría y detento la titularidad sobre la misma.
- Asumo total responsabilidad por el contenido del trabajo académico.
- Eximo a la Universidad del Atlántico, quien actúa como un tercero de buena fe, contra cualquier daño o perjuicio originado en la reclamación de los derechos de este documento, por parte de terceros.
- Las fuentes citadas han sido debidamente referenciadas en el mismo.
- El (los) autor (es) declara (n) que conoce (n) lo consignado en el trabajo académico debido a que contribuyeron en su elaboración y aprobaron esta versión adjunta.

Título del trabajo académico:	PROPIEDADES EDÁFICAS Y ACTIVIDAD AMILOLITICA BACTERIANA EN SUELOS ASOCIADOS A PAISAJES EN UN PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL DEPARTAMENTO DEL CESAR – COLOMBIA.
Programa académico:	MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Firma de Autor 1:							
Nombres y Apellidos:	KARINA PAOLA MARTÍNEZ PÉREZ						
Documento de Identificación:	CC	X	CE		PA	Número:	1.140.869.779
Nacionalidad:	COLOMBIANA			Lugar de residencia:	BARRANQUILLA		
Dirección de residencia:	CALLE 56 # 62 - 35						
Teléfono:					Celular:	3045537862	

FORMULARIO DESCRIPTIVO DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO	PROPIEDADES EDÁFICAS Y ACTIVIDAD AMILOLITICA BACTERIANA EN SUELOS ASOCIADOS A PAISAJES EN UN PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL DEPARTAMENTO DEL CESAR – COLOMBIA..
AUTOR(A) (ES)	KARINA PAOLA MARTINEZ PÉREZ.
DIRECTOR (A)	KARINA CASTELLANOS ROMERO.
CO-DIRECTOR (A)	RODIAN FONSECA CAMPUZANO.
JURADOS	WILLIAM AGUDELO HENRÍQUEZ JIM HAMES RODRÚÍGEZ DÍAZ
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE	MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA	MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PREGRADO / POSTGRADO	POSTGRADO
FACULTAD	CIENCIAS BÁSICAS
SEDE INSTITUCIONAL	CIUDADELA UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO
AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	2023
NUMERO DE PÁGINAS	86
TIPO DE ILUSTRACIONES	Mapas y graficas
MATERIAL ANEXO (VÍDEO, AUDIO, MULTIMEDIA O PRODUCCIÓN ELECTRÓNICA)	NO APLICA
PREMIO O RECONOCIMIENTO	CONVOCATORIA 808 PROYECTOS DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN Y SUCONTRIBUCIÓN A LOS RETOS DE PAÍS



**PROPIEDADES EDÁFICAS Y ACTIVIDAD AMIOLITICA BACTERIANA EN SUELOS
ASOCIADOS A PAISAJES EN UN PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL
DEPARTAMENTO DEL CESAR – COLOMBIA.**

KARINA PAOLA MARTÍNEZ PÉREZ

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.**

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

PUERTO COLOMBIA

2023



**PROPIEDADES EDÁFICAS Y ACTIVIDAD AMILOLITICA BACTERIANA EN SUELOS
ASOCIADOS A PAISAJES EN UN PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL
DEPARTAMENTO DEL CESAR – COLOMBIA.**

KARINA PAOLA MARTÍNEZ PÉREZ

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.**

DIRECTOR

KARINA ISABEL CASTELLANOS ROMERO

Ph.D EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

CODIRECTOR

RODIAN FONSECA CAMPUZANO

MSc EN ESTADISTICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

PUERTO COLOMBIA

2023

NOTA DE ACEPTACION

DIRECTOR(A)

JURADO(A)S

DEDICATORIA

A Dios por ser la luz que me ha guiado en medio de la oscuridad y me ha traído hasta aquí, a mi directora Karina Castellanos, quien ha creído en mí en los momentos en los que ni yo misma lo he hecho y su orientación ha sido indispensable para mi proyecto de vida, a mi mamá Eudes Pérez Silva y mi abuela Santos María Silva De Pérez, por dedicar su vida a apoyarme y empoderarme usando el amor como bandera. A mi hermano Miguel Alfonso Martínez Pérez por cuidarme en los peores momentos y animarme todos los días.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por mi vida y por cada oportunidad que me brinda para seguir adelante en el camino de la ciencia. A mi directora Karina Castellanos Romero por su apoyo y guía incondicional, por su confianza y su amor expresado en formarme como científica y mujer fuerte, valorando siempre mis ideas.

A la convocatoria 808 Retos de COLCIENCIAS, la cual financió la ejecución de este proyecto de investigación y mi maestría en el marco del contrato 323 establecido entre la Universidad del Atlántico y MINCIENCIAS.

Al profesor Rodian Fonseca por asesorarme y orientarme en la parte estadística, ayudándome así a evidenciar el comportamiento y la importancia de mis resultados.

A Sergio Esteban Lozano Báez, por enseñarme sobre las propiedades hidráulicas del suelo, apoyarme con los experimentos realizados en campo, el procesamiento de los datos y por siempre estar para responder mis dudas, agradezco haberte conocido para convertir fincas en bosques y fundar el ministerio de las flores.

A Alejandro Vargas Cortes por su apoyo y ayuda para mapear los resultados y los puntos de muestreos, gracias por escuchar mis ideas y mostrarme como podía representarlas.

Al profesor Roger Valle Molinares por su apoyo en la parte metodológica, por mostrarme otras alternativas y guiarme en el proceso, de forma incondicional.

A mi mamá por amarme de forma incondicional y animarme siempre a cumplir mis sueños con la fortaleza y perseverancia que siempre me ha inculcado, todo lo que soy es gracias a ti mamá, a mi abuela por su amor compasivo, sus buenos deseos y su apoyo, agradezco a las dos que siempre han procurado que yo pueda aprovechar las oportunidades que ustedes nunca tuvieron y este ha sido el propósito de sus vidas. A mi amado hermano que me ha mostrado el amor más cuidador en los días en los que no he podido levantarme de la cama, ha secado

mis lágrimas en los días en los que los experimentos no funcionaban y siempre me ha animado creyendo en mí.

A mis amigos Roberto Rodríguez, Marlon Ardila, Orlaida Mejía, Shirley Navarro, María Conde, Yuleiny Barrios, Andrés Molina, José Manuel, por toda la motivación y el amor que me dan, por siempre estar para escucharme y animarme, siempre están en mi corazón. A mi amigo Bunkwanawijekun por todas sus enseñanzas acerca de la paciencia y por admirarme desde mi existencia en la naturaleza.

A los amigos que el proyecto Retos me permitió conocer Luis José Avendaño, York Arenas, Johana Márquez por siempre estar para cuidarnos y apoyarnos en campo y fuera de él.

A mis amigos del colegio Kevin Ropain y Cristian Pomares, por compartir mis sueños y siempre creerme capaz, a mis amigas Yolanis, Natalia, Marcela y Ninin por amarme, admirarme y regalarme su amistad incondicional.

En general agradezco a todas las personas que, de alguna forma por más mínima que sea, contribuyeron para que hoy yo pudiera estar escribiendo estas líneas y culminando este proceso tan importante para mi vida.

PROPIEDADES EDÁFICAS Y ACTIVIDAD AMILOLITICA BACTERIANA EN SUELOS ASOCIADOS A PAISAJES EN UN PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL DEPARTAMENTO DEL CESAR – COLOMBIA.

RESUMEN

La conservación y restauración de ecosistemas forestales es crucial para el ciclaje de elementos, mantenimiento del clima, biodiversidad e integridad del suelo, sin embargo, en las últimas décadas, la deforestación y el cambio en el uso del suelo han llevado a la degradación y pérdida de estos. Los programas de compensación buscan mitigar el impacto, pero también modifican los elementos integradores del paisaje como el suelo y las coberturas vegetales; en el suelo los microorganismos son importantes para la degradación e incorporación de materiales a la biofase, respondiendo a los cambios de uso del suelo donde la actividad amilolítica es una de las más relevantes debido a la biodisponibilidad del almidón. El presente estudio en el departamento del Cesar, Colombia, evaluó las propiedades edáficas y la actividad amilolítica bacteriana en suelos de diferentes paisajes asociados a un programa de compensación forestal. Los resultados mostraron diferencias significativas en las propiedades físicas y biológicas del suelo entre distintos tipos de coberturas, como pastos, cultivos de café, bosques y zonas de regeneración. Se evidenció que los pastos presentaban mayores temperaturas y una menor cantidad de cepas con actividad amilolítica en comparación con los bosques de referencia. Los cambios de uso del suelo y la antropización, impactan negativamente las propiedades del suelo y los servicios ecosistémicos, por esto es importante la gestión adecuada de las actividades que promuevan el cuidado de los ecosistemas forestales y garanticen la sostenibilidad ambiental.

PALABRAS CLAVE: propiedades edáficas, suelo, actividad amilolítica, paisaje, compensación forestal.

ABSTRACT

The conservation and restoration of forest ecosystems are crucial for the cycling of elements, climate maintenance, biodiversity, and soil integrity; however, in recent decades, deforestation and changes in land use have led to degradation and loss of these. Compensation programs seek to mitigate the impact but also modify the integrating elements of the landscape, such as soil and plant cover. In the soil, microorganisms play a vital role in the degradation and incorporation of materials into the biophase. They respond to changes in land use, with amylolytic activity being one of the most relevant due to the bioavailability of starch. The present study in the department of Cesar, Colombia, evaluated the edaphic properties and amylolytic activity of the bacterial microbiota in soils from different landscapes associated with a forest compensation program. The results showed significant differences in the physical and biological properties of the soil between different types of cover, such as pastures, coffee crops, forests, and regeneration areas. It was evident that the pastures had higher temperatures and a lower number of strains with

amylolytic activity compared to the reference forests. These findings highlight the crucial role of microorganisms in soil health and their sensitivity to changes in land use, underscoring the need for adequate management of activities that promote the care of forest ecosystems and guarantee environmental sustainability.

KEY WORDS: edaphic properties, soil, amylolytic activity, landscape, forest compensation.

CONTENIDO

<

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES	5
3.	MARCO TEORICO.....	10
3.1	MODELO DE COMPENSACIÓN.....	10
3.2	SUELO	10
3.3	ACTIVIDAD ENZIMÁTICA.....	11
3.3	ACTIVIDAD AMILOLÍTICA	11
4.	OBJETIVOS	12
4.1	GENERAL.....	12
4.2	ESPECÍFICOS	12
5.	HIPÒTESIS Y PREDICCIONES	13
5.1	HIPÒTESIS.....	13
5.2	PREDICCIONES.....	13
6.	MARCO METODOLÒGICO.....	14
6.1	ÁREA DE ESTUDIO	14
6.2	RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	16
6.3	FACTORES FÍSICOS DEL SUELO	20
6.3.1	Temperatura y humedad:	20
6.3.2	Resistencia del suelo a la penetración:	20
6.3.3	Densidad Aparente del suelo:	20
6.3.4	Textura (porcentaje de Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar)).....	20
6.3.5	Conductividad eléctrica del suelo (CE)	21
6.4	FACTORES QUÍMICOS EN EL SUELO	21
6.4.1	pH del suelo.....	21
6.4.2	Materia Orgánica (MO)	21
6.4.3	Nitrogeno Total (NT)	22
6.4.4	Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Olsen Disponible	22
6.4.5	Carbono Orgánico, Fosforo Disponible, Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio	23
6.4.6	Cobertura vegetal.....	23
6.4.7	Conductividad Hidráulica del suelo.....	23
6.5	ANÁLISIS MICROBIOLÒGICO DEL SUELO	24

6.6 ANÁLISIS DE DATOS.....	24
7. RESULTADOS	26
7.1 FACTORES FISICOQUÍMICOS DEL SUELO	26
7.1.1 Temperatura y humedad.....	26
7.1.2 Cobertura Vegetal	29
7.1.3 Resistencia a la penetración del suelo	30
7.1.5 Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas	31
7.1.6 Análisis de correlaciones de las variables físicas y químicas.....	40
7.1.7 Relación entre variables físicas y químicas del suelo	41
7.2 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL SUELO	47
7.2.1 Densidad bacteriana en el suelo	47
7.2.2 Actividad Amilolítica.....	52
7.2.3 Análisis de categorización y modelos de las variables microbiológicas.....	54
7.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO	56
8. DISCUSIÓN.....	57
8.1 FACTORES FISICOQUÍMICOS DEL SUELO	57
8.1.1 Temperatura y humedad.....	57
8.1.2 Cobertura Vegetal	59
8.1.3 Resistencia a la penetración del suelo	59
8.1.5 Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas	61
8.1.6 Análisis de correlaciones de las variables físicas y químicas.....	64
8.1.7 Relación entre variables físicas y químicas del suelo	65
8.2 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL SUELO	67
8.2.1 Densidad bacteriana en el suelo	67
8.2.2 Actividad Amilolítica.....	69
8.2.3 Análisis de categorización y modelos de las variables microbiológicas.....	70
8.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO	71
9. CONCLUSIONES	72
10. RECOMENDACIONES	74
11. REFERENCIAS.....	75
12. ANEXOS	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estructura del diseño de muestreo, referente a paisajes, ventanas, numero de coberturas muestreadas y muestras recolectadas. P1: Paisaje 1; P2: Paisaje 2; V1: ventana 1; V2: ventana 2; V3: ventana 3; V4: ventana 4.....	18
Tabla 2 Muestras de suelo según tipo de análisis a realizar (microbiológico y fisicoquímicos), paisaje, ventana y cobertura.....	19
Tabla 3. Protocolos para la determinación de Carbono Orgánico, Fosforo Disponible, Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio.....	23
Tabla 4. Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas por ventanas (W1: ventana 1; W2: ventana 2; W3: ventana 3; W4: ventana 4).	32
Tabla 5. Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas según las ventanas de muestreo (forest: bosques; regeneration: regeneración; coffee: sistemas agroforestales de café; pasture: pastos).	34
Tabla 6. Resultados p valor test de Friedman, y diferencias entre coberturas en una misma ventana.....	48
Tabla 7. Resultados p valor test de Friedman, y diferencias entre un mismo tipo de cobertura de diferentes ventanas.	50
Tabla 8. Modelos logísticos para explicar las variables número de células y presencia de cepas con actividad amilolítica.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. Parte superior: Departamento del Cesar - Colombia; parte inferior: zonas en el Cesar donde se ha implementó el Plan de Compensación Forestal (Tomado y adaptado de (Prodeco, 2015; The International Republican Institute, 2015). ..	15
Figura 2. Distribución de las ventanas, coberturas y puntos de muestreo.....	17
Figura 3. Distribución en Zigzag de puntos de muestreo dentro de la parcela de 100 m x 100m.....	18
Figura 4. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 1 (W1).....	26
Figura 5. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales muestreadas sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 2 (W2).	27
Figura 6. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales: sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 3 (W3).....	28
Figura 7. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 4 (W4).....	28
Figura 8. Cobertura vegetal en las diferentes ventanas, sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas.....	29
Figura 9. Resistencia a la penetración del Suelo en las diferentes coberturas vegetales muestreadas en las diferentes ventanas de muestreo.....	30
Figura 10. Densidad aparente del Suelo en las diferentes coberturas vegetales muestreadas en las ventanas (W1-W4).	31
Figura 11. Variables físicas del suelo, los box plots muestran las coberturas (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos), eje X: ventanas (W1: ventana 1; W2: ventana 2; W3: ventana 3; W4: ventana 4.	36
Figura 12. Variables químicas del suelo. Las coberturas son los puntos (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos). Eje X: ventanas (W1: ventana 1; W2: ventana 2; W3: ventana 3; W4: ventana 4).	37
Figura 13. Variables físicas del suelo, se muestran las coberturas con puntos de colores (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos), los paisajes representados en el eje X (Compensación y no compensación).	38
Figura 14. Variables físicas del suelo, las coberturas se muestran con los puntos de colores (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos), los paisajes representados en el eje X (Compensación y no compensación).....	39
Figura 15. Correlaciones de las variables físico-químicas. Círculos azules, grandes y de tonalidades fuertes representan correlaciones positivas y fuertes; círculos rojos, grandes y de tonalidades fuertes representan correlaciones negativas y fuertes.....	41
Figura 16. Dimensiones explicativas para las variables fisicoquímicas del suelo según la varianza.....	42
Figura 17. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2.....	43

Figura 18. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 2 y 3.	44
Figura 19. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2 con clústeres por ventanas.	44
Figura 20. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2 con clústeres por coberturas.....	45
Figura 21. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2 con clústeres por paisaje.....	46
Figura 22. Análisis de células por gramo de suelo en diferentes coberturas de una misma ventana. A: Coberturas evaluadas en la ventana 1; B: Coberturas evaluadas en la ventana 2; Coberturas evaluadas en la ventana 3; Coberturas evaluadas en la ventana 4.	48
Figura 23. Análisis de células por gramo de suelo en coberturas de diferentes ventanas. A: Pastos en la ventana 1,2,3 y 4; B: Cafetales en la ventana 1,2,3 y 4; Regeneración en la ventana 1,2,3 y 4; Bosques en la ventana 1,2,3 y 4.....	50
Figura 24. Gradiente de distribución del número de células por gramo de suelo en las ventanas y coberturas muestreadas.	52
Figura 25. Gradiente de distribución del número de cepas con actividad amilolítica en las ventanas y coberturas muestreadas.	53
Figura 26. Número de células dicotomizada (Densidad alta y densidad baja), de acuerdo a las coberturas y ventanas.	55
Figura 27. Distribución de la variable conductividad hidráulica del suelo, en las diferentes ventanas. Parte superior ventana 1 y 2, parte inferior ventana 3 y 4.	56

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Descripción de las características de los puntos muestreados.....	81
Anexo 2. Nomenclatura de las variables analizadas.	86

1. INTRODUCCIÓN

La conservación y restauración de los ecosistemas forestales juega un papel fundamental en la mitigación del cambio climático (Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 - Acción por el Clima) y la preservación de la biodiversidad en los ecosistemas terrestres (ODS 15 - Vida de Ecosistemas Terrestres). Según la Cumbre de la Tierra de 1992, "los bosques son vitales para nuestro bienestar económico, social y ambiental" (FAO, 1992). Los ecosistemas forestales son importantes para el mantenimiento del equilibrio climático global, la conservación del agua, la prevención de la erosión del suelo, la captura de carbono y la provisión de hábitats para una amplia diversidad de especies (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Sin embargo, en las últimas décadas, la deforestación y el cambio en el uso del suelo han llevado a una degradación significativa y a la pérdida de estos ecosistemas (Hansen et al., 2013).

En respuesta a la preocupante pérdida de áreas boscosas y la degradación ambiental, se implementan programas de compensación forestal como estrategia para contrarrestar estos efectos negativos y promover la conservación y restauración de coberturas vegetales (Bauhus et al., 2017; Lennox et al., 2019). La compensación forestal es un enfoque basado en el principio de "quien contamina, paga", donde las entidades que realizan actividades que degradan los ecosistemas forestales deben compensar su impacto a través de acciones de restauración y conservación (Gilbert-Norton et al., 2010).

En este contexto, el Departamento de Cesar, Colombia, ha establecido un programa de compensación forestal con el objetivo principal de restaurar y conservar paisajes forestales degradados en la región. El objetivo de este programa es "compensar la pérdida de bosques y fomentar la conservación y restauración de los ecosistemas forestales, asegurando la sostenibilidad de los servicios ambientales" (CORPOCESAR, 2020) mejorando las condiciones del suelo en áreas afectadas por actividades humanas como la agricultura intensiva, la ganadería y la extracción de recursos naturales (CORPOCESAR, 2020). Con la implementación de este programa, se esperó ampliar las áreas de bosque conservado y restaurar los paisajes degradados, promoviendo la regeneración natural de los ecosistemas forestales y garantizando la sostenibilidad a largo plazo de los recursos naturales en la región.

A pesar de lo anterior, los programas de compensación forestal también traen consigo la modificación de elementos característicos del paisaje y aunque dentro de estos se establecen fases de monitoreo y vigilancia que buscan evaluar la efectividad de la implementación del programa, las variables, los factores y los diferentes componentes que se tienen en cuenta, no se abordan a la escala de paisajes, teniendo así información sobre cómo actúan estos a nivel individual, pero una comprensión limitada sobre cómo interactúan estos generando diferencias en las comunidades microbianas, la actividad enzimática y las propiedades del suelo de forma integrada, a escalas paisajísticas.

Las investigaciones que abordan problemas a una escala de paisajes son importantes debido a que permiten una comprensión a una escala macroscópica y la resolución de problemas que solo se pueden abordar integrando muchos de los factores evaluados individualmente, pudiendo observar patrones que no resultan evidentes a otras escalas. Los estudios a nivel de paisajes permiten la interpretación holística, dialéctica y sistémica propia de los diferentes componentes que lo integran, lo cual los convierte en una herramienta útil para la formulación de instrumentos y políticas ambientales que se traducen en la protección, conservación y manejo de ecosistemas de gran importancia (Aguirre et al., 2017).

Dentro de los elementos del paisaje uno de los que cobra mayor relevancia a la hora de ser impactado es el suelo, puesto que actúa como indicador del estado de salud de un ecosistema y soporta en gran medida las actividades agrícolas, ganaderas, forestales, extractivas y urbanas, las cuales terminan afectando la múltiple funcionalidad de este en términos de los procesos biológicos, fisicoquímicos, geológicos, socioeconómicos y culturales, por lo que su uso adecuado, manejo y conservación constituye serias implicaciones ecológicas, económicas y socioculturales (Badii and Landeros, 2007), el uso del suelo, puede ocasionar modificaciones ecosistémicas, perturbando las propiedades y la calidad del suelo y del agua, afectando incluso a nivel ambiental las cuencas a las que se encuentre asociado (De Sousa et al., 2015).

El suelo, como componente esencial en la restauración y conservación de los ecosistemas forestales, juega un papel crítico al albergar una amplia diversidad de microorganismos y desempeñar funciones clave en los ciclos biogeoquímicos, las propiedades edáficas, como la textura, estructura, pH, contenido de nutrientes y

materia orgánica, son determinantes para la productividad y salud del suelo (Bardgett *et al.*, 2005; Hågvar *et al.*, 2005; Kaur *et al.*, 2009).

Los microorganismos son fundamentales para los procesos biológicos a nivel del suelo, bacterias y hongos constituyen la biomasa microbiana del suelo, la cual es responsable de la incorporación y el ciclaje de nutrientes a la biofase, siendo la actividad enzimática parte clave de estos procesos, ya que esta es una propiedad susceptible a ser medida, resulta una herramienta útil a la hora de analizar y evaluar la diversidad funcional de microorganismos, los procesos bioquímicos e indicación de calidad ambiental del suelo, teniendo en consideración que la totalidad de los procesos en la matriz suelo dependen de la actividad enzimática de este (De Sousa *et al.*, 2015; García-Ruiz *et al.*, 2008; Nie *et al.*, 2015).

Dentro de las actividades enzimáticas del suelo una de las más relevantes es la actividad amilolítica, la cual está relacionada con la capacidad de los microorganismos para degradar almidón, siendo este material uno de los más disponibles en derivados vegetales, esta actividad es responsable en gran medida de la descomposición de la hojarasca y otros restos vegetales, así como el glucógeno animal que también puede actuar como sustrato principal para la actividad amilolítica, basado en la relación de las amilasas con los residuos vegetales, se ha asociado esta actividad como un indicador del suelo que responde a cambios en la vegetación (Pancholy and Rice, 1972; Hankin *et al.*, 1974; Sherene, 2017; Wydro *et al.*, 2018).

En este contexto, así como los diferentes elementos formadores del suelo, producen cambios directos en las comunidades de microorganismos, los cambios a nivel de paisajes también impactan estas ocasionando efectos negativos que incluyen modificación de la estructura, la alteración de las actividades enzimáticas, la reducción de la biomasa microbiana y la pérdida de la diversidad taxonómica y funcional (Brockett *et al.*, 2012; Wickings *et al.*, 2016).

En el marco de lo anteriormente planteado, el abordaje a escalas de paisajes de las propiedades edáficas y la actividad enzimática del suelo es una gran oportunidad para valorar las estrategias de compensación como herramienta de uso y aprovechamiento sostenible de suelo en Colombia., Por esta razón, esta investigación está enfocada a contribuir al conocimiento a las propiedades

edáficas y la actividad amilolítica bacteriana dándole un enfoque diferente de estudio, a una escala a la cual no se había explorado en un contexto nacional.

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar las propiedades edáficas y actividad amilolítica bacteriana en el suelo de diferentes tipos de paisajes asociados a un programa compensación forestal en el departamento del Cesar – Colombia. Se realizó el análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incluyendo características físicas como textura, temperatura, humedad, resistencia a la penetración del suelo, densidad aparente, conductividad hidráulica, así como atributos químicos como pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de nutrientes y materia orgánica.

Adicionalmente, se investigó la relación entre el cambio en las coberturas vegetales y las actividades realizadas en los diferentes paisajes, así como las propiedades edáficas del suelo en estos. Se examinó cómo la modificación del uso del suelo afecta las propiedades físico-químicas y la actividad amilolítica del suelo. Esto proporcionó información fundamental para comprender los cambios en el suelo asociados con las prácticas de compensación forestal implementadas en el Departamento de Cesar. Asimismo, se analizó la actividad amilolítica bacteriana del suelo, comparándola con bosques conservados que actúan como coberturas vegetales de referencia. Los resultados y conclusiones de esta investigación proporcionaron información sobre las propiedades físico-químicas, el cambio en las coberturas vegetales, el uso del suelo, la actividad amilolítica del suelo, la compensación forestal a una escala de paisaje en áreas asociadas en el Departamento del Cesar, Colombia.

2. ANTECEDENTES

La compleja red de microorganismos que posee el suelo y las interacciones de estos con otras formas de vida, tienen relación directa con las propiedades físicas, químicas y biológicas de este, pudiendo ser estas últimas, indicadores del manejo adecuado del suelo. Autores como Chintala et al., (2014), Hernández-garcía et al., (2018) y Medina, (2017), han señalado la tasa de respiración, la biomasa microbiana y la actividad enzimática, como los indicadores relevantes de la calidad de los suelos.

La actividad enzimática del suelo marca procesos cruciales con respecto a la canalización de reacciones y así mismo, la actividad enzimática es un indicador del estado y la funcionalidad de los microorganismos del suelo (Veverka et al., 2019). Partiendo de esto, las prácticas de manejo de suelo, tales como labranza, uso de fertilizante, agricultura, combinada con otras actividades como la quema, la tala indiscriminada y el uso de plaguicidas, tienen un impacto directo sobre el suelo, las comunidades microbianas que habitan en este y por ende afectan la actividad enzimática de la que estos son responsables (Sekaran *et al.*, 2019; Veverka *et al.*, 2019).

A nivel mundial existen un amplio número de estudios que determinan la diversidad funcional y estructura de las comunidades microbianas, la actividad enzimática y las propiedades del suelo como factores importantes dentro de los estudios de suelo, algunos ejemplos de estos estudios son los realizados por Chintala *et al.*, 2014, Wickings *et al.*, 2016, Veverka *et al.*, 2019, Mathewos, 2020, Bufebo *et al.*, 2021, Menezes *et al.*, 2021, Sharma *et al.*, 2022 donde las variables se abordan teniendo en cuenta la posición del paisaje y el tipo de manejo de suelo, dándole un enfoque de granja verde y de la disminución de la contribución al cambio climático en los predios evaluados.

Estudios como los anteriormente mencionados, indican que las diferentes actividades enzimáticas tales como: disminuyen a medida que se aumenta la altitud en los paisajes; siendo mayores en depresiones topográficas y menores en cumbres y cimas, por otro lado, la diversidad y estructura microbiana reporta estar correlacionada negativamente con la densidad del suelo y el contenido de arena y positivamente con la cantidad de arcilla, limo, carbono, nitrógeno y humedad.

Otros estudios evalúan actividad enzimática y estructura de las comunidades microbianas, así como propiedades del suelo, en zonas que han sido degradadas y contaminadas, los cuales evidencian correlaciones negativas entre la diversidad microbiana y la actividad enzimática con respecto a las concentraciones de

contaminantes de naturaleza orgánica y sódica, demostrando así que los contaminantes afectan la actividad enzimática del suelo y por ende la fertilidad de este (De Sousa et al., 2015; García-Ruiz et al., 2008; Singh et al., 2013). De igual forma, autores como Asadu *et al.*, (2010), Soleimani *et al.*, (2019); Tiwari *et al.*,(2019); Mo *et al.*, (2022), investigan la densidad microbiana y la actividad amilolítica en diferentes gradientes de uso del suelo y bajo diferentes tipos de coberturas vegetales, relacionándolos con variables como la materia orgánica, el pH, carbono orgánico y nutrientes.

Para el caso de Colombia, existen varios trabajos que evalúan las propiedades físicas y químicas, la composición microbiana y la actividad enzimática con respecto al manejo en suelos agrícolas; sin embargo, estos no dejan de ser un número reducido de investigaciones en el contexto de desarrollo social y económico desde la actividad agrícola del país. Tal es el caso de Vallejo y colaboradores (2011), quienes desarrollaron su trabajo en el departamento del Valle del Cauca incluyendo tres tratamientos definidos desde el punto de vista del uso del suelo siendo estos: monocultivo convencional de pasto, sistema silvopastoril intensivo y bosque. Sus resultados indican que el suelo del monocultivo convencional de pasto presenta una densidad aparente mayor y una baja cantidad de carbono orgánico con respecto a los otros usos del suelo, lo que se traduce en una influencia negativa en la calidad del suelo.

Las actividades enzimáticas, en los estudios mencionados, mostraron ser un indicador sensible a las perturbaciones agrícolas, arrojando valores mayores en los sistemas silvopastoriles intensivos, hecho relacionado con una menor perturbación física y una mayor cantidad de basura que favoreció la actividad de la biomasa microbiana produciendo esta, enzimas más estables protegidas por la materia orgánica del suelo.

Además, mostró que la estructura y composición de la comunidad microbiana puede ser alterada por el acceso a sustratos orgánicos de diferente naturaleza debido a los diferentes usos del suelo y perturbación de este, siendo el monocultivo convencional de pasto un tipo de uso con capacidad para deformar microhabitats e impactar negativamente las comunidades microbianas, en este tipo de uso, también se disminuyó de forma drástica la biomasa fúngica y de actinobacterias; siendo esto promovido por las altas concentraciones de ácido graso ciclopropílico. Este último considerado como una respuesta adaptativa inducida por estrés microbiano encontrado en bacterias Gram negativas.

Así mismo, Vallejo y colaboradores., (2012) evaluaron estos mismos tipos de manejo del suelo: monocultivo convencional de pasto, sistema silvopastoril

intensivo y bosque en una consecuencia de 3 a 15 años, en el departamento del Valle del Cauca, donde las entradas de basura favorecen la formación de unos complejos denominados “islas fértiles” en los sistemas silvopastoriles, generando un impacto sobre la productividad de los cultivos. Los autores hacen énfasis en la evaluación del efecto de los diferentes usos del suelo y el dosel de los árboles de *Prosopis juliflora* sobre las propiedades fisicoquímicas y las comunidades microbianas del suelo. Los análisis arrojaron que en los monocultivos convencionales de pasto, predominan bacterias Gram negativas, mientras que en los sistemas silvopastoriles y los bosques, son y las actinobacterias; siendo los bosques y los sistemas silvopastoriles más similares entre sí, en comparación con los monocultivos convencionales de pastos desde el punto de vista de un perfil FAME (perfil de ácidos grasos) , las actividades enzimáticas fueron más altas bajo el dosel de *Prosopis juliflora*, concluyendo así que la estructura y composición de las comunidades microbianas dependen en gran medida de los sistemas de manejo del suelo, similares a los resultados reportados por Vallejo y colaboradores (2011).

Siguiendo este enfoque, Cubillos y colaboradores (2016), señalan que la degradación en parte se debe al reemplazo de bosque nativo por monocultivos convencionales de pasto y que los sistemas silvopastoriles resultan útiles a la hora de aumentar servicios ecosistémicos que se traducen en la conservación de elementos claves del paisaje y contribuyen a la calidad y salud del suelo, Los investigadores examinaron la variación total de la comunidad de bacterias oxidantes de amonio en una consecuencia de 3 a 15 años de sistemas silvopastoriles, comparándolos con monocultivos convencionales de pasto y bosque nativo.

Adicionalmente los árboles de *Prosopis juliflora*, se investigaron como una fuente relativa para las propiedades microbianas del suelo, con lo que se determinó que las comunidades microbianas del suelo varían según el uso de este, con una elevada similitud entre bosques y sistemas silvopastoriles, en comparación con los monocultivos convencionales de pasto, la abundancia y el potencial de nitrificación por nitrificadores de amonio fue significativamente alto en los monocultivos convencionales de suelo, con respecto al bosque y a los sistemas silvopastoriles, por último, *Prosopis juliflora*, no tuvo un efecto sobre el total de la comunidad microbiana, sin embargo si tuvo efecto sobre la comunidad de bacteria oxidadoras de amonio.

Aguilar Medina (2017), evaluó la fertilidad del suelo bajo cultivo convencional y cultivo ecológico, comprendiendo 20 variedades de pimiento, analizando la fase inicial, intermedia y final del cultivo y la rizosfera en términos de actividad fosfatasa

y catalasa, los resultados mostraron que la variedad, el sistema de cultivo y la interacción entre estos dos tuvieron un efecto significativo sobre la variación de las actividades enzimáticas, arrojando estas últimas valores mayores en cultivos convencionales que en cultivos ecológicos, sin embargo en los cultivos ecológicos la actividad catalasa incrementó en un 75% en la rizosfera, mientras que en el cultivo convencional solo se incrementó un 45%, algunas variedades presentaron mayor actividad enzimática en cultivos ecológicos.

En este contexto Grover y colaboradores (2017), son enfáticos en que las enzimas del suelo responden rápidamente a cambios en el manejo del suelo y la actividad de esta se relaciona en gran medida con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, categorizando así las enzimas del suelo como sensores del estado microbiano, de las propiedades edáficas y de las prácticas de uso y manejo de este, con este los autores concluyen que las enzimas son una herramienta útil que funcionan como marcadores del estado de salud del suelo y que ayudan a gestionar y evaluar los sistemas de productividad a nivel de ecosistemas.

En otra línea investigativa, se encuentran estudios de comunidades microbianas más específicos y que definen unidades de estudio paisajísticas desde el punto de vista de la posición (altitud) de estos, por ejemplo, Salcedo Prada y colaboradores (2014), evaluaron el potencial fosfato solubilizador de las actinobacterias aisladas en diferentes altitudes con suelos a pH bajo y bajas concentraciones de fósforo, para proponer la capacidad enzimática de las cepas aisladas como promotoras de crecimiento vegetal, y obtuvieron un total de 8 cepas (T1C, T1H, T3A, T3C, P3E, F1A, F2A y V2B) con alta actividad enzimática solubilizadora de fósforo.

De igual forma, Avellaneda-Torres y colaboradores (2014) pusieron a prueba la capacidad celulolítica de microorganismos presentes en ecosistemas de páramos, superpáramos y bosque alto – andino, en el Parque Nacional Natural los Nevados (PNNN), de donde aislaron 108 microorganismos obteniendo una capacidad enzimática superior en las comunidades fúngicas fue superior a la de con respecto a las comunidades bacterianas, sin embargo los microorganismos estudiados no cuentan con la capacidad de degradar todos los componentes de la celulosa por lo tanto, los autores proponen hacer cultivos mixtos, para la potencialización de la actividad enzimática.

Con lo expuesto, es posible inferir que las dos líneas de estudio principales de evaluación de diversidad de microorganismos, propiedades del suelo y actividades enzimáticas en Colombia, intentan abordar el vacío de conocimiento a escala de paisajes, y no incluyen la valoración de herramientas compensativas, como estrategia para implementar sistemas agrícolas sostenibles, que disminuyan las

prácticas negativas para los ecosistemas. Estas herramientas compensativas en el país, definen diferentes tipos de uso del suelo y median la modificación de coberturas vegetales y del suelo, lo que puede afectar las variables anteriormente mencionadas.

En Colombia, por lo menos en la literatura no se reportan estudios que valoren las estrategias de compensación como posibles modificadores de las coberturas, la actividad enzimática del suelo y que establezcan el estudio de estas propiedades a escala paisajística, para comprender los cambios que trae la implementación de este tipo de programas.

3. MARCO TEORICO

3.1 MODELO DE COMPENSACIÓN

En Colombia existen políticas de compensación por pérdida de biodiversidad reglamentadas y especificadas por el Manual de compensaciones (Murcia et al., 2017), el cual establece que las medidas de compensación hacen referencia a las actividades que tiene como finalidad revertir mitigar el impacto negativo sobre la biodiversidad, los cuales no pueden ser evitados o corregidos y traen como consecuencia la pérdida de biodiversidad y de coberturas vegetales, los modelos de compensación incluyen fases de importancia trascendental para el correcto desarrollo del programa de compensación, la primera fase corresponde al diseño y selección de metodologías de compensación, la segunda fase corresponde a toda la reglamentación pertinente, la tercer parte es concerniente a la implementación, la cuarta corresponde al seguimiento monitoreo y por último la quinta fase es la de retroalimentación (MADS, 2012).

La prevención, mitigación, corrección y compensación en proyectos, obras o actividades deben tener en cuenta el impacto potencial, dentro de estas, los portafolios de conservación y de exclusión que se traducen en un impacto evitado, este en conjunto con las buenas prácticas, traen consigo las medidas de compensación que incluyen evitación corrección y mitigación de impactos, así mismo, dentro de estas se establecen los factores de compensación como: ¿cuánto compensar? Estableciendo si es vegetación secundaria o ecosistemas naturales, así mismo ¿Dónde compensar? Incluyendo áreas prioritarias de conservación y áreas prioritarias de restauración, pudiendo lo anterior ser implementado a través de conservación, restauración y áreas protegidas existentes (MADS, 2012; David and Sagre, 2015).

3.2 SUELO

El suelo es un sistema natural producto de la mezcla de minerales y restos orgánicos que se encuentra bajo la influencia del clima y medio biológico (INEGI, 2000). Este proporciona los nutrientes y el sostén necesario para el adecuado desarrollo de la vegetación de la cual depende un amplio rango de organismos vivos que van desde microorganismos hasta a animales vertebrados, incluyendo al hombre.

La importancia del suelo radica en los diversos servicios ecosistémicos (SE) de aprovisionamiento, soporte y regulación que ofrece (Perrine Lavelle & Lavelle,

2010), entre los que se encuentran producción de alimentos y biomasa, almacenamiento o fijación de carbono y agua, soporte de las actividades humanas y fuente de materias primas, reserva de biodiversidad, participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros (Burbano, 2016).

3.3 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA

La actividad enzimática se define como la cantidad de enzima presente y el nivel de actividad que esta exhibe para poder llevar a cabo una reacción. Las actividades enzimáticas a nivel de suelo son importantes ya que muchas de las enzimas producidas por los microorganismos asociados a este, actúan como promotoras de crecimiento vegetal, contribuyendo de esta forma a la utilidad y fertilidad del suelo, adicionalmente los microorganismos y los procesos enzimáticos en suelo median gran parte de los ciclos biogeoquímicos contribuyendo así a procesos de incorporación de nutrientes, cambio climático y estructuración de ecosistemas (Wickings et al., 2016).

3.3 ACTIVIDAD AMILOLÍTICA

La actividad amilolítica del suelo es un tipo de actividad enzimática de la cual los microorganismos amilolíticos del suelo son responsables, estos hidrolizan el almidón y glucógeno a través de α -amilasas. Algunos estudios han demostrado que las α -amilasas son producidas por microorganismos, planta y animales, mientras que las β -amilasas son principalmente sintetizadas por plantas; es de esta forma que la actividad amilolítica de los microorganismos del suelo esta influenciada por factores como la vegetación (Micu et al., 2017; Wydro et al., 2018).

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Evaluar las propiedades edáficas y actividad amilolítica de la microbiota bacteriana en suelo de diferentes tipos de paisajes asociados a un programa compensación forestal en el departamento del Cesar – Colombia.

4.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar la físico-química del suelo en los diferentes tipos de paisajes y los diferentes tipos de coberturas asociados al área de estudio.
- Estimar la densidad celular bacteriana y la actividad amilolítica de las bacterias asociadas al suelo de diferentes tipos de paisajes y coberturas en zonas agrícolas del departamento del Cesar.
- Relacionar las propiedades edáficas, la densidad celular bacteriana y la actividad amilolítica con las condiciones de los diferentes paisajes.

5. HIPÒTESIS Y PREDICCIONES

5.1 HIPÒTESIS

La implementación del programa de compensación forestal genera cambios en los elementos integradores del paisaje como coberturas vegetales que afectan las propiedades edáficas, la densidad celular y actividad amilolítica bacteriana.

5.2 PREDICCIONES

- Los valores de las propiedades edáficas tales como: materia orgánica, nutrientes, conductividad hidráulica, humedad y cobertura vegetal serán mayores en las ventanas y coberturas ubicadas dentro del programa de compensación forestal.
- Los valores de densidad celular y número de cepas con actividad amilolítica bacteriana serán mayores en las ventanas y coberturas ubicadas dentro del programa de compensación forestal.

6. MARCO METODOLÓGICO

6.1 ÁREA DE ESTUDIO

6.1.1 Municipio de la Jagua de Ibirico y Municipio de Becerril, Serranía del Perijá (Departamento del Cesar – Colombia)

El departamento del Cesar, en Colombia se encuentra ubicado en la parte noreste de Colombia, cuenta con una extensión aproximada de 22.52.5 Km², el relieve de la zona está constituido en un 57% por planicies y en 43% por montañas, en este sentido el clima varia siendo cálido en la zona de planicies, templado hacia la parte montañosa y hacia la cima se presentan paramos, por su parte los sistemas montañosos presenten en el departamento corresponden a la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía del Perijá, un régimen de lluvias bimodal, caracteriza el departamento, con dos periodos marcados de lluvia entre abril mayo o junio y otro desde agosto a noviembre, mientras que los periodos secos van desde diciembre a marzo y entre junio y julio, el comportamiento climático es altamente influenciado por el nivel sobre el mar, los vientos alisios del norte y la zona de confluencia intertropical (Callejas, 2011; Aguilera M, 2016).

En el área de influencia de la cuenca Tucuy, se han implementado un programa de compensación forestal por las empresas mineras Carbones de La Jagua S.A., Consorcio Minero Unido S.A., Carbones El Tesoro S.A., C.I. Prodeco S.A., Drummond, Nor Carbón, C.I. CNR I Colombian Natural Resources S.A.S y CNR III Ltd Sucursal Colombia; sin embargo, existen predios donde aún no se ha implementado el programa de compensación forestal, pero se está planeando la implementación de este por parte de las empresas a cargo.

El “Plan de Compensación por Sustracción de la Reserva Forestal de la Serranía de Los Motilones” implementado en la parte de sur de la Serranía del Perijá garantizó el pago por aumentar áreas de bosque conservados, la puesta en marcha de acciones de restauración, tales como, corredores biológicos, núcleos de vegetación y enriquecimiento, y la creación de sistemas agroforestales; Siendo los monitores del programa de compensación fundamentales para garantizar el éxito y el cumplimiento de los logros inicialmente planteados.

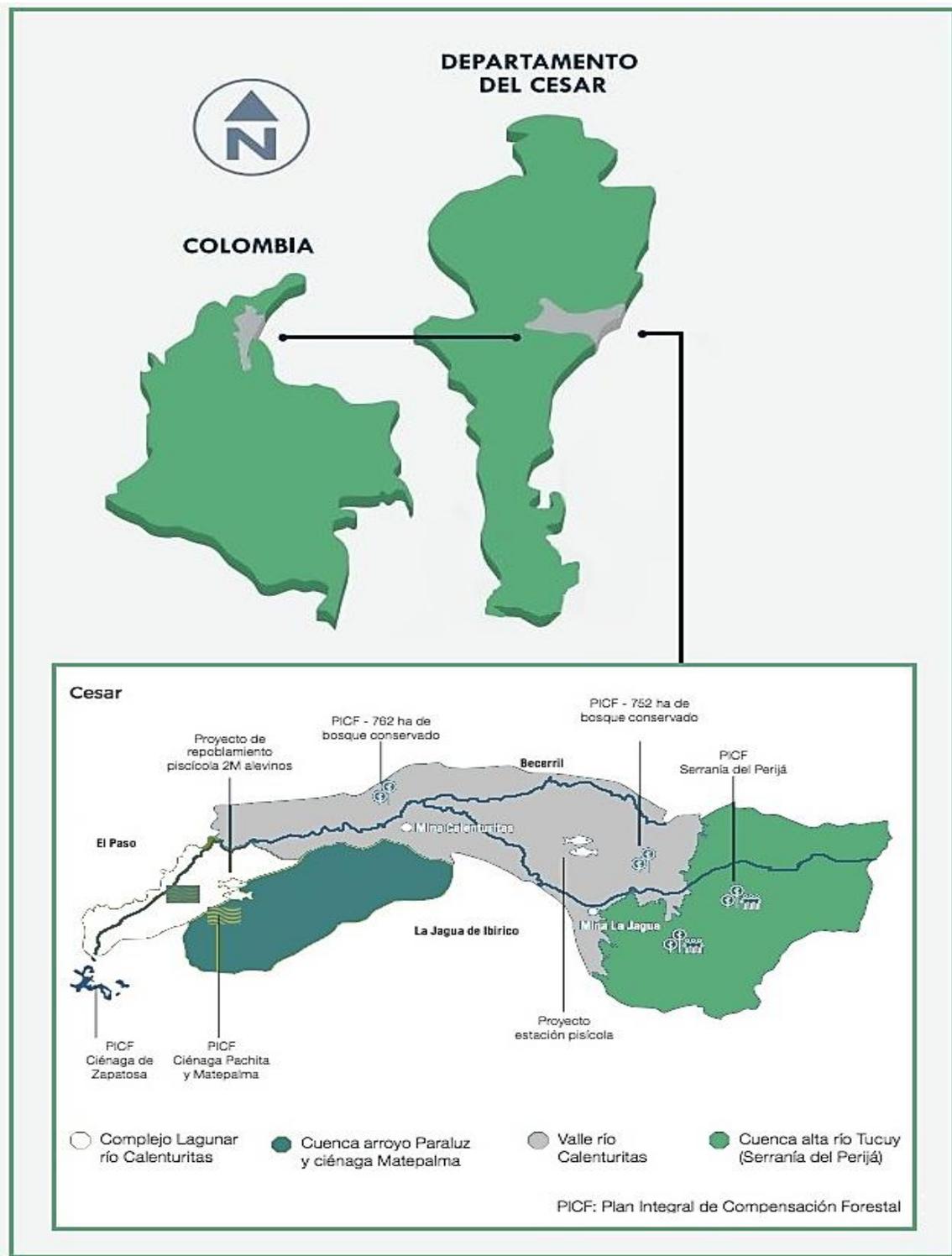


Figura 1. Área de estudio. Parte superior: Departamento del Cesar - Colombia; parte inferior: zonas en el Cesar donde se ha implementó el Plan de Compensación Forestal (Tomado y adaptado de (Prodeco, 2015; The International Republican Institute, 2015).

6.2 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

A partir de mapas de cobertura y la exploración del territorio, se establecieron dos tipos de paisajes, definidos desde la herramienta de manejo: PROGRAMA DE COMPENSACION FORESTAL. Se delimitó un primer paisaje (P1), donde se ha implementado un Programa de Compensación Forestal y un segundo paisaje (P2) correspondiente a veredas donde el Programa de Compensación Forestal no ha sido implementado.

En cada paisaje, se establecieron cuatro ventanas, dos de ellas asociadas a los predios donde se ha implementado el Programa de Compensación Forestal, en la Ventana 1 se encuentran las veredas Zumbador y Nueva Granada y en la ventana 2, la vereda Alto de las Flores; estas se separan de la ventana 3 y 4 por el río Manantial, siendo estas dos últimas ventanas correspondientes a los predios donde no se ha implementado aun el Programa de Compensación Forestal, en la ventana 3 se encuentra la vereda La Unión y en la ventana 4 la vereda Manantial (Carvajal et al., 2009).

Cada ventana se encontraba separada una de la otra por aproximadamente 1.5 Km², en estas se identificaron cuatro tipos de coberturas: sistemas agroforestales de café (C), bosques (B), pastos (P), zonas de regeneración o restauración (RG) y se muestrearon cada tipo de cobertura por duplicado para las muestras de análisis microbiológicos y para las muestras de análisis fisicoquímicos se tomaron 4 muestras de cada tipo de cada cobertura en cada ventana (Figura 2). Las muestras fueron recolectadas durante el mes de julio y los primeros días del mes de agosto correspondiente al periodo seco en la zona.

En la cobertura a muestrear, se delimitó un parcela de 100 m por 100 m (10000 m²:1 Hectárea), siguiendo un recorrido de zigzag (Mendoza and Espinoza, 2017a), se trazaron tres líneas verticales cada una compuesta de tres puntos en paralelo separados uno del otro por una distancia de 30 m, para un total de 9 puntos por parcela (Figura 3). Con la ayuda de un barrenador, en cada punto se tomó una submuestra de suelo de una profundidad de 20 cm, la cual era depositada en una bolsa de suelo con las demás submuestras y posteriormente homogenizadas para obtener una muestra compuesta de 9 submuestras, garantizando así la representatividad (Mendoza and Espinoza, 2017a), las muestras fueron almacenadas en bolsas *ziploc*[®] con su respectivo rotulo (Tabla 1) y almacenadas en neveras de polietileno a 4° C, para su traslado al laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Atlántico.

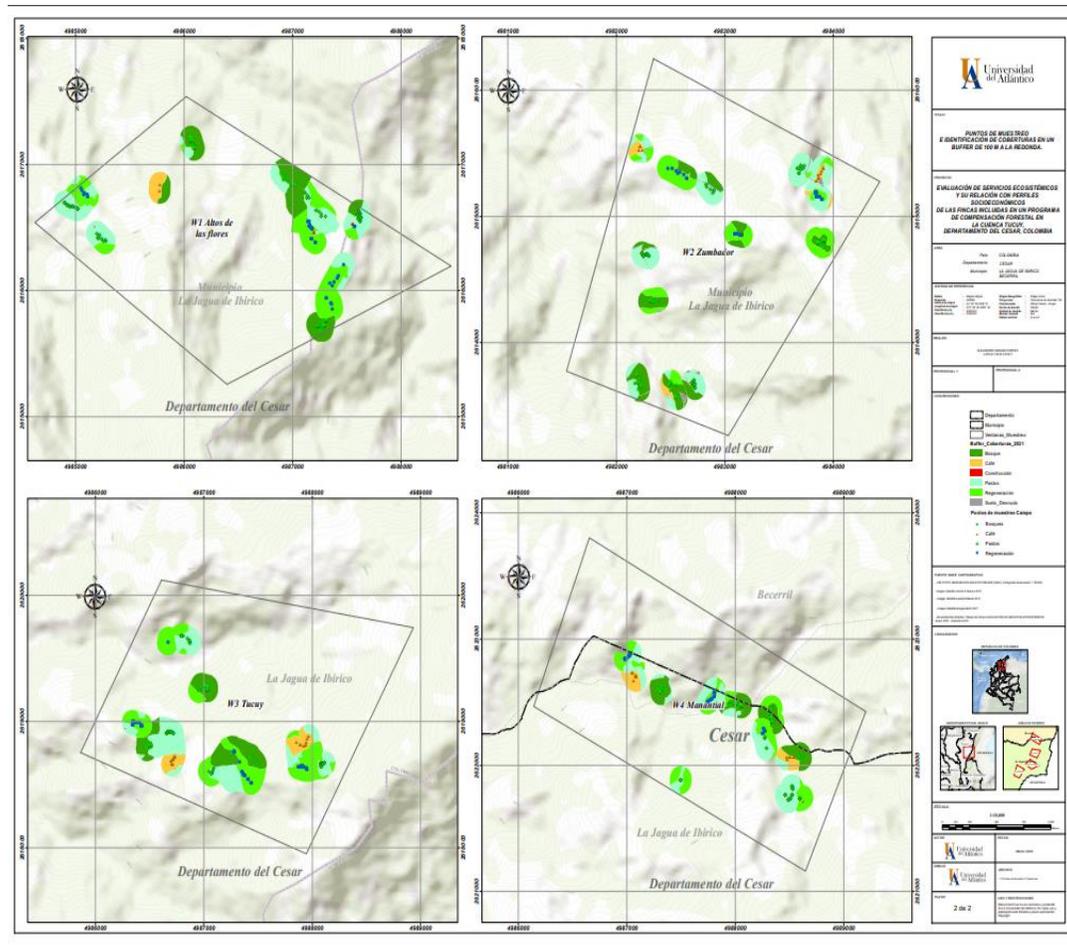


Figura 2. Distribución de las ventanas, coberturas y puntos de muestreo.

Se tomaron en total 32 muestras para análisis microbiológicos, mientras que para análisis fisicoquímicos se tomaron 64 muestras, las 32 muestras de análisis microbiológicos coinciden con 32 puntos para análisis fisicoquímicos distribuidas de la siguiente manera: para análisis fisicoquímicos, se tomaron 4 muestras por coberturas, es decir, se muestrearon 4 pastos, 4 bosques, 4 bosques en regeneración y 4 cultivos de café, para un total de 16 muestras por cada ventana. Para el caso de las muestras de análisis microbiológicos se tomaron 32 muestras 2 por cada cobertura vegetal, para un total de 8 muestras por ventana. Los códigos de las muestras para análisis fisicoquímicos y microbiológicos, así como el número de muestras evaluados por coberturas, ventanas y paisajes se detallan en la Tabla 2.

Los demás puntos muestreados para fisicoquímicos, pero no para microbiológicos, coinciden con otros grupos evaluados tales como hormigas, escarabajos, herpetofauna y macrofauna edáfica, considerando que los muestreos se hicieron

en campañas que vinculaban la evaluación de todos los componentes financiados por el proyecto. Además de coleccionar las muestras, durante los muestreos se georreferenciaron y caracterizaron los puntos, describiendo características generales, referentes a la vegetación, actividades que se realizan en la cobertura muestreada, tiempo de regeneración. La lista de puntos muestreados con la descripción se muestra en el anexo 1.

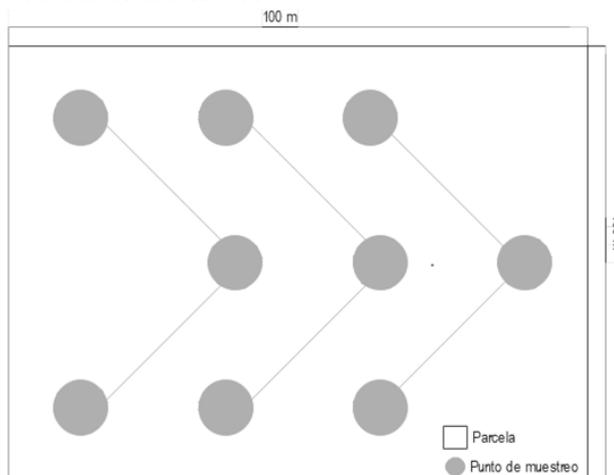


Figura 3. Distribución en Zigzag de puntos de muestreo dentro de la parcela de 100 m x 100m.

Tabla 1. Estructura del diseño de muestreo, referente a paisajes, ventanas, número de coberturas muestreadas y muestras recolectadas. P1: Paisaje 1; P2: Paisaje 2; V1: ventana 1; V2: ventana 2; V3: ventana 3; V4: ventana 4.

Paisaje	Ventana	Cobertura	Número de coberturas muestreadas	Número de puntos muestreados por cobertura	Número de muestras compuestas
<i>P1: Paisaje donde el Programa de Compensación Forestal se ha implementado</i>	V1	SAF Café	2	9	2
		Pastos	2	9	2
		Restauración	2	9	2
		Bosque	2	9	2
	V2	SAF Café	2	9	2
		Restauración	2	9	2
		Bosque	2	9	2
		Pastos	2	9	2
<i>P2: Paisaje donde el Programa de Compensación Forestal no se ha implementado</i>	V3	SAF Café	2	9	2
		Pastos	2	9	2
		Restauración	2	9	2
		Bosque	2	9	2
	V4	SAF Café	2	9	2
		Pastos	2	9	2
		Restauración	2	9	2
		Bosque	2	9	2
Total			32	288	32

Tabla 2 Muestras de suelo según tipo de análisis a realizar (microbiológico y fisicoquímicos), paisaje, ventana y cobertura.

<i>Paisaje</i>	<i>Ventana</i>	<i>Cobertura</i>	Código de las muestras para análisis microbiológico		Código de las muestras para análisis fisicoquímicos.	
<i>P1: Paisaje donde el Programa de Compensación Forestal se ha implementado</i>	V1	SAF Café	W1C4M1	W1C3M2	W1C4S1	W1C3S2
					W1C1S3	W1C2S4
		Pastos	W1P4M1	W1P1M2	W1P4S1	W1P1S2
					W1P2S3	W1P3S4
		Zona de Restauración	W1RG2M1	W1RG4M2	W1RG2S1	W1RG4S2
					W1RG3S3	W1RG4S4
	Bosque	W1B1M1	W1B2M2	W1B1S1	W1B2S2	
				W1B3S3	W1B4S4	
	V2	SAF Café	W2C1M1	W2C3M2	W2C1S1	W2C3S2
					W2C2S3	W2C4S4
		Zona de Restauración	W2RG1M1	W2RG4M2	W2RG1S1	W2RG4S2
					W2RG2S3	W2RG3S4
Bosque		W2B1M1	W2B2M2	W2B1S1	W2B2S2	
				W2B3S3	W2B4S4	
Pastos	W2P1M1	W2P4M2	W2P1S1	W2P4S2		
			W2P2S3	W2P3S4		
<i>P2: Paisaje donde el Programa de Compensación Forestal no se ha implementado</i>	V3	SAF Café	W3C3M1		W3C3S1	W3C1S2
					W3C2S3	W3C4S4
		Pastos	W3P3M1	W3P2M1	W3P3S1	W3P2S2
					W3P1S3	W3P4S4
		Zona de Restauración	W3RG2M1	W3RG4M2	W3RG2S1	W3RG4S2
					W3RG1S3	W3RG3S4
	Bosque	W3B1M1	W3B3M2	W3B1S1	W3B3S2	
				W3B2S3	W3B4S4	
	V4	SAF Café	W4C1M1	W4C4M2	W4C1S1	W4C4S2
					W4C3S3	W4C2S4
		Pastos	W4P1M1	W4P3M2	W4P1S1	W4P3S2
					W4P2S3	W4P4S4
Zona de Restauración		W4RG1M1	W4RG4M2	W4RG1S1	W4RG4S2	
				W4RG2S3	W4RG3S4	
Bosque	W4B1M1	W4B2M2	W4B1S1	W4B2S2		
			W4B3S3	W4B4S4		
Total			32		64	

6.3 FACTORES FÍSICOS DEL SUELO

6.3.1 Temperatura y humedad:

Durante el muestreo en cada parcela se seleccionaron tres puntos centrales donde se realizó la medición de la temperatura y la humedad del suelo con la ayuda de un termohigrómetro digital (TCAM sensor de temperatura y humedad), obteniendo así tres mediciones de temperatura y humedad del suelo por cada parcela muestreada.

6.3.2 Resistencia del suelo a la penetración:

La resistencia a la penetración del suelo se midió, utilizando un penetrómetro de pistón de 6 mm de diámetro. En cada parcela se realizó la medición de la resistencia a la penetración del suelo en tres puntos centrales, en cada punto se limpió la superficie para evitar mediciones sobre piedras u otros materiales que no sean el suelo directamente, suave y constantemente se introdujo el penetrómetro hasta llegar a los 5 mm de profundidad de la marca de penetración (Henríquez *et al.*, 2011).

6.3.3 Densidad Aparente del suelo:

Para medir esta variable, se tomaron muestras de suelo con un cilindro de 0,000114511 m³ de volumen, el cilindro era introducido en el suelo con cuidado de no compactar este, y retirado con el volumen de suelo según su capacidad, las muestras eran depositadas en bolsas Ziploc, rotuladas correctamente y pesadas con una balanza, para determinar el peso húmedo. Posteriormente en el laboratorio, las muestras fueron secadas en una mufla a una temperatura de 105 °C durante 24 horas hasta peso constante, se procedía a pesar nuevamente la muestra en una balanza para determinar el peso seco. Con estos datos se determinó la densidad aparente de la muestra usando la siguiente formula:

$$Pb = Ms/Vt$$

Donde Pb es la densidad aparente del suelo, calculada por la relación del peso seco de la muestra (masa de la fase solida) entre el volumen del cilindro (que incluye los espacios porosos), (Flores-Delgadillo and Alcalá-Martínez, 2010).

6.3.4 Textura (porcentaje de Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar))

La determinación de la textura de cada muestra se realizó por el método de Boyoucos (Gee and Bauder, 1986), El porcentaje de la fracción de un diámetro x, fue calculado por la medición de la densidad de la muestra sedimentada en agua, mediante el uso de un hidrómetro previamente calibrado (Norambuena et al.,

2002). Finalmente, estos porcentajes fueron usados para clasificar la clase textural de la muestra.

6.3.5 Conductividad eléctrica del suelo (CE)

Para determinar la conductividad eléctrica de las muestras recolectadas, el suelo seco fue tamizado con una maya de 2 mm de abertura de poro, se pesaron 20 g de suelo en un recipiente adicionándole 100 mL de agua a una temperatura de 24 °C, el recipiente fue tapado y sometido a agitación en posición horizontal durante 30 minutos, transcurrido el tiempo la solución se filtró empleando papel filtro. En simultaneo se realizó el mismo procedimiento para una muestra blanco, esto con el fin de medir cuanto contribuye el agua, el vidrio del recipiente y el papel filtro al dato de conductividad, se procedió a realizar la medición con un medidor de conductividad previamente calibrado, el valor de conductividad del blanco no excedió los 0,1 dS/m (Decisiemens por metro) tal como indica la norma colombiana NTC 5596 (ICONTEC, 2008; Jara Domínguez et al., 2019).

Algunas condiciones de especial cuidado para medir adecuadamente la conductividad eléctrica incluyeron, volumen filtrado suficiente para realizar la medición, la solución y el filtrado se realizó a 20 °C, agitación suficiente y necesaria para mantener las partículas suspendidas, para realizar la medición la temperatura estuvo ajustada a 25 °C (ICONTEC, 2008).

6.4 FACTORES QUÍMICOS EN EL SUELO

6.4.1 pH del suelo

El pH del suelo fue medido pesando 10 g suelo seco (previamente tamizado a ≤ 2 mm), posteriormente mezclado con 20 mL de agua destilada en beaker y agitado con una varilla de vidrio aproximadamente durante 1 minuto, la solución se dejó reposar durante 30 minutos, para finalmente determinar el valor introduciendo un electrodo de pH previamente calibrado en la fase acuosa de la suspensión, hasta que la medida se estabilice en un tiempo promedio de 1 minuto (Osorio, 2012).

6.4.2 Materia Orgánica (MO)

La materia orgánica en los suelos analizados, se calculó según la Norma Colombiana NTC 5403 Walkey & Black, a través de métodos de oxidación seca. Para esta se tamizaron las muestras con un tamiz de 1 mm de abertura; se colocó la muestra en el crisol, se le adicionó HCl en exceso y homogeneizó, transcurridas 4 horas y secó la muestra durante 16 horas a 70 °C y finalmente se procedió a realizar la medición en el equipo (ICONTEC, 2006).

6.4.3 Nitrogeno Total (NT)

La determinación del nitrógeno total se determinó usando el método Kjeldahl. Se pesaron 5 g de la muestra, esta se introdujo en un tubo de digestión, se le añadieron 2 tabletas Kjeldahl de 5 g de catalizador de Missouri, 20 mL de Ácido Sulfúrico 98% y se suspendió la muestra agitando suavemente. Una vez resuspendida la muestra, se colocó el tubo de digestión con la muestra en la unidad de digestión y en el bloque calefactor a 380 °C, hasta la aparición de humos blancos, durante 3 horas hasta que la muestra tomó una coloración transparente, posteriormente se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente y se le añadió 100 mL de agua (Almendro-Candel et al., 2006).

Se procedió a destilar la muestra añadiendo 50 mL de hidróxido de sodio al 50 % para neutralizar el pH de la muestra y convertir el NH_4^+ en NH_3 , la corriente de vapor de agua arrastró el NH_3 formado y este se condensó. El NH_3 se colectó en 50 mL de ácido bórico al 4 % conteniendo 6 – 7 gotas de indicador de Tashiro. Cuando el NH_3 reaccionó con el ácido bórico, la solución viró de rojo violeta a verde (pH 4,4-5,8) debido al cambio del indicador al pasar de la forma ácida a la forma básica. En la solución de ácido bórico se capturaron alrededor de 150 mL del condensado. Finalmente, se realizó la valoración con HCl 0,25 mol/l hasta que la solución tomó un ligero color violeta, con la concentración y el volumen de HCl gastados en la valoración, se procedió a calcular la cantidad de nitrógeno (Almendro-Candel et al., 2006).

6.4.4 Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Zinc (Zn), Olsen Disponible

Para la determinación de estos elementos, se pesó 2,5 g de suelo en un tubo de centrifuga de 50 ml anotando el peso. Posteriormente se usó un cilindro graduado de 25 mL y se agregó 25 mL de solución Olsen (NaHCO_3 0,5 M + NaOH (aproximadamente 2 g de NaOH por litro)) y se agitó por 10 minutos, dejando reposar durante 7 a 10 minutos hasta lograr cierto asentamiento de las arcillas de la solución. Se procedió a filtrar doblando los filtros en forma de un embudo. Una vez la muestra filtrada, con una pipeta se aspiró con cuidado la fase líquida más clara de la parte superior del tubo o botella y se transfirió 10 mL a una segunda botella con una tapa perforada colocando un filtro en la tapa bien sellada; en un vaso plástico se recolectaron las gotas de filtrado hasta que se obtuvo 7 mL de solución (ICONTEC, 2007). En un vaso limpio, se agregaron 3,3 mL de solución de bisulfato (15g/100mL), se agregó el extracto filtrado de la probeta a la taza con el bisulfato y se dejó burbujear. Se volvió a colocar el extracto en la probeta y con agua se completó a un volumen de 20 mL mezclándolo bien; 10 mL fueron tomados como blanco y 10 mL fueron usados para la medición colorimétrica, se adiciono el reactivo colorimétrico y se realizó la medición en el colorímetro (ICONTEC, 2007).

6.4.5 Carbono Orgánico, Fosforo Disponible, Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio

Los elementos Carbono Orgánico, Fosforo Disponible, Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio, fueron determinados siguiendo los protocolos consignados en la tabla 3.

Tabla 3. Protocolos para la determinación de Carbono Orgánico, Fosforo Disponible, Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio.

ELEMENTO	UNIDAD	PROTOCOLO
Carbono orgánico	g/100g	GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.
Fosforo Disponible (P) Bray II	mg/kg	GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.
Azufre (S) Disponible	mg/kg	Protocolo Agrosavia: Fosfato Monobásico de Calcio.
Boro (B) Disponible	mg/kg	Protocolo Agrosavia: Fosfato Monobásico de Calcio
Calcio (Ca) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.
Sodio (Na) Disponible	cmol(+)/kg	Bases en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.

6.4.6 Cobertura vegetal

El porcentaje de cobertura vegetal fue determinado en la 4 ventanas, en tres puntos centrales de la pacerla, usando la aplicación para teléfonos inteligentes: “Canopy capture”, se tomaron fotografías hemisféricas empleando el dispositivo Xiaomi Mi 10T con lente incorporada (Tichý, 2016). En el punto de muestreo, se tomaron cuatro fotografías en la dirección de los cuatro puntos cardinales (Norte, Sur, este, Oeste) con el teléfono ubicado a una distancia de 1 m del observador y a una altura de 1 m del suelo, este procedimiento se realizó antes de la puesta del sol para evitar refracción y dispersión de la luz en las imágenes tomadas que pudieran afectar el porcentaje de cobertura vegetal determinado (Garrido Velarde *et al.*, 2017).

6.4.7 Conductividad Hidráulica del suelo

Empleando el método Beerkan se realizaron 200 mediciones de infiltración de agua en el suelo durante los muestreos, debido a lo extenso que era realizar estos experimentos *in situ*, solo seleccionó una cobertura de cada tipo por ventana para realizarlos, en total se evaluó la infiltración de agua en 4 coberturas por cada ventana (1 pasto, 1 sistema agroforestal de café, 1 bosque en regeneración y 1 bosque). El método Beerkan consiste en introducir un cilindro hueco en la superficie del suelo en el cual posteriormente se deposita un volumen establecido

de agua y se registró el tiempo que tarda en penetrar la superficie del suelo, estas mediciones se realizaron entre 12 a 15 veces hasta conseguir que la curva de infiltración de agua se estabilizara (Lassabatère et al., 2006), para finalmente calcular la conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s), esta variable fue mapeada usando herramienta *raster* para la proyección extrapolada de la ventana completa con cartografía oficial que representa los drenajes hídricos asociados a la zona, esto último se realizó empelando el software ARGis®.

6.5 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL SUELO

A partir de las muestras de suelo, se cultivó 1g EN caldo nutritivo por 48 horas y posteriormente se procedió a realizar la siembra superficial en placas de agar con medio selectivo para microorganismos amilolíticos (Agar Almidón). Posteriormente, las placas de agar se incubaron de 24 a 48 horas hasta poder contar las UFC y el número de cepas con actividad amilolíticas. Con el número de UFC, se calculó la densidad de la población microbiana expresado como el número de células por gramo de suelo. Las variables fueron mapeadas representando las densidades de los microorganismos (número de células por gramo de suelo) y la actividad amilolítica en las coberturas de cada ventana usando herramienta *raster* para la proyección extrapolada de la ventana completa, empelando el software ARGis®.

6.6 ANÁLISIS DE DATOS

Los análisis estadísticos de los datos fueron realizados usando el software R distribuido mediante la licencia pública general de GNU. Para las variables físicas y químicas, inicialmente se realizaron análisis exploratorios basados en la mediana, los cuales permitieron ver el comportamientos de estas con respecto a las coberturas, ventanas y paisajes, posteriormente, se realizaron análisis de correlaciones para observar la relación existente entre las variables continuando con un análisis de componente principales para explicar la varianza de las muestras en diferentes componentes y ver patrones de agrupación entre las variables las coberturas, las ventanas y los paisajes.

Para las variables microbiológicas, se realizaron test de normalidad para verificar los supuestos normalidad y homocedasticidad; posteriormente se procedió a realizar una comparación entre los datos empelando en Test de Friedman (no paramétrico) para determinar diferencias entre diferentes tratamientos haciendo múltiples repeticiones de la prueba (Friedman, 1940), los análisis se realizaron

usando el software *GraphPad PRISM®* en su versión 9.0. Para detectar las diferencias específicas entre ventanas y coberturas se realizó un test de múltiples rangos de Duncan. Posteriormente se categorizaron las variables evaluando las coberturas y ventanas como sitios con alta o baja densidad bacteriana, adicionalmente se evaluó el comportamiento de las variables microbiológicas a través de dos modelos (logístico y logarítmico), la conductividad hidráulica también fue analizada con respecto a las variables microbiológicas.

7. RESULTADOS

Como resultados de la presente investigación se obtuvo la siguiente información.

7.1 FACTORES FISICOQUÍMICOS DEL SUELO

7.1.1 Temperatura y humedad

En la figura 4, se observa el comportamiento de la temperatura (Izquierda) y la humedad (derecha), para cada tipo de cobertura muestreada en la ventana 1, las gráficas presentan los valores promedio de temperatura y porcentaje de humedad obtenidos durante el muestreo. Los valores más elevados de temperatura del suelo (25,33 °C y 26,33 °C) corresponden a las coberturas de café y pastos respectivamente, mientras que los valores más bajos de humedad (33,33% y 26,33%) se registran en coberturas de Bosque y regeneración. Las temperaturas promedio más bajas con respecto a las demás coberturas se presentaron en las coberturas de bosque y de regeneración (20 °C en bosques; 21 °C en zonas de regeneración), con respecto a la humedad se observaron valores más altos en sistemas agroforestales de café y zonas de regeneración.

Con respecto a las coberturas de sistemas agroforestales de café evaluadas, se presentaron valores similares en las variables de temperatura y humedad del suelo, en estas coberturas no se observaron diferencias marcadas entre la temperatura y humedad y los valores de estas se presentan cercanos. En general, los valores de temperatura se mantuvieron similares entre los diferentes puntos dentro de cada cobertura, las barras de error en el grafico lo evidencian.

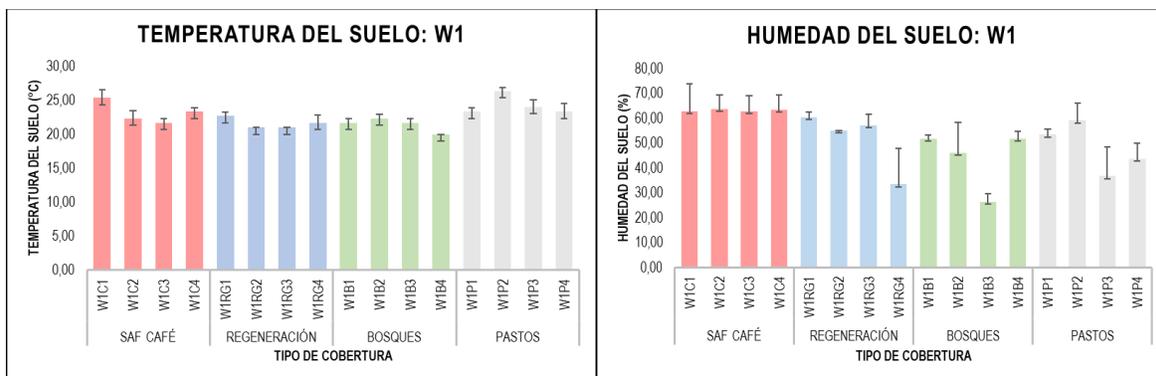


Figura 4. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 1 (W1).

La figura 5, muestra el comportamiento de la temperatura y humedad del suelo en la ventana 2, las coberturas con valores de temperatura más altos fueron los pastos (22,47 °C y 22,50 °C), seguido de los sistemas agroforestales de café, (21,87 °C), en general los valores de temperatura en esta ventana entre las diferentes coberturas fueron similares entre sí. Con respecto a la humedad del suelo, se observa un patrón más heterogéneo, donde la variación en los valores entre las coberturas es mayor, las coberturas con humedad más elevado fueron los bosques (58 y 50 %) y las regeneraciones (55 y 48 %).

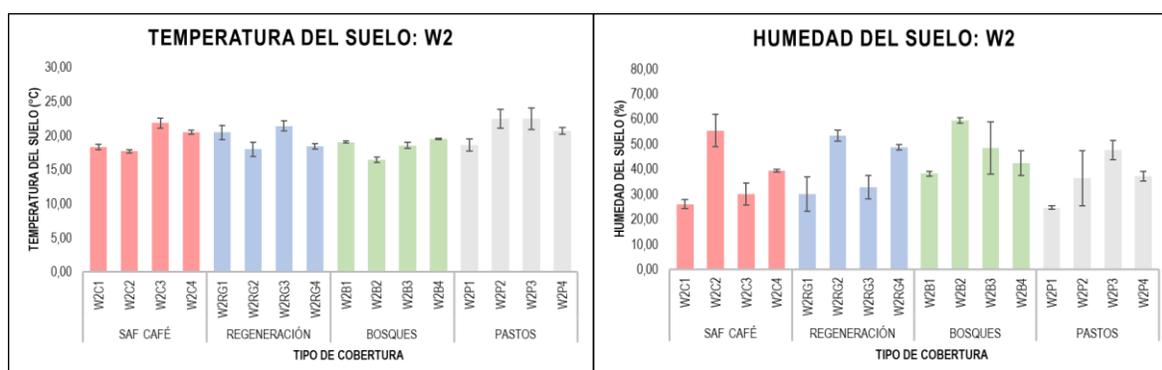


Figura 5. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales muestreadas sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 2 (W2).

Con respecto a la ventana 3, en la figura 6, se visualiza que las mayores temperaturas en el suelo están distribuidas en las coberturas de sistemas agroforestales de café (25 Y 23,87 °C) y regeneración (22,67 y 21,67 °C) a pesar que el patrón de temperatura es más heterogéneo en esta ventana en comparación con las otras se observan valores similares entre cada cobertura y las barras de error no muestran desviaciones marcadas en los datos, la humedad del suelo en esta ventana presenta valores máximos en las coberturas de sistemas agroforestales de café (60 Y 63 %), regeneración (64 y 50 %) y pastos (58 y 57 %), las barras de error muestran desviaciones más elevada en los datos de esta variable.

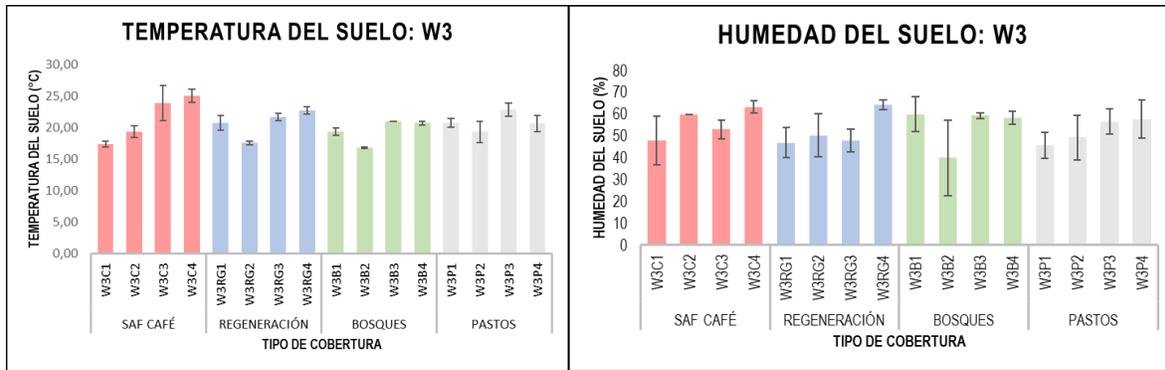


Figura 6. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales: sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 3 (W3).

En la figura 7, se observa el comportamiento de la temperatura y humedad del suelo en la ventana 4, las temperaturas del suelo presentaron valores similares en todas las coberturas vegetales con valores entre los 22 °C y los 25 °C, presentando esta variable un comportamiento homogéneo en toda la ventana, caso contrario a la humedad del suelo la cual presentó valores variables entre coberturas y desviaciones altas en el set de datos, los valores más altos de humedad en el suelo se presentaron en la cobertura de sistemas agroforestales con 65 % y 57,67 %, mientras que el más bajo estuvo en la cobertura de pastos con un valor de 12,67 %.

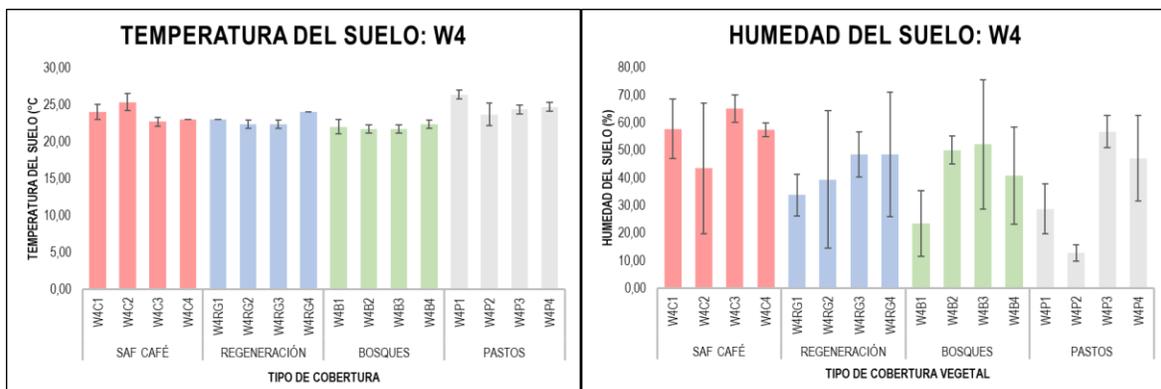


Figura 7. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las diferentes coberturas vegetales sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas en la ventana 4 (W4).

Los datos presentados anteriormente en las gráficas muestran que la ventana 1 y la ventana 4 presentan valores más elevados de temperatura, con respecto a la ventana 2 y la ventana 3 donde la temperatura del suelo exhibe valores más bajos, aunque la variable humedad presenta una distribución más heterogénea entre las coberturas, también se observan valores más altos en la ventana 1 y 4, en comparación con la ventana 2 y 3.

7.1.2 Cobertura Vegetal

La medición de estas variables en las diferentes ventanas de muestreo evidencia que los mayores valores con respecto a la vegetación que cubre la cobertura, se encuentran en Bosques y zonas de regeneración, áreas donde las especies arbóreas se encuentran distribuidas de forma regular. Los sistemas agroforestales de café también presentan coberturas vegetales significativas, pero varían entre ellos en comparación con los bosques y las zonas de regeneración donde las coberturas vegetales presentan valores similares entre sí, al ser sistemas agroforestales de Café, incorporan algunas especies arbóreas alternándolas con las plantaciones de café lo que aumenta las coberturas vegetales en estos sistemas productivos.

La figura 8, muestra el comportamiento de las coberturas vegetales en los diferentes puntos de muestreo, en esta se puede observar que la ventana 1 y la ventana 4 presentan valores similares entre sus coberturas vegetales, la ventana 3 por su parte presente los valores más altos de cobertura vegetal, mientras que en la ventana 2 los valores de cobertura son variables entre sí y las desviaciones de los datos son más altas evidenciando heterogeneidad en los puntos donde la variable fue medida.

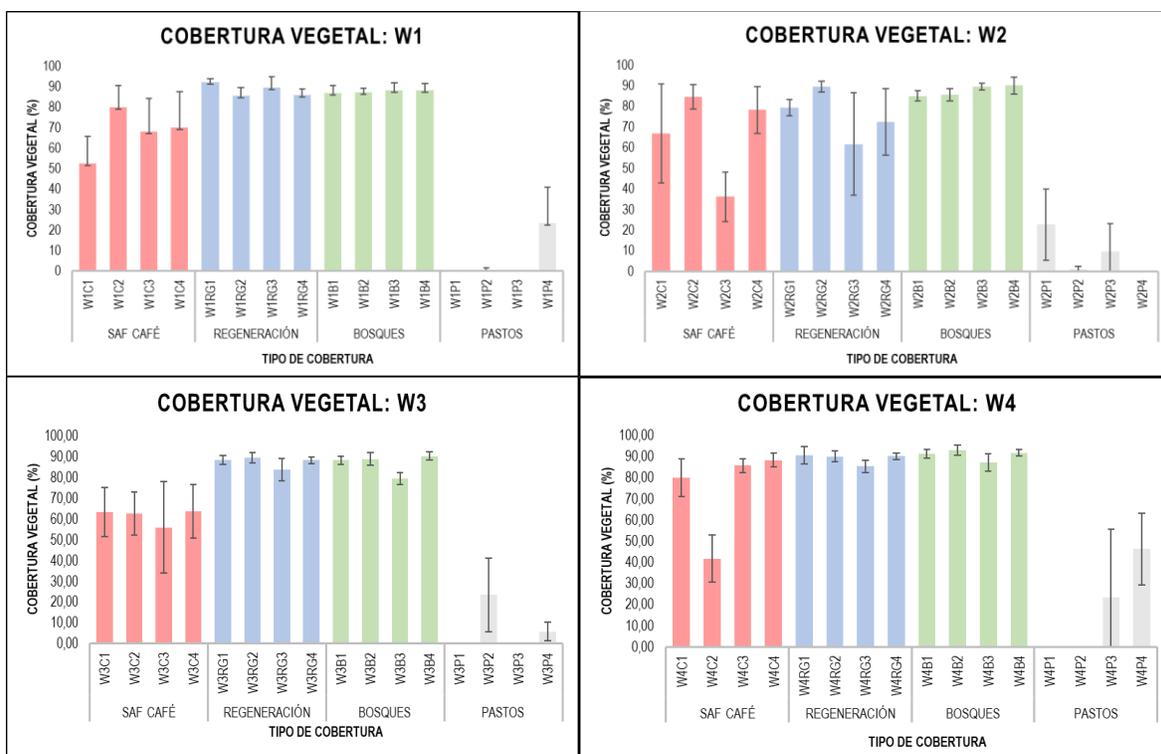


Figura 8. Cobertura vegetal en las diferentes ventanas, sistemas agroforestales (SAF) Café (C), Regeneración (RG), Bosque (B), Pastos (P), muestreadas.

7.1.3 Resistencia a la penetración del suelo

La Figura 9, muestra las medias de las mediciones realizadas para determinar la resistencia a la penetración del suelo. En esta, se observa que las coberturas con mayores valores de resistencia a la penetración fueron los pastos para la ventana 1 con 3,78 y 3,61 Kg.cm⁻², y 3,69 y 3,64 Kg.cm⁻² Para la ventana 4. Las zonas de regeneración también presentaron valores elevados de resistencia a la penetración 3,17 y 2,72 Kg.cm⁻² para la ventana 4 y 3,00 y 2,83 Kg.cm⁻² para la ventana 3.

En la ventana 1 y 2 los bosques y zonas de regeneración presentaron valores más bajos de resistencia a la penetración del suelo en comparación con las coberturas de pastos y sistemas agroforestales café, diferente a lo que se evidencia en la ventana 3 y 4, donde las zonas de regeneración presentaron valores superiores de resistencia a la penetración más altos que las coberturas de sistemas agroforestales de café. En todas las ventanas, las coberturas con valores más bajos de resistencia a la penetración fueron los bosques y las que mostraron valores más altos fueron los pastos.

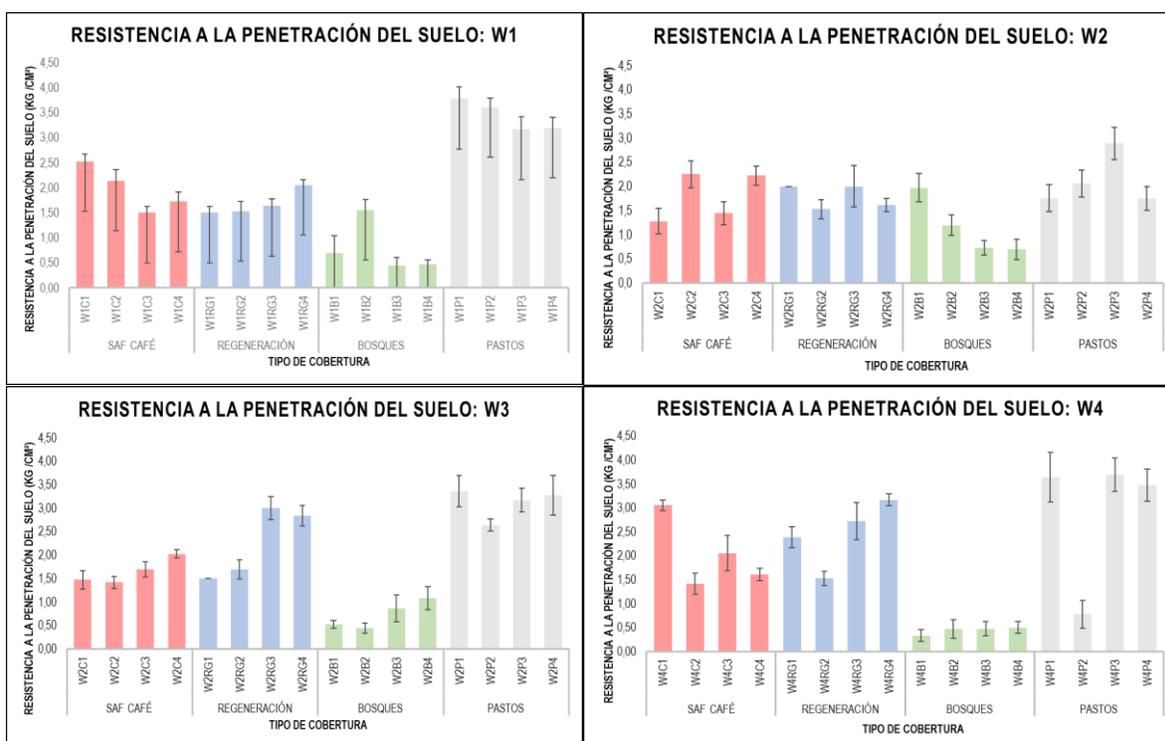


Figura 9. Resistencia a la penetración del Suelo en las diferentes coberturas vegetales muestreadas en las diferentes ventanas de muestreo.

7.1.4 Densidad Aparente del suelo

Los gráficos de la figura 10, muestran que, en todas las ventanas, los sistemas agroforestales de café y los pastos presentaron valores más altos de densidad aparente, mientras que los más bajos se encuentran en las coberturas de bosques y zonas de regeneración.

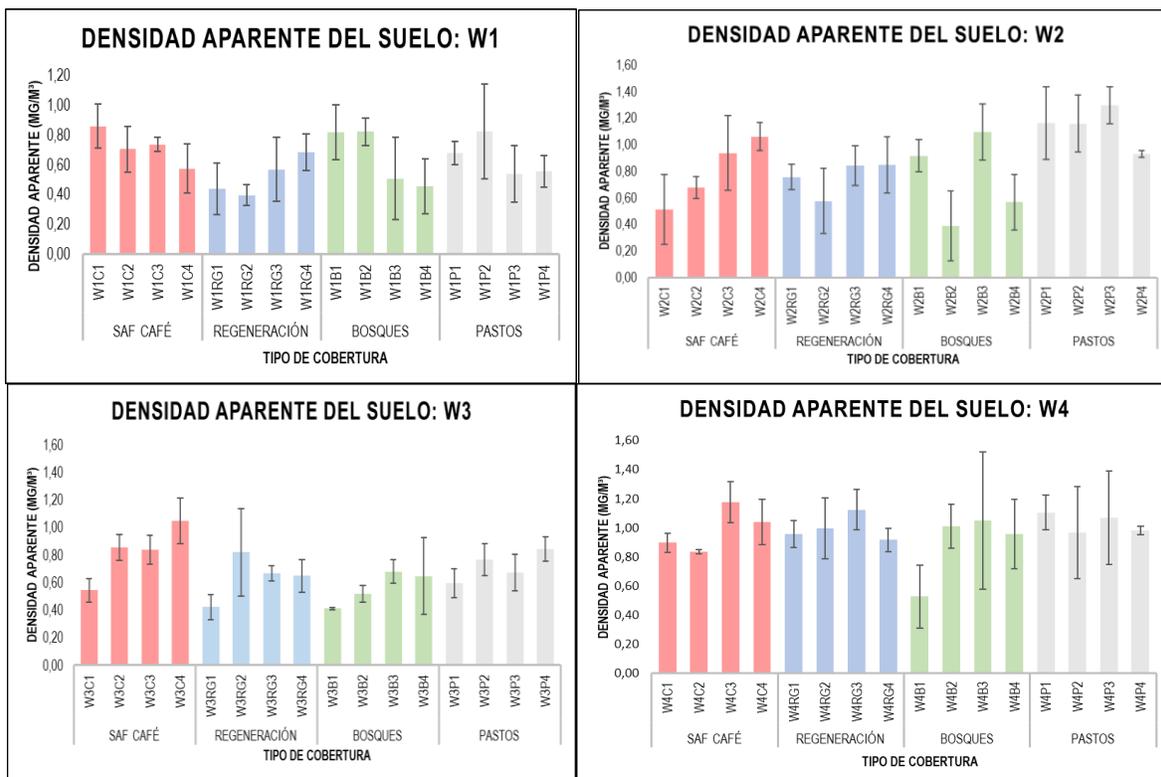


Figura 10. Densidad aparente del Suelo en las diferentes coberturas vegetales muestreadas en las ventanas (W1-W4).

7.1.5 Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas

A continuación, se muestran los resultados arrojados por los análisis de las variables físicas y químicas del suelo, para ver la nomenclatura y etiquetas de cada variable discriminada dirijase a la tabla del anexo 2.

La tabla 4, detalla la estadística descriptiva de los datos analizados de cada variable según la ventana, por cada ventana se analizó un set de datos con un N= 16; en las columnas para cada variable se muestra la mediana y entre paréntesis los valores máximos y mínimos de distribución, siendo el primer dato el mínimo

equivalente al borde del primer cuartil y el segundo dato el máximo del tercer cuartil, las variables que presentan datos perdidos tienen asignada una fila abajo con las letras NAs en la que se cuantifican el número de datos perdidos para esta variable; estos datos perdidos hacen referencias a mediciones que no pudieron ser determinadas durante el análisis físico y químico de las muestras.

Para el caso de la textura del suelo, al ser una variable categórica, se contabilizaron los datos de ocurrencia, mostrando en el primer dato la frecuencia por ventana con la que aparece esa categoría y entre paréntesis el equivalente a porcentaje, esta variable no fue incluida en los *t* elaborados para observar el comportamiento de los datos, mostrados más adelante.

La mayoría de muestras para la ventana uno (8; 50%) permiten categorizar este tipo de suelos como franco arcilloso (F.Ar), el 38 % de las muestras para esta misma ventana se clasificaron como solamente Arcillosos (Ar), igualmente para la ventana 2, el 50 % de las muestras permiten clasificar este suelo como Franco arcilloso y el 38 % como franco (F).

En la ventana 3 por su parte, la mayoría de las muestras pertenecen a la clase textural franco arcilloso (56%) sin embargo el 19 % de las muestras se categorizaron como franco arcilloso arenoso (F.Ar.A), y el 24% adicional como arenoso (A) y franco contando estas dos últimas categorías con 12 % cada una. Por último, la ventana 4 presenta el 62% de las muestras analizadas categorizadas como franco arcilloso, mientras que el 31% solo como franco.

Tabla 4. Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas por ventanas (W1: ventana 1; W2: ventana 2; W3: ventana 3; W4: ventana 4).

Variable	W1, N = 16 ¹	W2, N = 16 ¹	W3, N = 16 ¹	W4, N = 16 ¹
fis_altura	1,354 (1,232, 1,370)	1,302 (1,193, 1,435)	1,274 (1,163, 1,366)	1,018 (939, 1,063)
fis_temperatura	22.33 (21.67, 23.33)	19.28 (18.44, 20.88)	20.67 (19.32, 21.92)	23.00 (22.33, 24.08)
fis_humedad	54 (45, 61)	39 (32, 48)	55 (48, 59)	48 (38, 53)
fis_dosel	70 (32, 78)	56 (27, 80)	67 (26, 91)	67 (31, 85)
fis_da	0.63 (0.53, 0.76)	0.89 (0.66, 1.07)	0.67 (0.58, 0.83)	0.99 (0.95, 1.06)
fis_resistencia	1.68 (1.50, 2.69)	1.75 (1.40, 2.02)	1.69 (1.34, 2.87)	1.84 (0.71, 3.09)
fis_arena	32 (27, 38)	41 (34, 44)	36 (29, 47)	56 (50, 61)
fis_arcilla	34 (30, 45)	28 (23, 34)	30 (26, 34)	18 (12, 20)
fis_limo	29.7 (26.4, 34.5)	33.0 (30.2, 34.6)	32.6 (28.2, 36.5)	28.4 (22.3, 33.0)
fis_textura				
Ar	6 (38%)	0 (0%)	2 (12%)	0 (0%)
F	1 (6.2%)	6 (38%)	2 (12%)	5 (31%)

F-A	0 (0%)	1 (6.2%)	0 (0%)	10 (62%)
F.Ar	8 (50%)	8 (50%)	9 (56%)	0 (0%)
F.Ar-A	1 (6.2%)	1 (6.2%)	3 (19%)	1 (6.2%)
fis_ce	1.63 (1.24, 1.88)	1.71 (1.57, 2.22)	1.86 (1.59, 2.51)	1.82 (1.38, 1.91)
fis_cice	9.5 (8.0, 11.0)	8.6 (6.5, 17.1)	9.7 (8.4, 12.9)	15.5 (12.1, 18.7)
fis_ks	2,137 (1,143, 3,054)	283 (186, 359)	240 (140, 282)	2,492 (1,666, 3,225)
(NAs)	12	12	13	12
qui_ph	4.29 (4.12, 4.72)	4.74 (4.13, 6.00)	4.92 (4.23, 6.03)	6.35 (6.15, 6.59)
qui_acidez	3.09 (0.88, 4.38)	3.04 (1.12, 3.64)	0.78 (0.41, 4.01)	0.38 (0.38, 0.38)
(NAs)	0	6	5	15
qui_al	1.96 (0.39, 2.97)	2.07 (0.56, 2.48)	0.61 (0.19, 2.96)	0.13 (0.13, 0.13)
(NAs)	0	6	5	15
qui_c	2.12 (1.86, 2.38)	1.77 (1.56, 2.61)	2.12 (1.90, 2.46)	2.76 (2.18, 4.12)
qui_mo	3.66 (3.20, 4.12)	3.04 (2.70, 4.49)	3.66 (3.27, 4.24)	4.75 (3.76, 7.10)
qui_s	23 (17, 27)	21 (18, 28)	22 (18, 26)	18 (12, 26)
qui_ca	3.7 (1.7, 5.6)	5.0 (2.1, 14.3)	6.6 (2.9, 9.7)	13.3 (10.0, 15.6)
qui_mg	1.93 (1.32, 2.39)	1.67 (0.93, 2.36)	2.03 (1.47, 2.74)	2.17 (1.76, 2.50)
qui_k	0.35 (0.29, 0.40)	0.45 (0.33, 0.52)	0.45 (0.34, 0.52)	0.41 (0.32, 0.49)
qui_b	0.60 (0.52, 0.74)	0.69 (0.43, 0.86)	0.55 (0.41, 0.80)	0.56 (0.42, 1.02)
qui_fe	262 (144, 357)	136 (77, 276)	130 (94, 318)	62 (47, 64)
qui_cu	1.46 (1.07, 1.86)	1.01 (0.90, 1.26)	1.22 (1.07, 1.37)	0.97 (0.90, 1.46)
qui_mn	90 (49, 140)	123 (81, 150)	102 (85, 134)	70 (65, 103)
qui_zn	0.90 (0.90, 1.49)	0.90 (0.90, 1.65)	0.90 (0.90, 2.30)	1.75 (1.45, 2.38)
<0.14	16 (100%)	16 (100%)	16 (100%)	16 (100%)
1 Median (IQR); n (%)				

Por otro lado, la tabla 5, muestra la estadística descriptiva de los datos analizados de cada variable según las coberturas, por cada cobertura se analizó un set de datos con un N= 16; en las columnas para cada variable se muestra la mediana y los valores máximos y mínimos de distribución, se muestran los datos en las columnas marcadas como NAs. La clase textural del suelo con respecto a las coberturas todas las coberturas presentan mayores porcentajes en la clasificación de franco arcilloso (F.Ar). Para explicar de forma más detallada lo que esta consignado en las tablas 4 y 5, en el siguiente apartado a través de la comparación de medianas en las figuras 11 y 12 se explica de forma separada el comportamiento de las variables físicas y químicas con respecto a las ventanas y las coberturas.

Tabla 5. Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas según las ventanas de muestreo (forest: bosques; regeneration: regeneración; coffee: sistemas agroforestales de café; pasture: pastos).

Variable	forest, N = 16¹	regeneration, N = 16¹	coffee, N = 16¹	pasture, N = 16¹
fis_altura	1,150 (1,066, 1,279)	1,303 (1,091, 1,374)	1,248 (1,124, 1,361)	1,220 (1,119, 1,361)
fis_temperatura	20.84 (19.26, 21.67)	21.55 (20.62, 22.41)	22.50 (20.18, 23.90)	23.08 (20.72, 24.08)
fis_humedad	49 (41, 54)	48 (38, 54)	58 (47, 63)	46 (37, 54)
fis_dosel	88 (77, 95)	71 (66, 89)	61 (47, 74)	21 (8, 26)
fis_da	0.67 (0.52, 0.93)	0.72 (0.58, 0.87)	0.85 (0.70, 0.97)	0.89 (0.68, 1.08)
fis_resistencia	0.61 (0.47, 0.92)	1.85 (1.53, 2.47)	1.71 (1.46, 2.16)	3.18 (2.50, 3.50)
fis_arena	47 (35, 54)	41 (29, 50)	41 (33, 50)	38 (29, 44)
fis_arcilla	24 (19, 34)	31 (20, 39)	30 (22, 32)	28 (24, 35)
fis_limo	29.7 (24.5, 32.9)	29.7 (23.9, 34.6)	31.5 (28.0, 35.2)	34.5 (30.1, 34.7)
fis_textura				
Ar	1 (6.2%)	3 (19%)	1 (6.2%)	3 (19%)
F	2 (12%)	3 (19%)	4 (25%)	5 (31%)
F-A	5 (31%)	3 (19%)	2 (12%)	1 (6.2%)
F.Ar	6 (38%)	7 (44%)	7 (44%)	5 (31%)
F.Ar-A	2 (12%)	0 (0%)	2 (12%)	2 (12%)
fis_ce	2.03 (1.79, 2.85)	1.73 (1.47, 2.68)	1.75 (1.59, 1.99)	1.42 (1.12, 1.81)
fis_cice	12.2 (8.4, 18.7)	9.9 (7.7, 12.9)	11.7 (8.6, 12.6)	9.6 (8.0, 15.5)
fis_ks	1,128 (433, 2,077)	1,720 (243, 3,242)	588 (455, 1,948)	671 (33, 1,308)
(NAs)	12	12	13	12
qui_ph	5.59 (4.15, 6.58)	4.69 (4.23, 5.81)	5.12 (4.68, 5.99)	4.98 (4.34, 6.25)
qui_acidez	3.85 (2.72, 4.22)	2.79 (0.83, 3.13)	0.55 (0.39, 3.08)	3.24 (0.78, 4.55)
(NAs)	8	5	6	7
qui_al	2.44 (1.85, 2.86)	1.78 (0.40, 2.07)	0.32 (0.11, 2.14)	2.11 (0.61, 3.53)
(NAs)	8	5	6	7
qui_c	2.72 (2.37, 3.31)	2.21 (1.82, 2.34)	1.99 (1.68, 2.14)	2.13 (1.54, 2.78)
qui_mo	4.70 (4.09, 5.71)	3.82 (3.14, 4.03)	3.44 (2.90, 3.69)	3.68 (2.65, 4.80)
qui_s	25 (22, 31)	24 (17, 29)	20 (17, 23)	18 (14, 22)
qui_ca	8.6 (2.6, 15.0)	4.4 (2.6, 10.3)	9.2 (5.4, 10.3)	6.9 (2.7, 11.6)
qui_mg	2.19 (1.41, 3.19)	1.91 (1.56, 2.45)	1.87 (1.61, 2.33)	1.97 (1.38, 2.35)
qui_k	0.36 (0.32, 0.42)	0.47 (0.34, 0.53)	0.32 (0.29, 0.45)	0.46 (0.38, 0.56)
qui_b	0.83 (0.60, 1.04)	0.67 (0.52, 0.90)	0.55 (0.41, 0.72)	0.52 (0.32, 0.59)
qui_fe	114 (47, 355)	194 (75, 272)	107 (75, 198)	92 (66, 279)
qui_cu	1.18 (0.90, 1.46)	1.00 (0.90, 1.28)	1.27 (1.16, 1.81)	1.08 (0.90, 1.85)
qui_mn	116 (85, 162)	93 (64, 129)	124 (69, 135)	73 (31, 97)
qui_zn	1.42 (0.90, 1.84)	0.90 (0.90, 1.70)	1.41 (0.90, 2.81)	0.90 (0.90, 1.87)
<0.14	16 (100%)	16 (100%)	16 (100%)	16 (100%)
¹ Median (IQR); n (%)				

El análisis exploratorio de las variables físicas y químicas del suelo, permitió ver el comportamiento de estas individualmente dentro de cada ventana y cada cobertura. Los Box Plots en la figura 11, muestran las variables físicas que fueron medidas, en el eje X se observan las ventanas y en el eje Y el valor de las variables, los puntos de colores muestran la distribución de los valores de cada variable según la cobertura, mientras que las cajas representan las ventanas, siendo la línea del medio la mediana, el borde de abajo el cuartil 1 y el de arriba el cuartil 3.

A nivel de las ventanas los factores físicos del suelo que muestran variación corresponden a la altitud, porcentaje de arcilla, arena, densidad aparente, humedad y temperatura; siendo la ventana (W4), la que presenta variaciones con respecto a las demás ventanas en las variables como altitud, porcentaje de arcilla y arena. En lo concerniente a la densidad aparente y la humedad, las variaciones ocurren entre la ventana 2 y 4, mientras que las ventanas 1 y 3 se distribuyen similarmente entre los cuartiles. La temperatura del suelo también presenta variaciones en las ventanas 1 y 4, y las ventanas 2 y 3 varían de forma semejante.

Otras variables como el dosel, Conductividad eléctrica (ce), capacidad de intercambio catiónico (cice) y resistencia a la penetración del suelo, no presentan patrones de variación a nivel de las ventanas. En general el análisis exploratorio mostró que en realidad las coberturas son las que explican en mayor proporción la variación de los factores físicos y no tanto las ventanas, permitiendo observar patrones claramente establecidos, como valores más elevados de temperatura y resistencia a la penetración del suelo en las coberturas de pastos y más bajos en coberturas de bosques. Así como valores bajos para dosel y conductividad eléctrica en pastos y valores más altos en estas variables para coberturas de bosque.

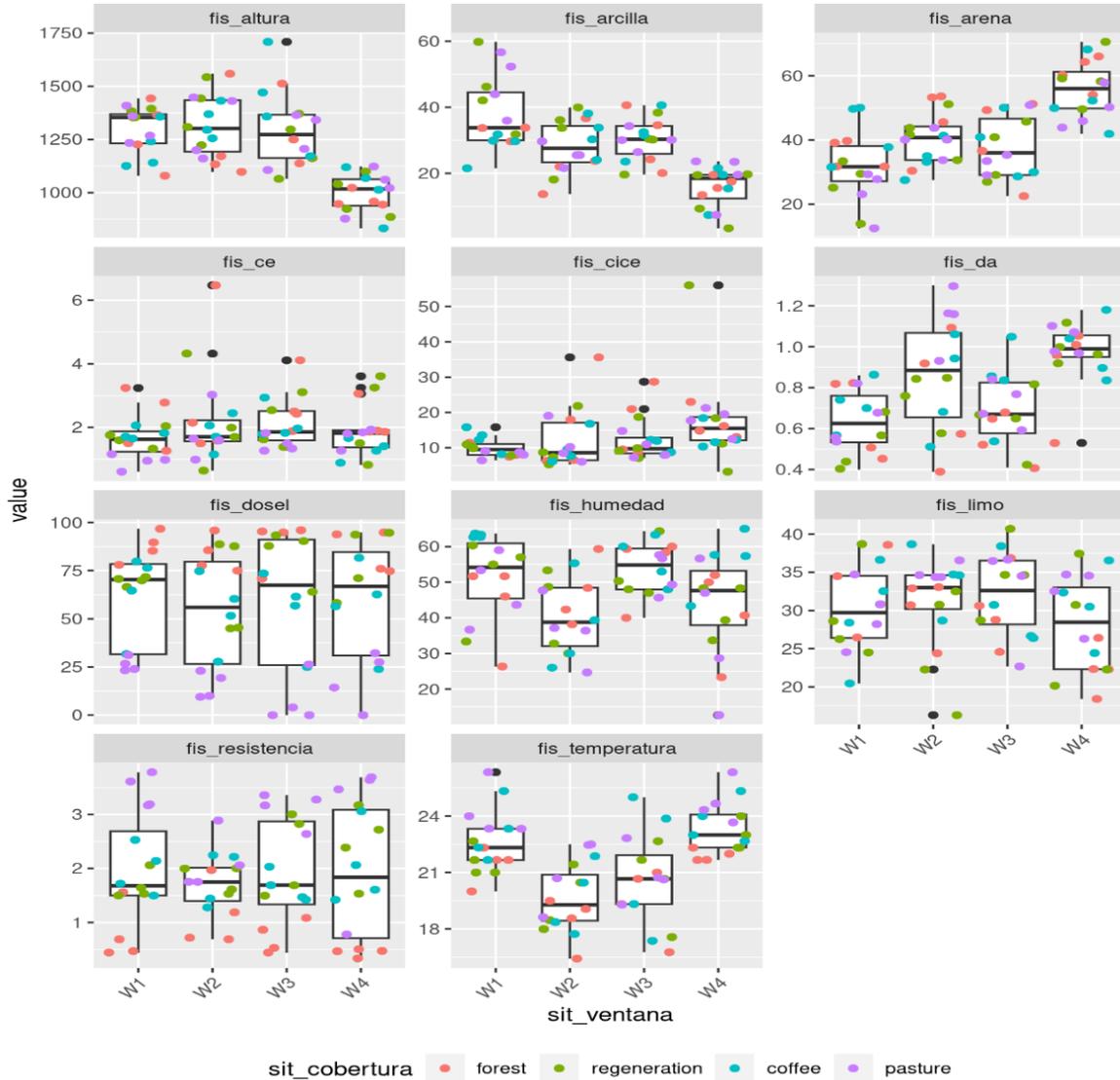


Figura 11. Variables físicas del suelo, los box plots muestran las coberturas (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos), eje X: ventanas (W1: ventana 1; W2: ventana 2; W3: ventana 3; W4: ventana 4).

Las variables químicas del suelo en el análisis exploratorio (Figura 12), no presentan patrones marcados de variación con respecto a las coberturas. A nivel de ventanas, la variación estuvo marcada para el carbono (c), calcio (ca) y pH con valores altos para la ventana 4 (W4), para esta misma ventana la variación para hierro (fe) estuvo representada por valores más bajos con respecto a las otras ventanas.

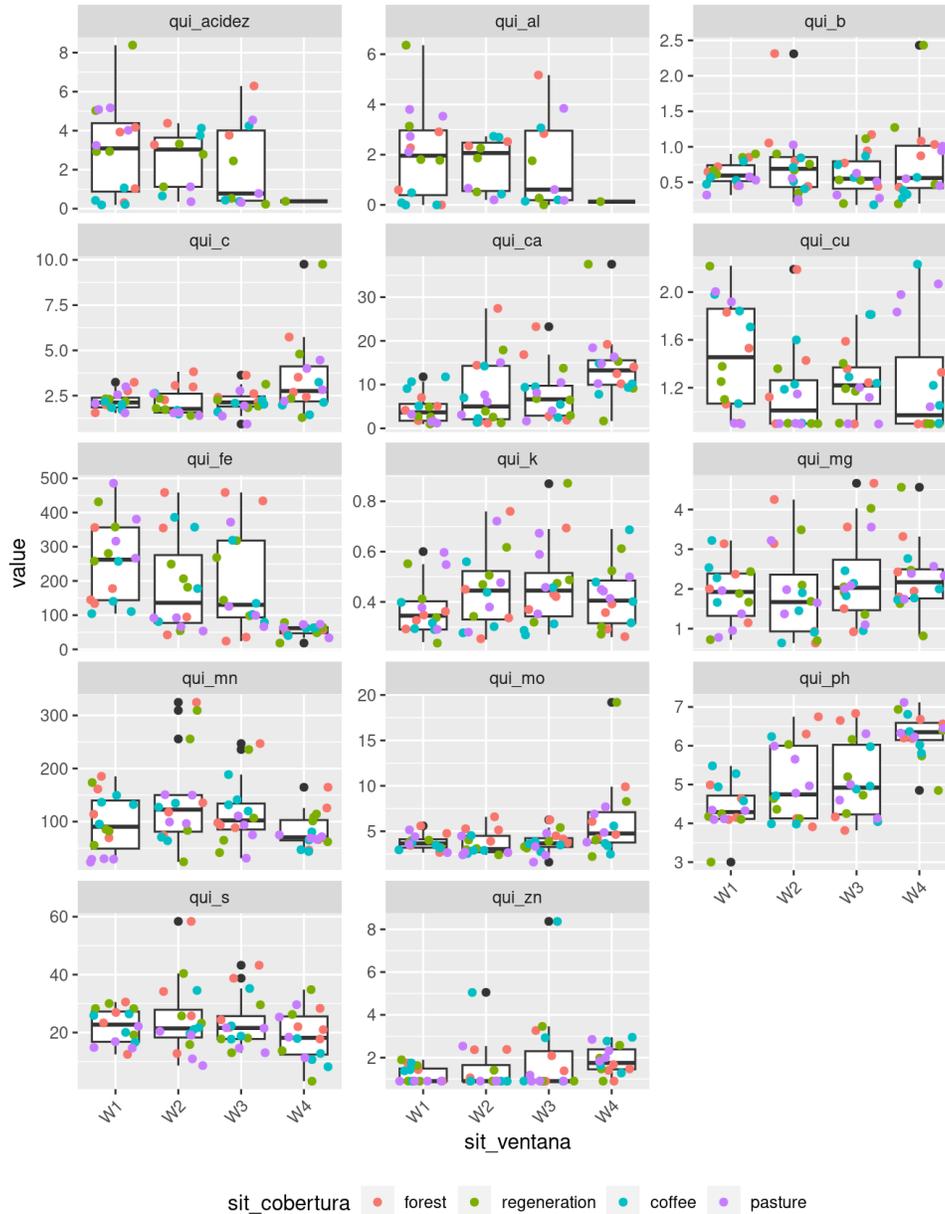


Figura 12. Variables químicas del suelo. Las coberturas son los puntos (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos). Eje X: ventanas (W1: ventana 1; W2: ventana 2; W3: ventana 3; W4: ventana 4).

Para evidenciar la incidencia del programa de compensación sobre las variables físicas y químicas del suelo, se realizó un análisis comparativo univariado, cuyo resultado no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los paisajes definidos, con respecto a la herramienta de manejo (compensación y no compensación) /Figura 13). Con respecto a las coberturas (puntos de colores) se muestran algunas distribuciones marcadas con bajos valores en dosel y altos

valores en resistencia a la penetración del suelo y temperaturas en pastos. Lo contrario ocurre con las coberturas de bosque la cual tiene valores altos en dosel y bajos en resistencia a la penetración del suelo.

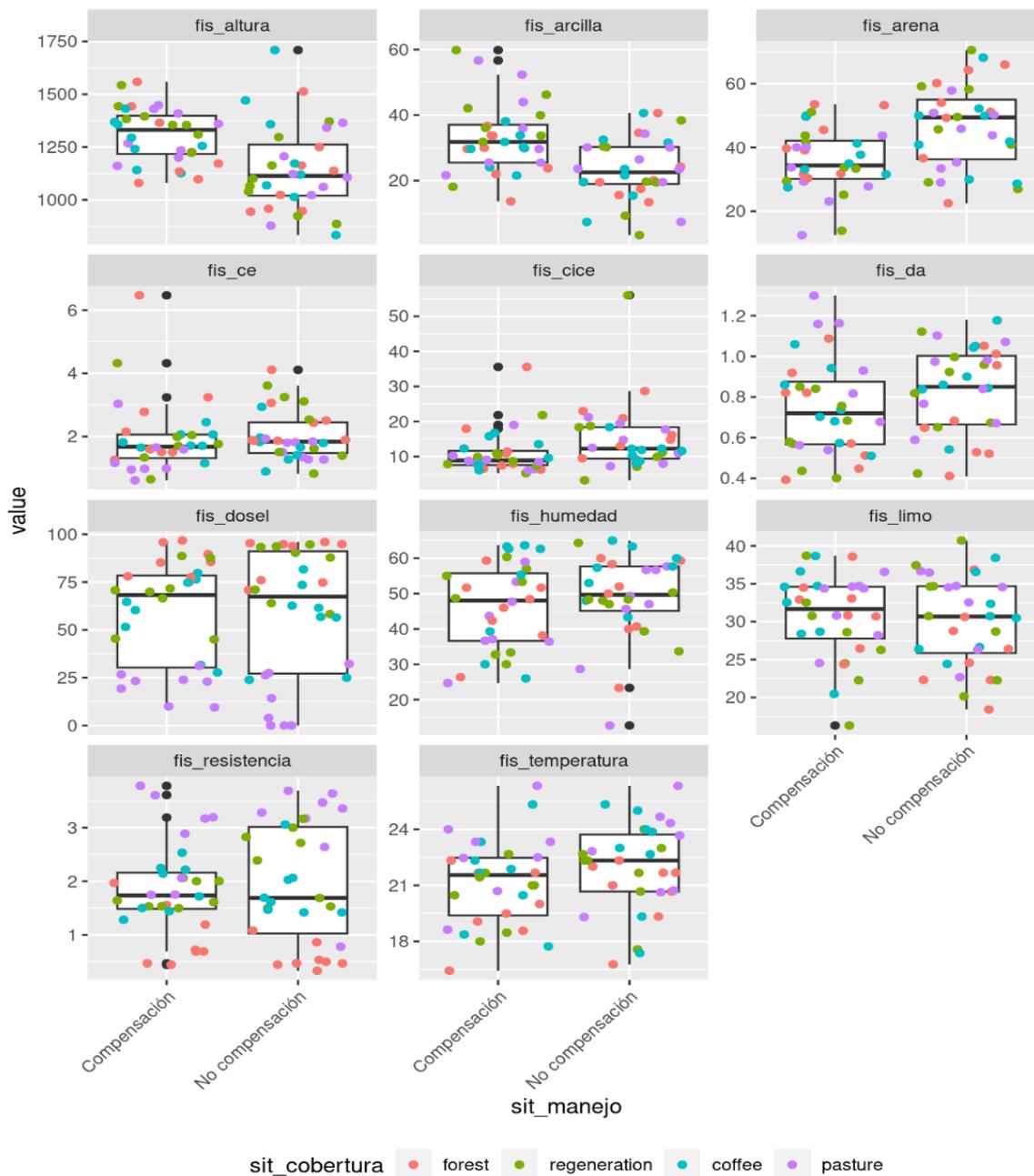


Figura 13. Variables físicas del suelo, se muestran las coberturas con puntos de colores (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos), los paisajes representados en el eje X (Compensación y no compensación).

De igual forma que ocurre con las variables físicas, las variables químicas con respecto al paisaje (Figura 14). No presentan diferencias marcada con respecto a la herramienta de manejo de compensación y no se evidencian patrones de distribución con respecto a los valores altos o bajos de las variables según las coberturas.

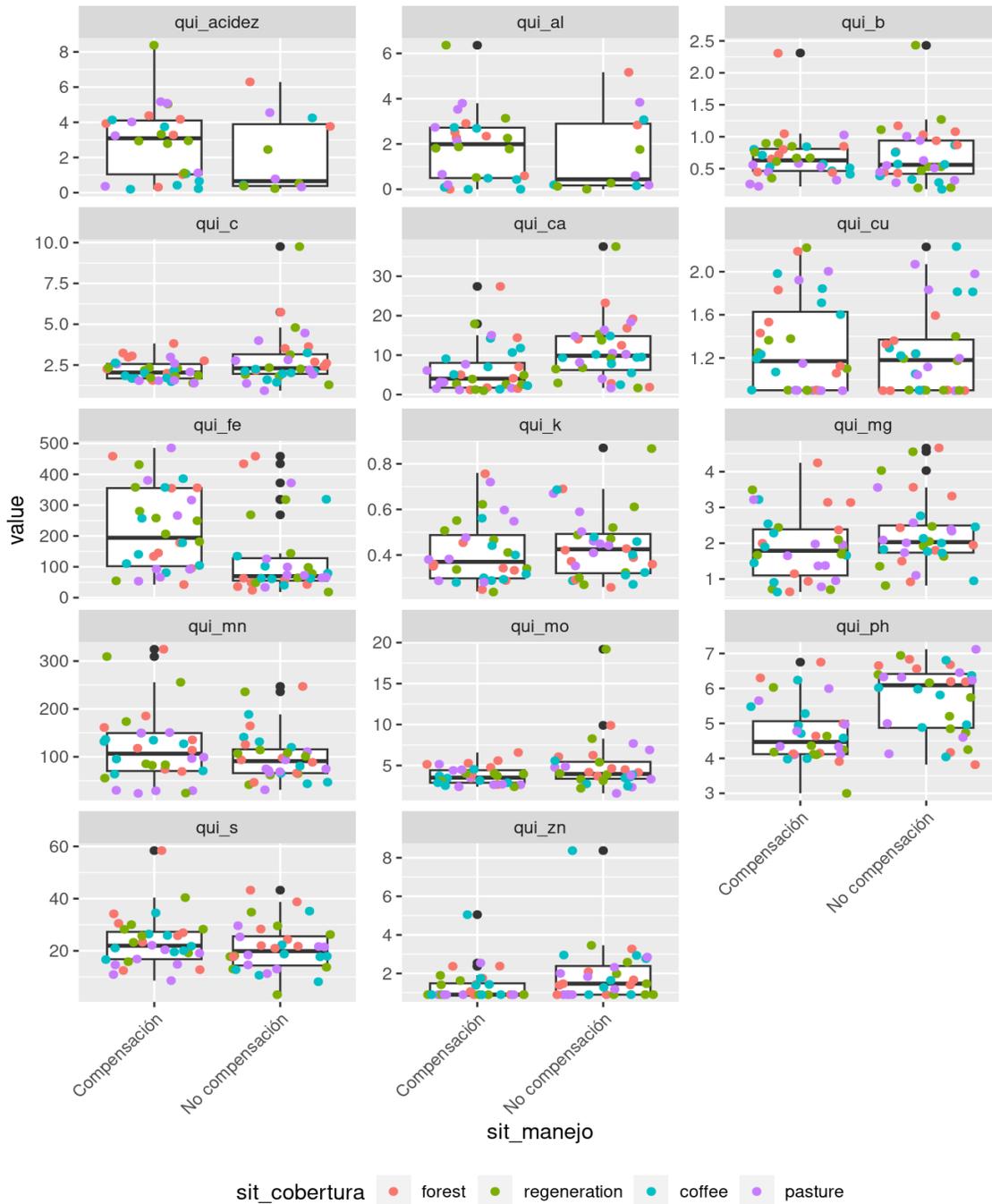


Figura 14. Variables físicas del suelo, las coberturas se muestran con los puntos de colores (rojo: Bosques; Verde: Regeneración; Azul: Sistemas agroforestales de café; Morado: pastos), los paisajes representados en el eje X (Compensación y no compensación).

7.1.6 Análisis de correlaciones de las variables físicas y químicas

Los análisis de correlación permitieron ver como se encuentran relacionadas las variables entre sí. En la figura 15, se observa un diagrama de correlaciones el cual explica las variables en términos de colores y tamaño de los círculos; cuando los círculos son azul las correlaciones son positivas y cuando son rojos las correlaciones serán negativas, entre más grande y más oscuro sea el color del círculo más fuerte serán las correlaciones, es decir más cercanas a 1.

Las variables que muestran correlaciones positivas y fuertes corresponden a materia orgánica con carbono, es decir a mayor cantidad de carbono mayor es el contenido de materia orgánica en los suelos evaluados. Otras variables con correlaciones fuertes y positivas son los niveles de calcio, boro y magnesio con respecto a la conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, pH, carbono y materia orgánica.

Entre las variables con correlaciones negativas y fuertes se encuentran la resistencia a la penetración del suelo con respecto al dosel, cuando más cobertura vegetal se tiene, el suelo presenta una menor resistencia a la penetración del suelo. Lo mismo ocurre con la cantidad de arcilla y arena, a menor porcentaje de arena, mayor porcentaje de arcilla, adicionalmente, en la gráfica se puede observar que una mayor cantidad de arcilla está relacionada con menores valores de pH y calcio, así mismo la mayor cantidad de arena evidencia menores valores de hierro. El elemento hierro presenta relaciones negativas y fuertes con los niveles de calcio, magnesio y pH.

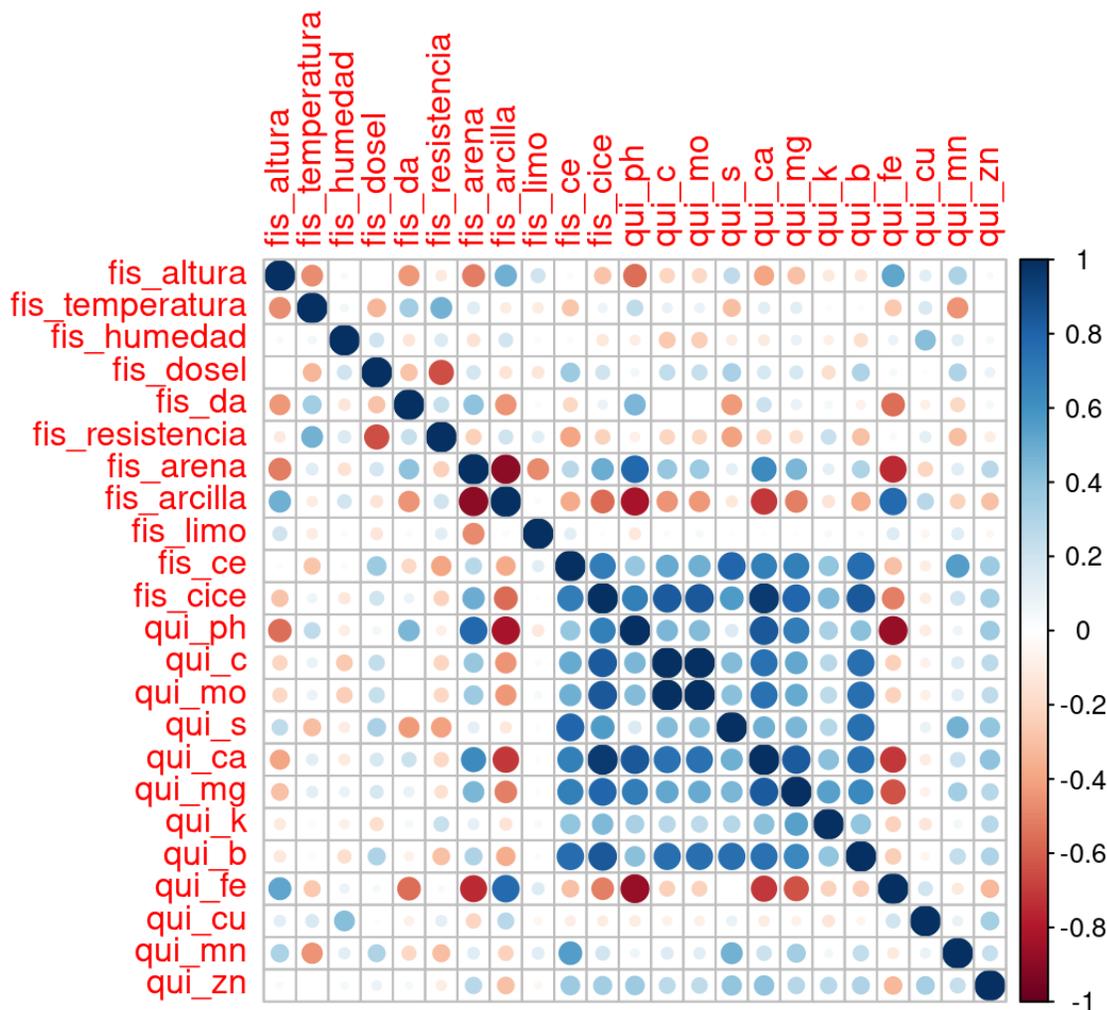


Figura 15. Correlaciones de las variables físico-químicas. Círculos azules, grandes y de tonalidades fuertes representan correlaciones positivas y fuertes; círculos rojos, grandes y de tonalidades fuertes representan correlaciones negativas y fuertes.

7.1.7 Relación entre variables físicas y químicas del suelo

El análisis de componente principales permite mirar cómo se comportan y relacionan las variables físicas y químicas en conjuntos, el gráfico de sedimentación en la figura 16, deja ver que las primeras 3 dimensiones son suficientes para explicar la varianza de los datos.

La figura 17, muestra cómo se ordenan las variables según las dimensiones 1 y 2, la barra Cos2 en el lateral de la gráfica indica la fuerza que tanto está aportando la variable a la componente, las variables con líneas naranjas corresponden a variables más alejados del origen y aportan más varianza a la componente, mientras que las líneas azules corresponden a variables que se ordenan más cercanas al origen del plano y no aportan mucha varianza a la componente.

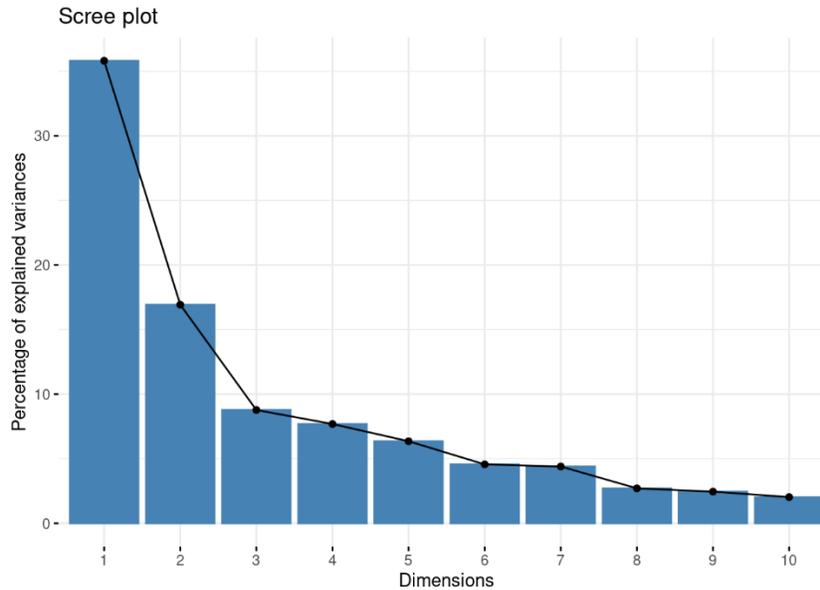


Figura 16. Dimensiones explicativas para las variables fisicoquímicas del suelo según la varianza.

En la figura 17 es posible observar que las variables químicas se agrupan hacia la dimensión 1 con la correlación (35,8 %) y por lo tanto es donde están las variables con mayor efecto sobre el comportamiento de los datos. Valores negativos lo cual quiere decir que los sitios con esta agrupación presentan valores altos en esas variables, en comparación con las demás y los sitios con valores de las variables en la primera dimensión positivos tendrán mayor cantidad en variables como el hierro y la arcilla.

Con respecto a la dimensión 2, esta explica el 16,9 % de la variabilidad total. Con valores negativos para las variables como resistencia a la penetración del suelo, temperatura y densidad aparente. La dimensión 3 presenta porcentaje de variación de 8.8 % (Figura 18).

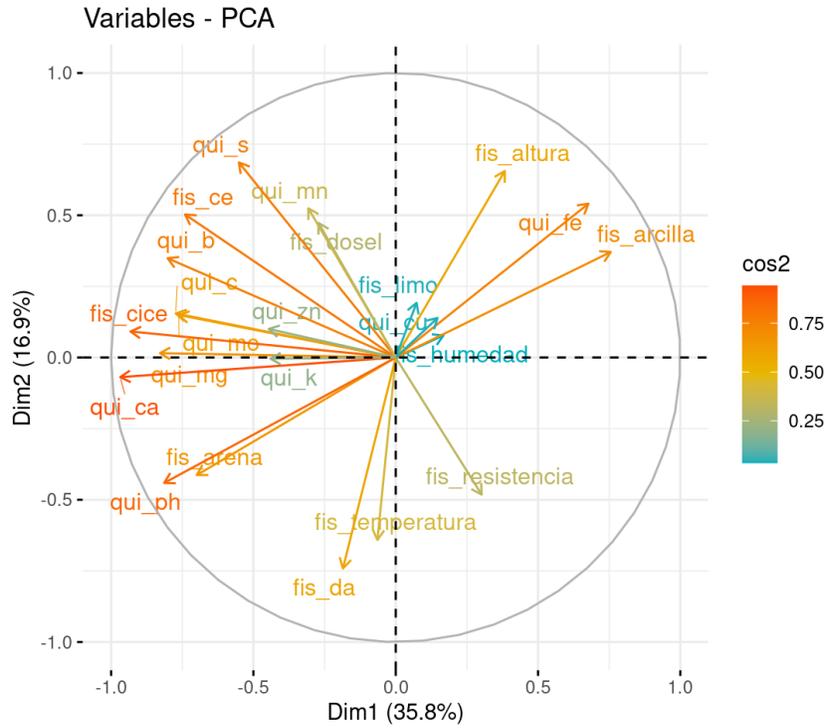


Figura 17. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2..

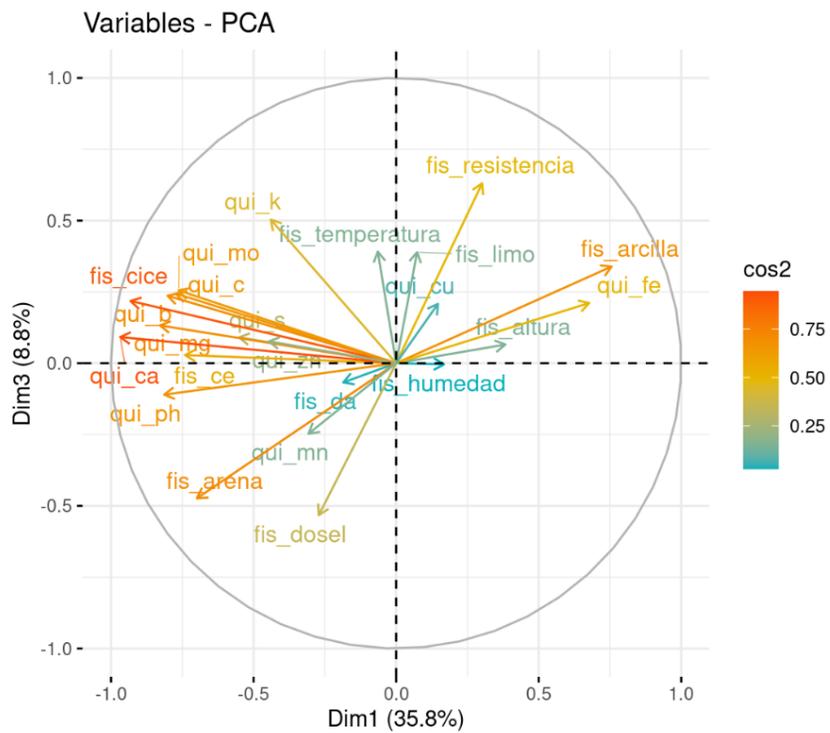


Figura 18. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 2 y 3.

Para explicar mejor lo narrado anteriormente, sobre el análisis de componentes principales, a continuación, se muestran gráficos con clústeres que permiten ver la agrupación de los sitios de muestreos con respecto a las ventanas, paisajes y coberturas.

En la figura 19, se observa la agrupación de los sitios de muestreos según las ventanas, los óvalos solapados muestran que en términos de las variables ambientales las ventanas 1, 2 y 3 no presentan diferencias, sin embargo, la ventana 4 (ovalo morado) se diferencia de las demás ventanas con respecto a las variables ambientales.

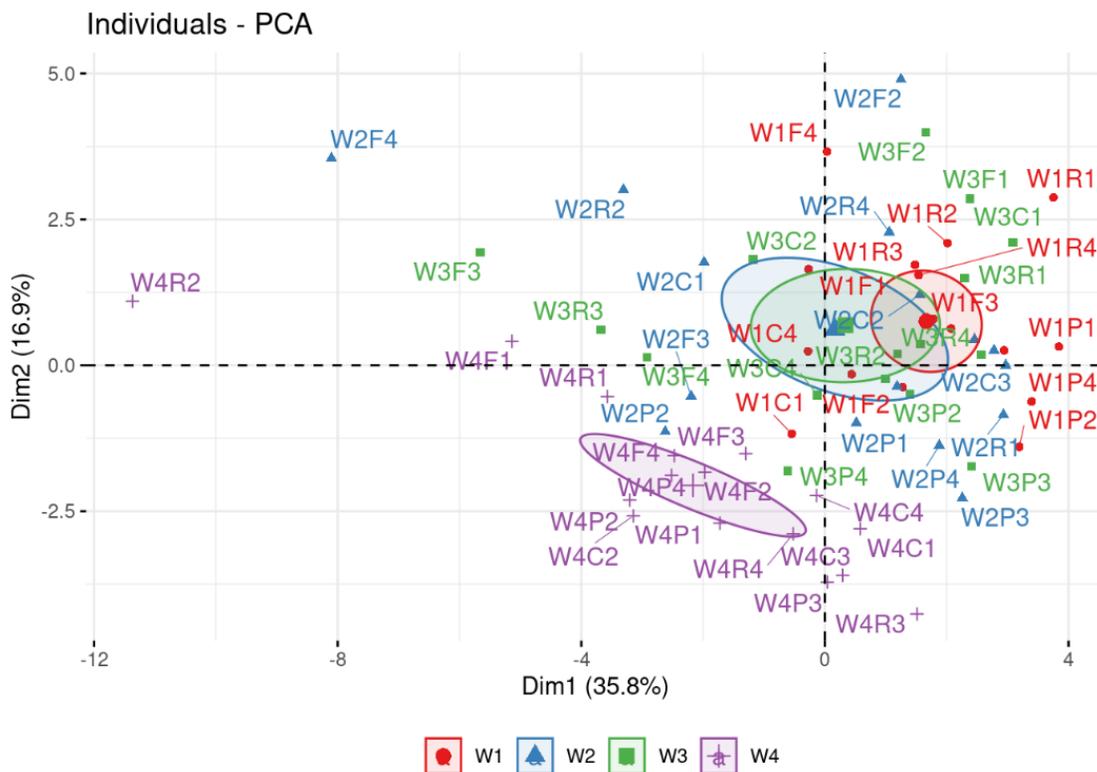


Figura 19. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2 con clústeres por ventanas.

Esta diferencia en las variables fisicoquímicas para la ventana 4, ya se había evidenciado en el análisis exploratorio, en el análisis de componentes principales se interpreta como que esta ventana se ordena en la dimensión 2 con valores negativos por variables como la densidad aparente del suelo; así, esta ventana difiere de las demás en que presenta los valores altitudinales más bajos.

En el análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas por sitios con respecto a las coberturas (Figura 20), los pastos se agrupan en la dimensión 2 hacia el lado negativo, más asociados con valores elevados en las variables como temperatura, densidad aparente y resistencia a la penetración. Los bosques se encuentran agrupados en la parte positiva, relacionados con altos niveles de nutrientes, cobertura vegetal, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica alejados de la parte negativa que esta más relacionadas con variables característicamente altas para pastos. En esta gráfica, se observan las zonas de regeneración y los cultivos de café como coberturas interseccionales entre bosques y pastos.

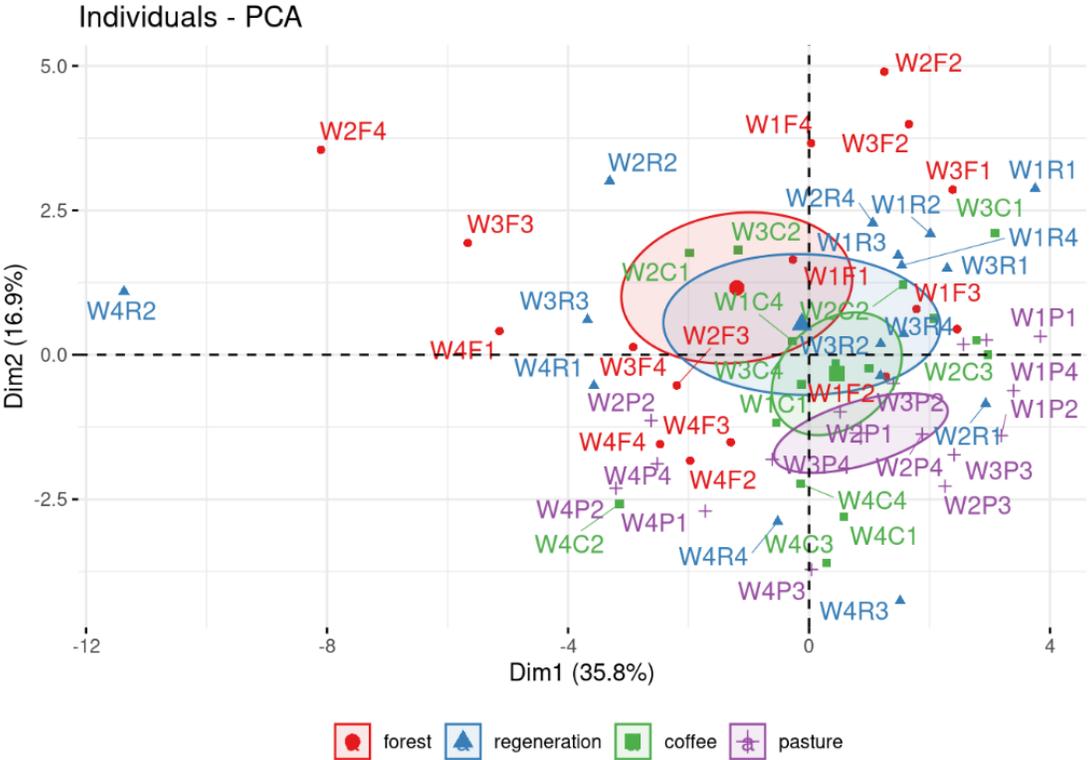


Figura 20. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2 con clústeres por coberturas.

El análisis de componentes principales a nivel de coberturas mostró que los bosques son las coberturas asociadas a valores altos de elementos como carbono, materia orgánica, nutrientes, cobertura vegetal (dosel) mientras que los pastos están más asociados a valores elevados en temperaturas densidad aparente y resistencia a la penetración.

Para ver cómo se comportan las variables fisicoquímicas del suelo dentro de los paisajes, se graficó el análisis de componentes principales por sitio según Compensación o compensación (Figura 21). En cuanto a las variables ambientales existe una diferenciación marcada en los sitios de compensación y no compensación, en la dimensión 1 se muestra de mejor manera que cuando los valores son positivos es más probable que sean sitios de compensación, cuando los valores son negativos es más probable que sean sitios de no compensación.

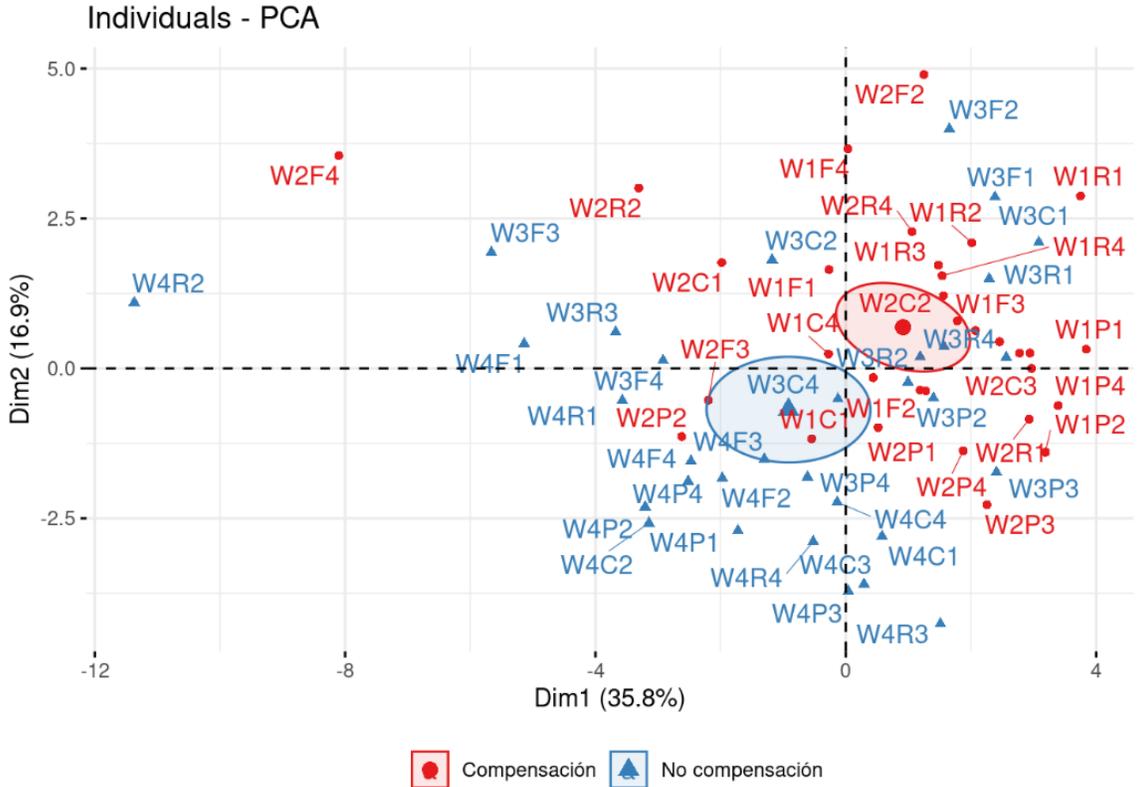


Figura 21. Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2 con clústeres por paisaje.

7.2 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL SUELO

Para el componente microbiológico del suelo se procesó un total de 32 muestras distribuidas entre las diferentes coberturas como se explica en la tabla 3, para el medio de cultivo Agar almidón (microorganismos amilolíticos) de las muestras analizadas. Se obtuvieron datos de UFC, convertidos a número de células por gramo de suelo (Cel.g^{-1} suelo) y número de cepas con actividad amilolítica, el comportamiento de estos para cada ventana y cobertura, se detallan a continuación.

7.2.1 Densidad bacteriana en el suelo

7.2.1.1 Análisis de Cel.g^{-1} suelo en cada cobertura por ventana

El análisis estadístico de los datos de células por gramo de suelo (Cel.g^{-1} suelo) obtenidos durante el conteo en placa, muestra el comportamiento de estos por coberturas en una misma ventana. En la ventana 1, se observan que la cobertura W1RG2 presenta diferencias significativas con respecto a la cobertura W1RG4 y al resto de coberturas que no son homologas sea pastos, café o bosques, esto mismo, sucede cobertura W1B3, la cual difiere de la cobertura W1B2 y de todas las demás coberturas, (Figura 22.A). En la ventana 2, las coberturas de pastos W2P1 y W2P4, presentan diferencias significativas con respecto a las demás, pero no entre si mismas, diferente a lo que ocurre con la cobertura W2RG1, la cual difiere de todas las demás coberturas, incluso de la de su mismo tipo W1RG4 (Figura 22.B), en estas dos ventanas (1 y 2), las coberturas que presentaron diferencias con respecto a las demás, exhiben valores de número de células por gramo de suelo superiores a las demás, donde estos valores son bajos (Figura 22A y 22B).

En la ventana 3, se observan que las coberturas de pastos (W3P1 y W3P3) Presentan valores más bajos con respecto a las demás coberturas, adicionalmente la cobertura W3B1, muestra valores más bajo en cuanto al número de células, siendo diferente a su cobertura homologa y de las demás coberturas. En la ventana 4, todas las coberturas presentan valores elevados de número de células, exceptuando la cobertura W4P3, donde el valor de número de células por gramo de suelo es menor y presenta diferencias significativas con el otro pasto muestreado y también con las demás coberturas. Con respecto a la

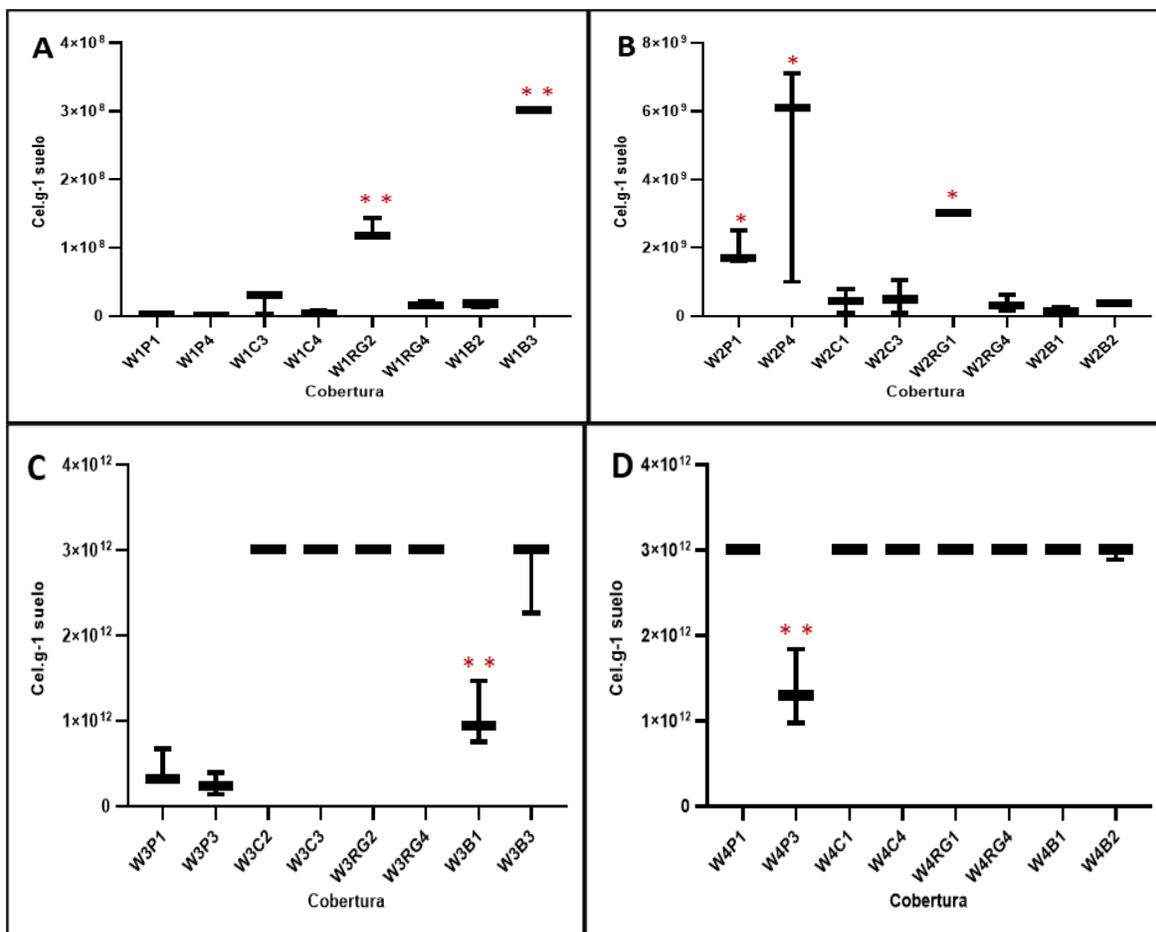


Figura 22. Análisis de células por gramo de suelo en diferentes coberturas de una misma ventana. A: Coberturas evaluadas en la ventana 1; B: Coberturas evaluadas en la ventana 2; Coberturas evaluadas en la ventana 3; Coberturas evaluadas en la ventana 4.

La comparación entre coberturas realizadas en una misma ventana, muestra que el valor p para los datos de células por gramo de suelo en cada ventana es menor que el nivel de significancia 0.05 (Tabla 6), motivo por el cual se rechaza la hipótesis nula, y se concluye que al menos una de las coberturas evaluados en cada ventana presenta diferencias con respecto a las demás.

Tabla 6. Resultados p valor test de Friedman, y diferencias entre coberturas en una misma ventana.

Friedman test	P Valor	Diferencias Significativas
Cel.g-1 suelo W1	0,0069	SI
Cel.g-1 suelo W2	0,0232	SI
Cel.g-1 suelo W3	0,0049	SI
Cel.g-1 suelo W4	0,0111	SI

7.2.1.2 Análisis de Cel.g⁻¹ suelo por coberturas entre ventanas

Los análisis del número de células por gramo de suelo por coberturas entre diferentes ventanas, muestran un comportamiento similar en las coberturas de pastos para la ventana 1 y la ventana 2, diferente a lo que ocurre entre la ventana 3 y 4, donde los pastos de la ventana 3 presentan valores más bajos de número de células por gramo de suelo, mientras que en los pastos de la ventana 4 los valores son más elevados presentando diferencias significativas entre los demás pastos de las diferentes ventanas y entre estas mismas coberturas dentro de la ventana 4 (Figura 23 A).

Para las coberturas de café los gráficos presentes en la Figura 23. B, muestran que los cafetales evaluados en la ventana 1 y 2, presentan un menor número de células por gramo de suelo en comparación con los cafetales de la ventana 3 y 4 presentando diferencias entre los cafetales de la ventana 1 y 2 con respecto a los de las ventanas 3 y 4. El mismo comportamiento se muestra en las coberturas de regeneración un menor número de células en las ventanas 1 y 2 con respecto a las ventanas 3 y 4, habiendo diferencias entre las dos primeras con respecto a las 2 últimas (Figura 23 C).

En el caso de los bosques, la tendencia se mantiene, para la ventana 1 y 2 los valores siguen siendo menores en comparación con las ventanas 3 y 4, y existen diferencias con respecto a las ventanas 1 y 2, y 3 y 4; Sin embargo, para este tipo de coberturas en la ventana 3, la cobertura W3B1 difiere en el número de células, de los demás bosques de la ventana 3 y la ventana 4 presentando diferencias significativas con respecto a las demás coberturas (Figura 23. D).

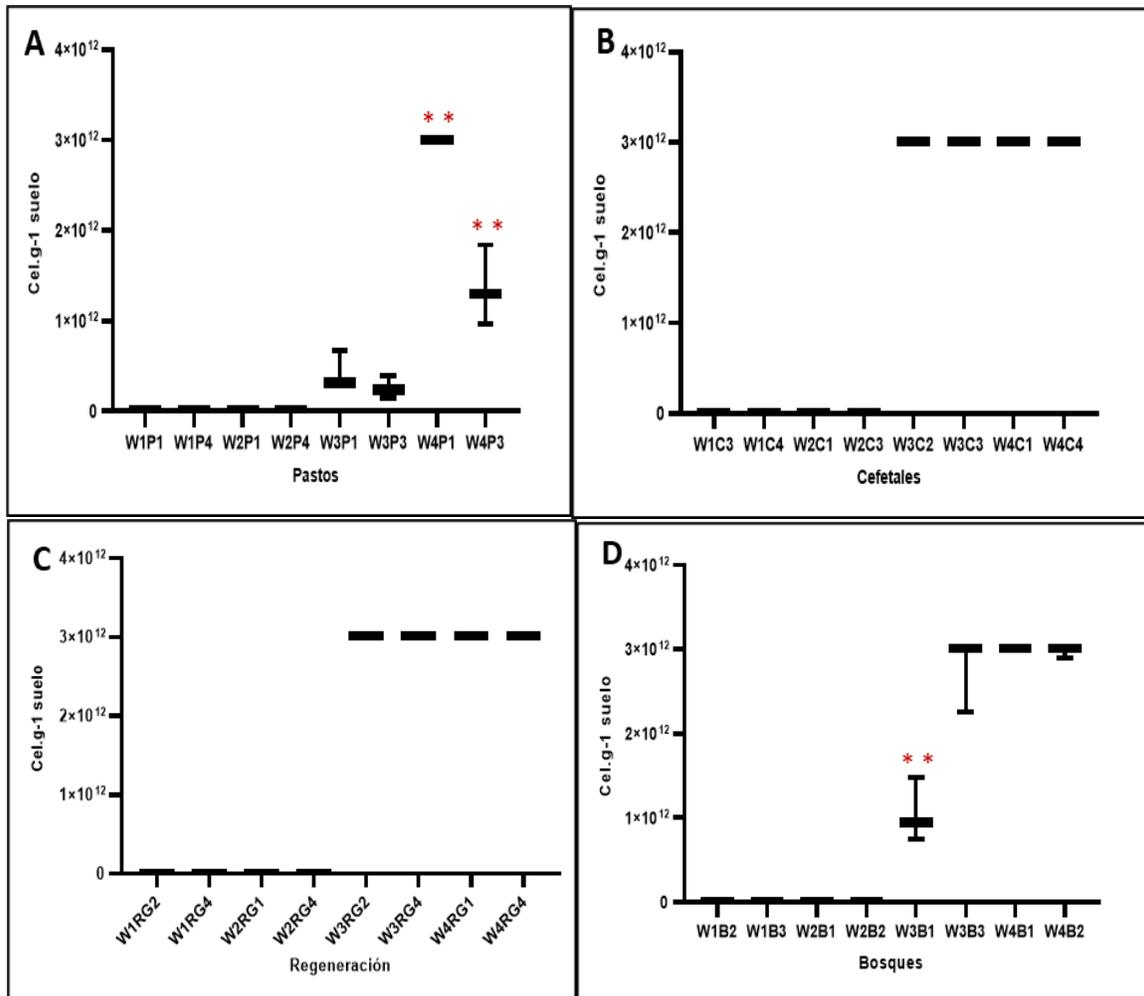


Figura 23. Análisis de células por gramo de suelo en coberturas de diferentes ventanas. A: Pastos en la ventana 1,2,3 y 4; B: Cafetales en la ventana 1,2,3 y 4; Regeneración en la ventana 1,2,3 y 4; Bosques en la ventana 1,2,3 y 4.

La comparación entre un mismo tipo de cobertura realizada en diferentes ventanas, muestra que el valor p para los datos de células por gramo de suelo en cada tipo de cobertura es menor que el nivel de significancia 0.05 (Tabla 7), motivo por el cual se rechaza la hipótesis nula, y se concluye que existen diferencias significativas en los tipos de coberturas de las diferentes ventanas.

Tabla 7. Resultados p valor test de Friedman, y diferencias entre un mismo tipo de cobertura de diferentes ventanas.

Friedman test	P Valor	Diferencias Significativas
Cel.g-1 suelo Pastos	0,0041	SI
Cel.g-1 suelo Sistemas Agroforestales de Café	0,0046	SI
Cel.g-1 suelo Regeneración	0,0038	SI
Cel.g-1 suelo Bosques	0,0041	SI

La figura 24, muestra la distribución de los datos de células por gramo de suelo a través de las ventanas y coberturas muestreada. Este grafico muestra en color amarillo claro los menores valores de la variable y en las tonalidades más oscura (marrón) los valores más elevados de la variable. En la parte superior izquierda se encuentran representados los puntos correspondientes la ventana 1, donde las coberturas W1B3 y W1RG2, son las que presentan coloraciones más oscuras con valores más elevados de células por gramo de suelo y las que presentaron diferencias significativas en el análisis de esta ventana, para el caso de la ventana 2 (parte superior derecha), las partes más oscuras que corresponden a los valores altos de la variable las ocupan las coberturas W2P4 y moderadamente oscuro para W2P1, W2RG1, tal como evidencia el análisis a través del test de Friedman.

En lo concerniente a la ventana 3 (parte inferior izquierda figura 24), se observa que las coberturas W3P1, W3P3 Y W3B1 difieren de las demás, tal y como se mostró en la figura 22.C, el mapeo de la variable permite observar que en esta ventana los valores más altos del número de células por gramo de suelo se encuentran concentrados en la mayoría de las coberturas muestreadas hacia la parte sur de la ventana, representadas por las tonalidades más oscuras, exceptuando las coberturas mencionadas anteriormente que se sitúan con tonalidades en amarillo claro. En esta ventana se observan una mayor concentración de numero de células por gramo de suelo, algo similar ocurre en la ventana 4 (parte inferior derecha), donde la mayoría de los valores elevados de la variable, se encuentran distribuidos en tonalidades oscuras hacia la parte Sur-Este de la ventana, siendo el punto W4P3 la única cobertura que difiere de las demás con un numero de células por gramo de suelo menor, como lo explica el análisis estadístico.

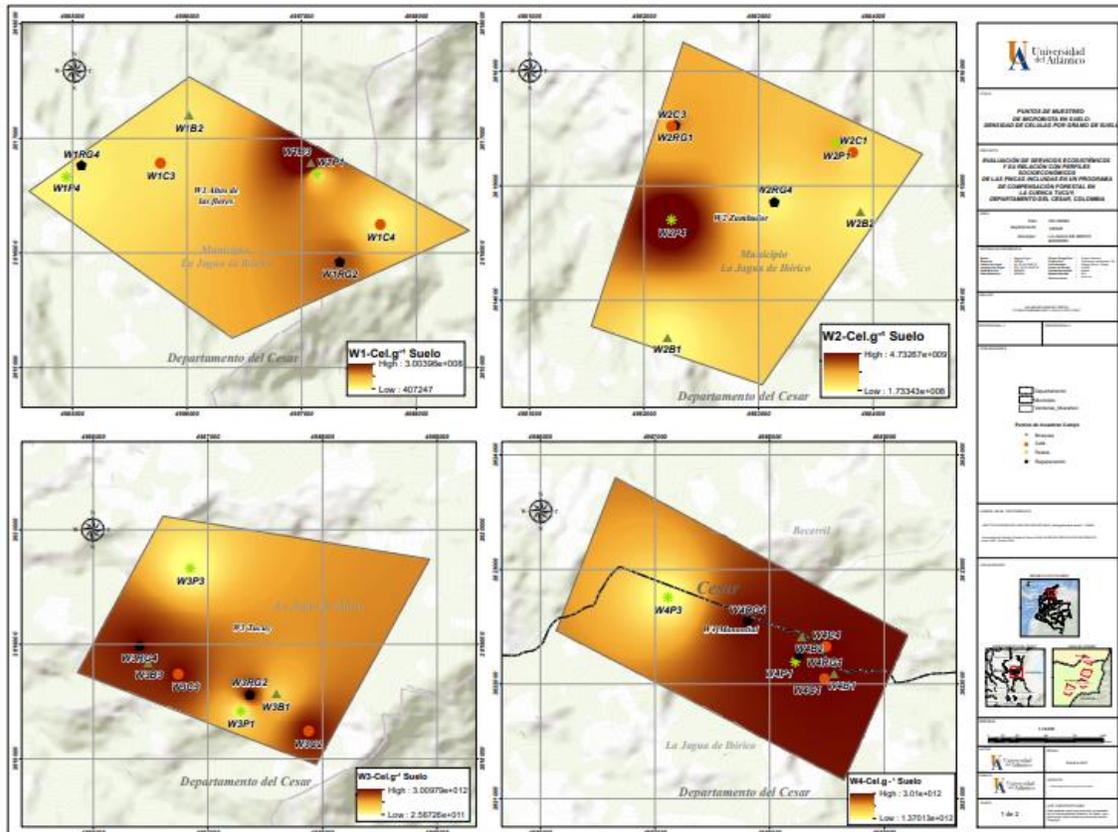


Figura 24. Gradiente de distribución del número de células por gramo de suelo en las ventanas y coberturas muestreadas.

En la figura 24, también es posible observar que para las ventanas 3 y 4 que no hacen parte del programa de compensación forestal, el patrón de distribución de las coberturas con valores elevados de células por gramo de suelo es más homogéneo y tiene mayor representatividad, contrariamente a lo ocurre en las ventanas 1 y 2 que hacen parte del programa de compensación forestal donde los valores elevados de la variable se encuentran en coberturas muy puntuales y no en la mayoría de los puntos muestreados.

7.2.2 Actividad Amilolítica

El número de unidades formadoras de colonias que exhibieron actividad amilolítica en cada cobertura se observa en la figura 25. En la ventana 1, se observan que los puntos donde se obtuvieron cepas con actividad amilolítica corresponden a las coberturas W1P4, W1B2 y W1P1. En el caso de la ventana 2, las coberturas donde se encontraron cepas con actividad amilolítica son W2C3 y W2RG1.

En la ventana 3, se observan puntos con actividad amilolítica correspondientes a W3RG4, W3B3, W3C3, W3RG2, W3C2, coberturas ubicadas hacia el sur este de la ventana, mismo patrón evidenciado para la variable células por gramo de suelo descrita en el ítem anterior del presente informe. La ventana cuatro presenta coberturas donde se identificaron mayor número de cepas con actividad amilolítica en las coberturas W4C1, W4C4, W4B1 W4B2, W4RG1, W4RG4 Y W4P1, estas ubicadas en el Sur-Este de la ventana tal y como se distribuía la variable células por gramo de suelo en esta misma ventana.

En la figura 25, también es posible observar que para las ventanas 3 y 4 que no hacen parte del programa de compensación forestal, el patrón de distribución de las coberturas con mayores valores de numero de cepas con actividad amilolítica es más homogéneo y tiene mayor representatividad, contrariamente a lo ocurre en las ventanas 1 y 2 que hacen parte del programa de compensación forestal donde los mayores valores de la variable se encuentran en coberturas muy puntuales y no en la mayoría de los puntos muestreados.

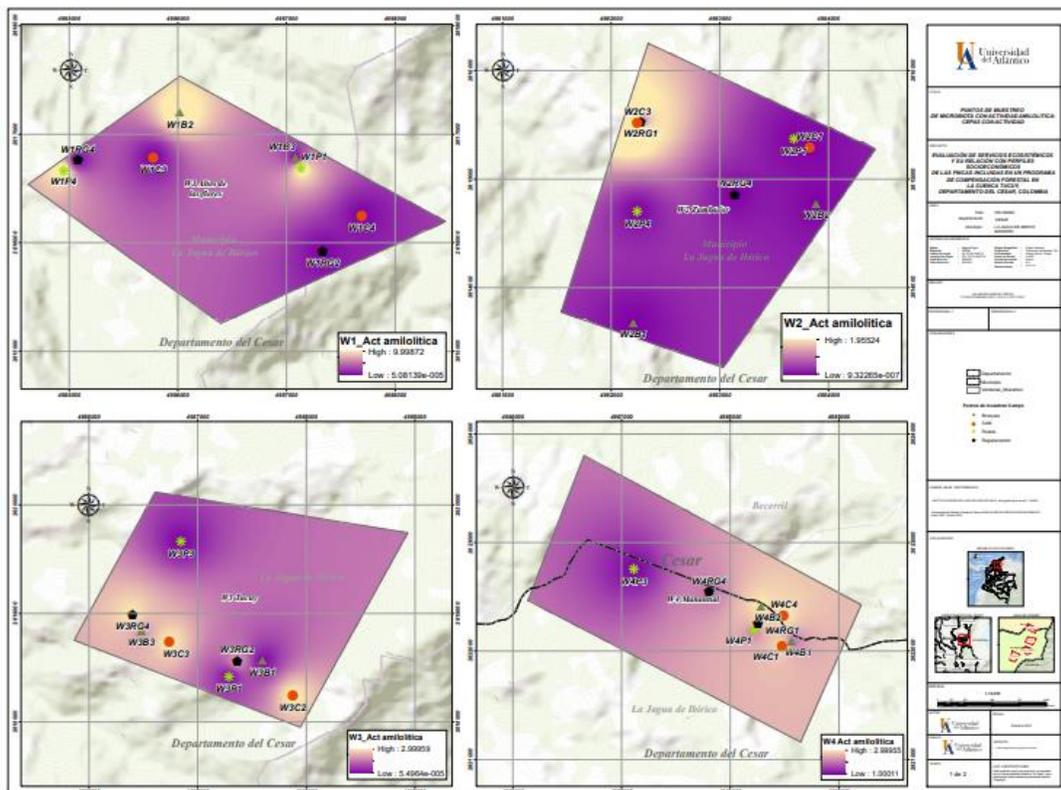


Figura 25. Gradiente de distribución del número de cepas con actividad amilolítica en las ventanas y coberturas muestreadas.

Los datos mostrados evidencian coberturas con resultados heterogéneos con respecto al número de células por gramo de suelo y la actividad amilolítica, que requieren ampliar los análisis estadísticos para relacionar un mayor número de

variables que permitan dilucidar esclarecer como están siendo influenciadas las variables entre sí. En la ventana 3 y 4 el patrón observado con respecto a la actividad amilolítica, fue mayor número de cepas con actividad amilolítica

7.2.3 Análisis de categorización y modelos de las variables microbiológicas

La variable número de células por gramo de suelo se categorizó, en alta densidad y baja densidad celular, la figura 26 muestra la distribución categórica del número de células por gramo de suelo, según las ventanas y las coberturas. Se selecciono como punto de corte 3,010,000,000 puesto que era el valor para la dilución intermedia -7 y células incontables. En la gráfica se puede observar que en las ventanas 3 y 4 independiente de las coberturas los números de células presentaron altas densidades celulares, mientras que para las ventanas 1 y 2 se presentaron números bajos de células.

La table 8, muestra el modelo logístico aplicado para las variables número de células y numero de cepas, con respecto a la cobertura y las componentes estas últimas explicando las variables físicas y químicas con respecto a las variables microbiológicas.

La casilla de bosques (Forest) no presenta valores porque es la cobertura de referencia con base en la que se comparan las demás. Este modelo explica que con respecto al número de células no hay diferencias entre las diferentes coberturas y tampoco entre el número de células y las componentes; sin embargo, los valores de Odd Ratio para la componente 1 y la componente 2 son negativos y cercanos al nivel de significancia, para la componente 1 el modelo está muy cerca a indicar que cuando los valores de nutrientes, pH, materia orgánica, carbono es alto, probablemente el número de células también sea alto. Para la componente 2 los valores negativos son equivalentes a mayor resistencia del suelo, mayor densidad aparente, temperatura, lo que también indica que mayores valores de estas variables puede llevar a un alto número de células.

Con respecto a la variable presencia de cepas con actividad amilolítica, los pastos si presentan diferencias significativas con respecto a las demás coberturas, demostrando esto que los pastos son diferentes a los bosques, teniendo menor número de cepas con actividad amilolítica. Con respecto a las componentes, la componente 2 relacionada con altos valores en las variables densidad aparente, temperatura, resistencia a la penetración, muestra en el modelo que a mayores valores de estas variables mayor número de cepas con actividad amilolítica.

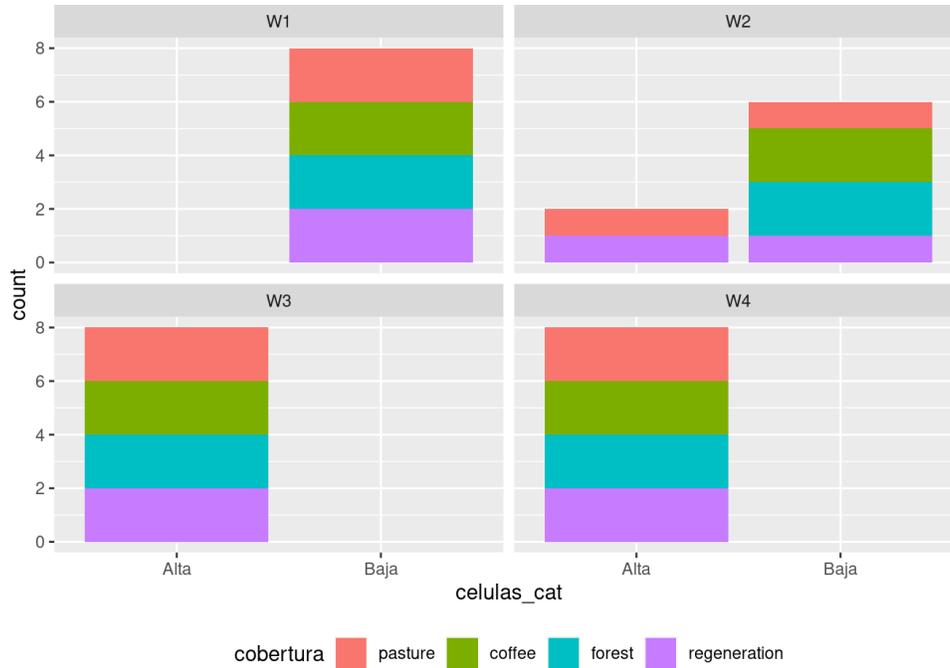


Figura 26. Número de células dicotomizada (Densidad alta y densidad baja), de acuerdo a las coberturas y ventanas.

Tabla 8. Modelos logísticos para explicar las variables número de células y presencia de cepas con actividad amilolítica.

Característica	Número de células			Presencia de cepas		
	log(OR) ¹	95% CI ¹	p-value	log(OR) ¹	95% CI ¹	p-value
Cobertura						
Forest	—	—		—	—	
Regeneration	0.87	-2.0, 4.1	0.55	-0.43	-4.2, 3.4	0.81
Coffee	-0.87	-4.3, 2.0	0.56	-0.60	-3.9, 2.5	0.70
Pasture	-0.83	-4.8, 3.0	0.66	-5.0	-11, -0.77	0.038
Comp.1	-0.63	-1.5, -0.11	0.066	-0.60	-1.5, -0.05	0.080
Comp.2	-0.89	-2.0, -0.16	0.052	-1.9	-4.0, -0.66	0.026
Comp.3	0.48	-0.52, 1.6	0.36	1.7	0.44, 3.5	0.025

¹ OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

7.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO

La conductividad hidráulica permite ver la capacidad que tiene el suelo de transportar agua y actúa como indicador del grado de compactación del suelo. En la figura 27 se puede observar que, en general los bosques son coberturas donde se registraron los mayores valores de infiltración; y esta capacidad podría estar vinculada al gradiente de altitud y a la confluencia de las fuentes de escorrentía de primer orden, que confluyen en los puntos de unión de la cuenca, donde la meteorización del suelo estaría más avanzada por la actividad acerada de transformación.

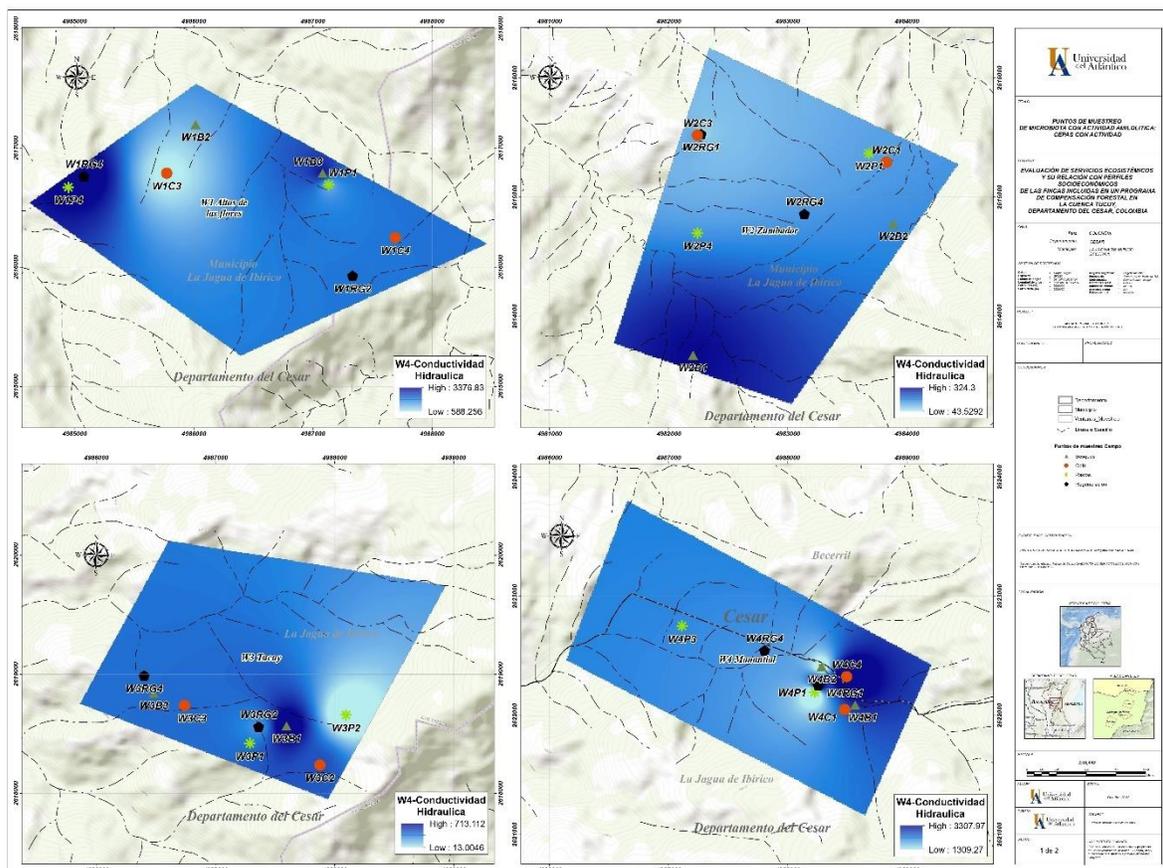


Figura 27. Distribución de la variable conductividad hidráulica del suelo, en las diferentes ventanas. Parte superior ventana 1 y 2, parte inferior ventana 3 y 4.

8. DISCUSIÓN

8.1 FACTORES FISICOQUÍMICOS DEL SUELO

8.1.1 Temperatura y humedad

La temperatura del suelo es una propiedad fundamental puesto que dirige la mayoría de procesos físicos y químicos en el suelo, tales como absorción de agua por las raíces de las plantas, dinámica de los organismos, transformación de los nutrientes (Ni et al., 2019) se ha demostrado ampliamente que la temperatura del suelo es una característica susceptible a los cambios de vegetación y uso del suelo (Carvajal y Pabón, 2014; Savva *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2013), por su parte la humedad del suelo es una propiedad relacionada directamente con el contenido de agua presente en este y que se ve afectada directamente por la temperatura y las tasas de evaporación en el suelo (Fang *et al.*, 2016; Lozano-Baez *et al.*, 2019). En la presente investigación, obtuvimos como resultados en la ventana 1, la ventana 2 y la ventana 4, las mayores temperaturas estuvieron registradas en las coberturas de café y pastos, para el caso de la ventana 3 las mayores temperaturas se reportan en las coberturas de sistemas agroforestales de café y zonas de regeneración, resultados similares han obtenido otras investigaciones realizadas en zonas tropicales, las cuales reportan mayores temperaturas en zonas de pastos e indican que la temperatura es una propiedad que responde a los cambios en el uso del suelo, en general los pastos son zonas con pocas cobertura vegetal donde existe una gran cantidad de suelo desnudo expuesto a la radiación solar que aumenta la evaporación del agua presente el suelo (Carvajal y Pabón, 2014; Findell *et al.*, 2017; Ni *et al.*, 2019)

Otros autores como Savva *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2013 afirman que el cambio del uso de la tierra por actividades humanas a zonas urbanas, agrícolas y de pastizales produce un aumento en las temperaturas del suelo, estos autores miden la respuesta de la temperatura relacionándola con otras variables como la cobertura vegetal, la densidad aparente del suelo y el contenido de agua en este, recalcando indirectamente la importancia de la hojarasca a la hora de mantener la temperatura del suelo, mencionando que actividades como la tala y la quema indiscriminada tienen efectos perturbadores sobre la temperatura del suelo y producen su aumento.

Los argumentos planteados por los autores citados anteriormente explican los resultados obtenidos y permiten entender que las temperaturas más altas en zonas de pastos y de sistemas agroforestales de café obedecen a que en estas coberturas, la intervención humana es mayor y conduce a la pérdida de cobertura

vegetal, ausencia y disminución del dosel que permita tener una amplio recambio y el cubrimiento de hojarasca en el suelo, combinado con el tránsito de animales que se traduce en un aumento de la densidad aparente del suelo y con este el aumento de las temperaturas en estas coberturas.

El resultado obtenido en la ventana 3 donde las coberturas de regeneración reportan temperaturas del suelo altas se explica con las ideas expuestas en los párrafos anteriores, las zonas de regeneración evaluadas en el área de estudio se caracterizaron por ser zonas intervenidas con plantaciones de especies para recuperar la cubierta vegetal y con ella los servicios ecosistémicos que esta aporta o zonas que anteriormente estaban intervenidas, eran usadas para actividades agrícolas o ganaderas en el pasado, pero que en la actualidad se catalogarían como zonas de regeneración natural, siendo este la posible explicación para que en esta ventana las coberturas de regeneración reporten elevadas temperaturas, considerando que el proceso de regeneración en estas no es avanzado ya que en la información colectada en campo las zonas de regeneración en esta ventana tienen aproximadamente entre 7 y 10 años, periodos de tiempo inferiores a los periodos de regeneración en las otras ventanas donde el tiempo era mayor a 10 años, autores como Lozano-Baez *et al.*, 2021; Lozano-Baez *et al.*, 2019; Zimmermann *et al.*, 2006 señalan en sus investigaciones que algunos servicios relacionados con recuperar las propiedades del suelo obedecen a periodos de tiempos iguales o mayores a 25 años.

En lo concerniente a la humedad del suelo, en todas las ventanas exploradas, los mayores valores se reportan en las coberturas de bosques y regeneración, sin embargo, para esta variable se encontraron valores elevados en las coberturas de café también, Fang *et al.*, 2016 reportó datos similares argumentando que las actividades de manejo agrícola, traen consigo el incremento de la humedad del suelo y alteran la densidad aparente de este, el autor señala que en suelos cultivados la humedad de este tiende a ser mayor. Los sistemas agroforestales de café evaluados presentan sistemas de riego que se usan para mantener los niveles de agua en el suelo y cubrir las necesidades de las plantas, haciendo así que el contenido de agua sea mayor, adicionalmente Lozano-Baez *et al.*, 2021, señala que en los cultivos de café en la zona del Perijá las labores de poda favorecen la acumulación de material orgánico en el suelo y el establecimiento de la hojarasca que ayuda a mantener la hidráulica del suelo y con esto los niveles de humedad en este.

8.1.2 Cobertura Vegetal

Los resultados obtenidos evidencian que los pastos son los tipos de cobertura con menos vegetación como se esperaba debido a que estos se caracterizan por la poca o nula presencia de especies arbóreas, dependiendo del tipo de pastos que sean, algunos pastos muestreados presentaron coberturas vegetales que no sobrepasa el 50%, esto es debido a que estos pueden clasificarse como pastos arbolados los cuales son definidos como áreas ocupadas por pastos alternados con especies arbóreas donde estas últimas tienen una representatividad que ocupa entre el 30 – 50% del área (CVC, 2016). Autores que estudian gradientes en el cambio de uso del suelo con respecto a la cobertura vegetal han reportado mayores valores para bosques de referencias, seguidos por zonas de regeneración o restauración en diferentes estados sucesionales, posteriormente cultivos y finalmente pastos como áreas con suelo desnudo o semidesnudo con poca o nula cobertura de dosel (Guo *et al.*, 2019; Menezes *et al.*, 2021; Reiners *et al.*, 2014).

Por otro lado, una mayor variación en los datos de cobertura vegetal para los sistemas agroforestales de café, esta relaciona con la heterogeneidad interespecífica de estas coberturas, ya que estas siguen el curso de modificación establecido por las actividades productivas humanas, la coberturas vegetales en esta dependen del tiempo de plantación y crecimiento de las plantas de café, las siembra de otras especies forestales y actividades de poda, haciendo estas que la variación en las coberturas vegetales se incremente en cada sistema agroforestal de café evaluado.

8.1.3 Resistencia a la penetración del suelo

Las coberturas con mayores valores de resistencia a la penetración del suelo fueron los pastos en todas las ventanas, algunos estudios indican que la perdida de cobertura vegetal y los cambios en el uso del suelo actúan como tensores que promueven una mayor firmeza en este y por ende el aumento de la resistencia a la penetración del suelo, los resultados obtenidos en la presente investigación concuerdan con este planteamiento ya que en las coberturas de pastos, existen tensores como la eliminación de la cobertura vegetal y el pisoteo de los animales lo cual aumenta el grado de compactación de este (Contreras Santos *et al.*, 2019; Ellies *et al.*, 1993; Villazón Gómez *et al.*, 2022)

La pérdida de cobertura vegetal permite que el secado del suelo y la pérdida de agua sea más intensa ocasionando así el aumento de la resistencia a la penetración del suelo en las coberturas evaluadas donde la presencia del dosel era nula y en los casos de los pastos arbolados esta no superaba el 40 %, caso contrario ocurre con las coberturas de Bosques donde la presencia de dosel y la presencia de una capa establecida de hojarasca que recubre el suelo permite que el secado en estas coberturas y la pérdida de agua no ocurra de una forma intensa, al ser coberturas de bosque conservado, no cuentan con los mismo tensores que las coberturas de pastos, lo que explicaría los bajos valores de resistencia a la penetración del suelo y un menor grado de compactación en las coberturas boscosas.

Los valores de resistencia a la penetración del suelo, varían entre las ventanas evaluadas en las coberturas de regeneración y sistemas agroforestales de café, ya que en las ventanas 3 y 4, después de los pastos, las regeneraciones son las coberturas con mayores valores de resistencia a la penetración del suelo, mientras que para la ventana 1 y 2, después de los pastos las coberturas con mayores valores de resistencia a la penetración son los sistemas agroforestales de café. La información recolectada en campo permite explicar este resultado considerando que para las ventanas 3 y 4 donde el programa de compensación no se ha implementado, las zonas de regeneración natural establecidas, tienen menor edad en comparación con las ventanas 1 y 2, y aún existe tránsito ocasional y accidental de animales, lo que permite que estas coberturas aun tengan tensores sobre el suelo que aumentan la resistencia a la penetración del suelo y el grado de compactación del suelo sea superior a las ventanas 1 y 2 donde el programa de compensación si se ha implementado y las actividades de regeneración y restauración se encuentran más avanzadas.

Por otro lado, con respecto a la resistencia a la penetración del suelo, las barras de error muestran variaciones en las mediciones de algunas coberturas, (Mojena, 2020), evaluó la variación espacial de la resistencia a la penetración del suelo bajo diferentes coberturas vegetales, reportando que hasta 20 cm de profundidad en el suelo se observa mayor dispersión de los datos en cuanto a esta variable, siendo este rango de profundidad el mismo usado en el presente estudio, una razón que explicaría esta variación a esta profundidad es que esta corresponde a la capa más superficial del suelo en constante interacción con los diferentes tensores del suelo, y la biomasa radicular de la vegetación que presenta patrones de distribución diferentes aun cuando se está hablando de un mismo tipo de cobertura, aportando esto a la variación intrínseca de los datos obtenidos.

8.1.4 Densidad Aparente del suelo

La densidad aparente del suelo es una propiedad relacionada con la cantidad de materia orgánica, las rocas, la porosidad y arroja información sobre el grado de compactación y la circulación del agua en el suelo (Martinez and Zinck., 2004; Salamanca and Sadeghian, 2005) los resultados aquí obtenidos, evidencian que las coberturas de pastos y café en todas las ventanas, presentan los mayores valores de densidad aparente, mientras que los menores valores se encuentran en las coberturas de bosques, un estudio realizado por Akiyoshi *et al.*, 2022, evaluó la densidad aparente en diferentes usos del suelo obteniendo como resultado que en coberturas de bosques de Eucalipto, la densidad aparente del suelo fue más baja y estuvo relacionado con el contenido de materia orgánica presente en el suelo así como un menor grado de compactación en estos, adicionalmente el autor muestra que en bosques antropizados y pastizales, la densidad aparente del suelo suele ser mayor argumentado en las practicas que se realizan en este tipo de coberturas

Así mismo, Martinez and Zinck., 2004, ponen en evidencia que la densidad aparente del suelo suele ser mayor en pastos en comparación con suelos de bosques, los autores argumentan que la tala de bosque primario deteriora el drenaje en el suelo y aumenta la densidad aparente del suelo y la resistencia a la penetración, siendo esto evidencia de compactación del suelo, esto explica que en nuestra investigación los mayores valores de densidad aparente se encuentren en sistemas agroforestales de café y pastos, puesto que son los tipos de coberturas en las que el bosque primario ha sido talado y existe tránsito de animales.

8.1.5 Descripción del comportamiento de las variables físicas y químicas

Los resultados obtenidos clasificaron los tipos de suelos del área de estudio como Franco Arcillosos para las ventanas 1, 2, 3 y 4, sin embargo para la ventana 3 algunas muestras obtuvieron la clasificación de Franco Arcillosos Arenosos, conocer la clase textural del suelo permite tener información sobre la capacidad de esta matriz para retener agua e intercambiar nutrientes, así como la posible respuesta de este a las diferentes prácticas de manejo y cambios en su uso (Penn State Extension 2023).

Los suelos franco arcillosos se encuentran en la posición intermedia del triángulo textural de USDA, siendo clasificados como suelos pesados con una proporción balanceada de arena, limo y arcilla (35, 30 y 35 % respectivamente), estos se caracterizan por tener una estructura de bloques, con terrones cuadrados y

grandes que mantienen grietas y espacios porosos los que les permite tener mayor aireación y retención de agua y nutrientes en comparación con suelos arenosos, por otro lado, los suelos franco arcillosos arenosos son clasificados como suelos intermedios con porcentajes de arena, limo y arcilla de 35, 35 y 30 respectivamente, usualmente tienen una estructura granular con terrones no muy grandes y redondeados (Ciancaglini, 2000; González *et al.*, 2021; Penn State Extension 2023).

Respecto al análisis exploratorio de los factores físicos del suelo por ventana, la ventana 4 mostro variaciones con respecto a las demás ventanas en factores como altitud, porcentaje de arcilla y arena, para la densidad aparente y la humedad, las variaciones ocurren entre la ventana 2 y 4, estas variaciones de la ventana 4 con respecto a las demás ventanas, se explican destacando que esta presenta los puntos más bajos con respecto a la altitud, autores como Guzman y Al-Kaisi 2011, han señalado encontrar diferencias en la densidad aparente del suelo con respecto a la altitud y posición del paisaje, teniendo valores más altos de densidad aparente en altitudes más bajas. Así mismo, Rezaei y Gilkes, 2005, señalan que en general las propiedades físicas del suelo se relacionan con atributos del paisaje tales como, elevación, posición.

Para este trabajo la posición del paisaje no fue considerado como un factor influyente en el cambio de las propiedades edáficas del suelo, pues las diferencias altitudinales seleccionadas en las diferentes ventanas de muestreo no indicaban grandes diferencias, sin embargo, con los resultados obtenidos y lo reportado por los autores previamente mencionados, se puede observar diferencias entre la ventana 4 y las demás ventanas, asociándolo a que esta presentó los puntos más bajos en altitud, es por esto, que la posición del paisaje debe considerarse como un elemento que produce cambios significativos en los futuros estudios que se desarrollen en el área de estudio que permitan recolectar datos empíricos para esclarecer si diferencias no muy marcadas en la altitud realmente generan variación en las factores aquí estudiados.

La temperatura del suelo también presenta variaciones en las ventanas 1 y 4, y las ventanas 2 y 3 varían de forma semejante, este comportamiento que agrupa las ventanas 1 y 4, y 2 y 3 con respecto a los valores de temperatura, puede ser explicado es que los muestreos para la ventanas 2 y 3 y las ventanas 1 y 4 se realizaron de manera contigua en el periodo de seco del área de estudio, inicialmente se exploraron las ventana 2 y 3 durante los primeros días del mes de Julio y la ventana 1 y 4 hacia los últimos días de Julio y los primeros días de agosto.

Considerando que la temperatura del suelo está directamente relacionada con la temperatura atmosférica y el clima en general, ya que el suelo actúa como aislante de calor entre la tierra y la atmósfera, siendo la temperatura del suelo más alta en días soleados puesto que el suelo absorbe mayor energía del sol haciendo esto que su temperatura incremente (Globe 2005). Es cierto que los muestreos fueron realizados en el periodo seco marcado para la zona, sin embargo la costa norte de Colombia está influenciada por la temporada de huracanes del Atlántico, unos días antes del muestreo realizado en la ventana 2 y la ventana 3, la costa norte colombiana estuvo bajo la influencia de la tormenta tropical Elsa, presentándose lluvias inusuales en periodo seco, a pesar que para los días del muestreo no se presentaron lluvias en los puntos de muestreo la acción climática ejerció influencia sobre la temperatura del suelo, motivo por el cual las temperaturas para la ventana 2 y 3 son más bajas en comparación con la ventana 1 y 4 cuyos muestreos se realizaron a finales del mes de Julio y a principios del mes de Agosto cuando la temporada invernal aún no había comenzado en el área de estudio.

Las propiedades físicas que evidenciaron variación en el análisis exploratorio fueron capacidad de intercambio catiónico (cice) conductividad eléctrica (c), dosel y resistencia a la penetración del suelo, sin embargo, la variación en estas se da a nivel de coberturas y no a nivel de ventanas. La resistencia a la penetración del suelo y el dosel son propiedades que responden a una escala espacial menor en este caso las coberturas, Mendoza y Espinoza 2017, analizó la variación espacial de las propiedades del suelo en cultivos y suelos desnudos (pastos) señalando que la conductividad eléctrica (ce) es una propiedad con una variación espacial más baja, el autor también afirma que la variación en las propiedades como la conductividad eléctrica y la resistencia a la penetración del suelo obedecen en gran medida a los cambios de uso del suelo influenciados por la pérdida de vegetación.

En contraste, para las variables químicas del suelo los resultados no muestran variación a nivel de coberturas, si no a nivel de ventanas, siendo la ventana 4 la que aporta un mayor grado de variación con valores altos en carbono, calcio y pH, Mendoza y Espinoza, 2017b, también reporta, que para diferentes tipos de uso de suelo, el pH y el carbono orgánico son propiedades que presentan una baja variabilidad espacial, por lo cual, en lo concerniente a estas propiedades la variación se observa a escalas de ventanas y no de coberturas.

Lo planteado anteriormente soporta los resultados de los análisis comparativos univariados, donde no se evidencian diferencias significativas para las propiedades físicas y químicas a escalas de paisajes, y las variaciones están dadas por variables como cobertura de dosel y resistencia a la penetración del suelo las cuales definen pastos y bosques con valores opuestos en cuanto a estas.

8.1.6 Análisis de correlaciones de las variables físicas y químicas

Los datos analizados mostraron correlaciones positivas y fuertes en variables como materia orgánica con carbono, elementos como calcio, boro y magnesio con respecto a la conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, pH, carbono y materia orgánica. El carbono orgánico está directamente relacionado con la materia orgánica del suelo, esto ha sido ampliamente reportado en la literatura, este brinda al suelo coloides que aumentan la capacidad de intercambio catiónico de este, influyendo en la disponibilidad de otros nutrientes en el suelo, adicionalmente el carbono también está vinculado al establecimiento de la acidez o alcalinidad del suelo (Eduardo Martínez *et al.*, 2008; Martínez-González *et al.*, 2010; Contreras Santos *et al.*, 2019), basados en esto es coherente observar en los diferentes suelos analizados correlaciones positivas entre el carbono y la materia orgánica, con otros elementos como calcio, boro y magnesio, así como el pH y la capacidad de intercambio catiónico.

Los resultados muestran que las variables con correlaciones negativas y fuertes fueron la resistencia a la penetración del suelo con respecto al dosel, varios autores que estudian los cambios de las propiedades del suelo en gradientes de coberturas vegetales, han reportado esta relación considerando que la pérdida de cobertura vegetal tiene implicaciones sobre las propiedades hidráulicas del suelo, contribuyendo a la pérdida de agua en suelo, incremento de la temperatura, disminución de la conductividad hidráulica y aumento de la resistencia a la penetración del suelo (Contreras Santos *et al.*, 2019; Ellies *et al.*, 1993; Guo *et al.*, 2019; Lozano-Baez *et al.*, 2021)

Así mismo, la cantidad de arcilla y arena se correlacionan negativamente, a menor porcentaje de arena, mayor porcentaje de arcilla, este resultado era esperado ya que el triángulo textural de USDA usado para clasificar las clases texturales del suelo está basado en esta correlación negativa entre las proporciones de arcilla arena y limo a medida que una proporción de estas tres aumenta otras disminuyen (Ciancaglini, 2000)

8.1.7 Relación entre variables físicas y químicas del suelo

Los resultados obtenidos por el análisis de componentes principales reflejan en los clústeres de agrupación por ventanas (figura 18) diferencias entre la ventana 1, 2 y 3 con respecto a la ventana 4, Una característica que pudo influir en este resultado fue la altitud, para las ventanas 1, 2 y 3 el gradiente altitudinal en los puntos evaluados estuvo dado en un rango entre los 1000 y los 1500 metros sobre el nivel del mar (msnm), sin embargo para la ventana 4 el gradiente altitudinal osciló entre los 800 y los 1000 (msnm), como ya se había mencionado previamente la posición del paisaje y la altitud juegan un papel fundamental con respecto a las propiedades físicas y químicas como densidad aparente, resistencia a la penetración y la textura (Guzman and Al-Kaisi, 2011)

Otros autores como Mathewos, 2020, Bufebo *et al.*, 2021, Menezes *et al.*, 2021, Sharma *et al.*, 2022, han realizado estudios en gradientes de uso del suelo evaluando la posición del paisaje, todos han obtenido como resultado variaciones significativas entre las propiedades fisicoquímicas del suelo, siendo la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo propiedades que estos autores abordan y coinciden que a menor altitud mayor son los valores de estas, así mismo los investigadores mencionan que los nutrientes el carbono y la materia orgánica son propiedades que varían según la posición del paisaje. Los resultados aquí obtenidos son coherentes con lo planteado por las investigaciones ya citadas, sin embargo, se requiere ampliar los estudios y el análisis de los datos que vincule la posición del paisaje como un factor determinante en las mediciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo en el área de estudio.

Por otro lado, los clústeres de agrupación del análisis de componentes principales por coberturas (Figura 19) separaron los bosques de los pastos como coberturas diferentes con respecto a valores altos en temperatura, densidad aparente, y resistencia a la penetración para los pastos, mientras los bosques se agrupan como coberturas con valores altos de cobertura vegetal, carbono, materia orgánica y nutrientes, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica. Las zonas de regeneración y los sistemas agroforestales de café aparecen como coberturas intermedias con respecto a las variables.

Los resultados anteriormente expuestos, se explican con investigaciones que previamente han reportado que el uso y manejo de suelo modificando las coberturas vegetales afecta las propiedades físicas y químicas del suelo, y conlleva a la pérdida de diversidad y servicios ecosistémicos; los bosques

usualmente tienen valores elevados en carbono y materia orgánica debido a la presencia de hojarasca y material vegetal que permite el secuestro de carbono y la incorporación de este a la biofase por parte de los microorganismos, la explotación del suelo de forma intensiva degradando sus coberturas hasta obtener pastizales sin dosel con suelo desnudo, disminuye el secuestro de carbono y aumenta los niveles de compactación, provocando la baja incorporación de nutrientes e infertilidad del suelo y produce un incremento en la resistencia a la penetración del suelo, la densidad aparente y la temperatura debido a la pérdida rápida de agua en el suelo y una mayor absorción de energía del sol por este (Eduardo Martínez *et al.*, 2008; Carvajal *et al.*, 2009; Mendoza y Espinoza, 2017b; Agroecosistemas, 2020; Mojena, 2020).

Los resultados del análisis de componente principales, permitió realizar clústeres de agrupamiento por paisajes (figura 20), en este es posible ver una separación entre los puntos de muestreos en compensación y no compensación, estando estos últimos más asociados con valores altos de resistencia a la penetración del suelo, densidad aparente, temperatura, arena y pH.

Considerando que en el presente estudio los paisajes están definidos desde la herramienta de compensación, es necesario entender que la implementación de un programa de compensación forestal, implica cambios en las actividades de conservación, restauración, regeneración y manejo de los diferentes elementos integradores del paisaje como es el suelo y las coberturas vegetales para aumentar los servicios ecosistémicos, algunas de estas actividades implican la disminución de la tala indiscriminada, el aumento de las áreas de bosque conservado, disminución de las actividades de quema, aumento de áreas en regeneración o restauración, uso de fertilizantes orgánicos y establecimiento de sistemas agroforestales. En los paisajes de no compensación estas actividades no están reguladas y con la información colectada en campo se pudo registrar como se realizan actividades de quema, fumigación con fertilizantes inorgánicos, monocultivos y tala de bosques.

Autores como Ellies *et al.*, 1993, Guo *et al.*, 2019, Cezar *et al.*, 2021 y Villazón *et al.*, 2022, explican que la pérdida de cobertura vegetal, las actividades humanas y los cambios en el uso del suelo, generan tensores que a nivel del suelo incrementan los valores de propiedades edáficas como la resistencia a la penetración del suelo, la densidad aparente y la temperatura. Lo expresado en estas investigaciones es concordante con los resultados obtenidos, indicando que en los paisajes de no compensación un menor control sobre estas actividades

contribuye a un aumento de propiedades del suelo que no favorecen el aumento de los servicios ecosistémicos.

En contraste con lo anterior, en los paisajes de compensación los puntos de muestreo se agrupan con valores altos en propiedades como la cobertura vegetal, la proporción de arcilla, carbono, materia orgánica y nutrientes, siendo estas propiedades que autores como Ortega Molina, 2014; Bolaños, 2020; Melgarejo et al., 2021 han asociado con la salud del suelo y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

Analizando la literatura, no existen estudios que ayuden a ampliar el debate sobre los resultados de la presente investigación, siendo la primera vez que se comparan paisajes definidos desde la herramienta programa de compensación forestal, esta investigación abre una ventana a que las propiedades del suelo puedan ser estudiadas con mayor profundidad, relacionándolas con la implementación de las herramientas de compensación disponibles y comparando diferentes entornos que permitan esclarecer como se comportan las variables dentro de los sistemas de compensación y no compensación.

8.2 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL SUELO

8.2.1 Densidad bacteriana en el suelo

8.2.1.1 Análisis de Cel.g⁻¹ suelo en cada cobertura por ventana

Los análisis de número de células por gramo de suelo por coberturas dentro de una misma ventana, muestran variaciones dentro de un mismo tipo de cobertura y en tipos de coberturas diferentes, los estadísticos arrojaron que al menos una de las coberturas evaluadas en una misma ventana presenta diferencias significativas con respecto al resto. Considerando que las coberturas están definidas desde el cambio de uso del suelo y la proporción de cobertura vegetal, este es un resultado esperado, otros estudios han analizado la población bacteriana del suelo bajo diferentes tipos de coberturas vegetales y diferentes usos del suelo a la misma profundidad que aquí se estudió, obteniendo diferencias significativas en la biomasa y densidad microbiana atribuida a las diferentes coberturas de uso del suelo (Bello *et al.*, 2013; Tiwari *et al.*, 2019; Gömöryová *et al.*, 2020; Mo *et al.*, 2022)

Por otro lado, el hecho de observar diferencias significativas en la densidad microbiana para un mismo tipo de cobertura dentro de una ventana en particular, por ejemplo, las regeneraciones de la ventana 1 y 2, y los bosques de la ventana 1, es atribuible a la variabilidad intrínseca que tienen cada tipo de cobertura. En el caso de la ventana 1 y 2 son ventanas sujetas al programa de compensación forestal, donde algunas actividades están restringidas para aumentar los servicios ecosistémicos en estas áreas, sin embargo, en la campaña de muestreo se observó que en la W1RG4 y en W1B3, se realizan actividades de quema y para W1RG4 también ocasionalmente ingresa ganado, para explicar cómo influyen estas actividades específicamente sobre la biomasa y densidad microbiana, se necesitaría evaluar estas en el área de estudio para ampliar la información observada.

Lo anterior es coherente con lo reportado por Mo *et al.*, 2022 en su estudio se evaluó como se ve influenciada la diversidad microorganísmica por las actividades humanas, indicando que los suelos albergan microhábitats muy diversos donde confluyen diferentes comunidades de microorganismos a escalas muy pequeñas y que la variabilidad en los datos obtenidos aumenta según las variables de estudio, los autores señalan que las actividades antropogénicas median procesos estocásticos a nivel del suelo y que cuando ocurre alguna perturbación es normal que los procesos estocásticos aumenten hasta convertirse en procesos deterministas, esto hace que los atributos de las comunidades microbianas como densidad, biomasa y biodiversidad, estén en constante cambio y comprenderlos requieren estudios más profundos que brinden mayor información.

8.2.1.2 Análisis de Cel.g⁻¹ suelo por coberturas entre ventanas

Respecto al número de células por gramo de suelo por coberturas entre diferentes ventanas, se observa que para todos los tipos de coberturas (Pastos, Sistemas agroforestales de café y Bosques) se da una diferenciación por ventanas, comportándose de manera similar las coberturas de la ventana 1 y 2 entre sí y difiriendo de las coberturas de la ventana 3 y 4, los datos de estas últimos también se comportan de manera similar. El factor a mayor escala que determina las diferencias entre las ventanas 1 y 2 y las ventanas 2 y 3, es las actividades que se realizan en uno y en otras no debido a la implementación del programa de compensación forestal.

Los resultados evidencian que con respecto a la densidad celular las coberturas de las ventanas 3 y 4 presentan un mayor número de células por gramo de suelo y

en las ventanas 1 y 2 el número de células es menor. Autores como Mo *et al.*, 2022 indican que actividades de cosecha, fertilización y calentamiento del suelo tienen un impacto sobre las comunidades microbianas del suelo. Sin embargo, numerosos estudios indican que las prácticas de manejo y la disminución de actividades como la quema, la desforestación, el uso de fertilizantes orgánicos y de técnicas convencionales de labranza favorecen propiedades como la cantidad de materia orgánica, la cantidad de carbono orgánico en el suelo y en general las condiciones de salud en este, incrementando las poblaciones microbianas (Asadu *et al.*, 2010; Soleimani *et al.*, 2019; Tiwari *et al.*, 2019; Mo *et al.*, 2022).

En las ventanas en no compensación, el uso de fertilizantes inorgánicos, la quema y actividades en general que no contribuyen a la salud del suelo no están restringidas a diferencia de las ventanas que están en compensación, en las ventanas en no compensación los suelos bajo las diferentes coberturas se caracterizaron por presentar valores de pH altos, Geisseler y Scow, 2014, evaluaron el efecto a largo plazo de los fertilizantes sobre los microorganismos del suelo, obteniendo como resultado que el uso de fertilizantes inorgánicos aumenta el pH del suelo, favoreciendo el aumento de la biomasa microbiana. Así mismo, Guo *et al.*, 2016 también el efecto de los cambios del uso de suelo en las comunidades microbianas de bosques tropicales, obteniendo una mayor abundancia bacteriana en condiciones de pH alto, lo planteado por estas investigaciones puede explicar porque en el presente estudio se obtuvieron recuentos microbianos más altos en las ventanas en no compensación y más bajos en ventanas bajo compensación, sin embargo para conocer la dinámica del uso de fertilizantes inorgánicos en el área de estudio y su relación con el aumento o la disminución de las poblaciones de microorganismos se hace necesario realizar estudios que amplíen esta información en la zona.

8.2.2 Actividad Amilolítica

Los datos mostrados evidencian coberturas con resultados heterogéneos con respecto al número de células por gramo de suelo y la actividad amilolítica, este patrón heterogéneo entre las diferentes coberturas dentro de cada ventana puede estar explicado por lo planteado por Sanchez-Gorostiaga *et al.*, 2019 quienes explican las dificultades y limitaciones que se tienen para comprender y predecir las funciones y relaciones de las comunidades microbianas ya que obedecen a rasgos muy particulares de las especies y el rol de estas dentro de interacciones más complejas a escalas paisajísticas, adicionalmente, los investigadores señalan que la actividad amilolítica de ensamblajes microbianos depende de contribuciones especiales de cada especie y sus interacciones, siendo las interacciones funcionales de alto orden las que dominan la actividad amilolítica, lo

que hace que dicho de otra forma, a medida que la comunidad crece, también crecen las interacciones funcionales de alto orden lo que hace impredecible la funcionalidad de la comunidad microbiana, incluso siendo funciones simples dominadas por interacciones complejas.

Por otro lado con respecto al patrón observado entre las diferentes ventanas respecto a la actividad amilolítica, en la ventana 3 y 4 el mayor número de cepas con actividad amilolítica posiblemente esté relacionado con el pH del suelo ya que en estas dos ventanas los valores eran más cercanos a 6, mientras que en la ventana 1 y 2, los valores de pH del suelo eran más cercanos a 4 es decir, más ácidos; el pH está directamente relacionado con la capacidad de producción de los microorganismos de amilasas, Salihu *et al.*, 2015, obtuvieron especies bacterianas capaz de producir alfa-amilasas a pH ácidos y señala que varios autores han reportado previamente obtener amilasas a pH ácidos, a pesar que en su estudio predominaron especies microbianas con capacidad de producción de amilasas alcalófilas.

8.2.3 Análisis de categorización y modelos de las variables microbiológicas

Con respecto a los resultados obtenidos mediante la dicotomización de las variables y la aplicación de modelos logísticos, fue posible observar con respecto al número de células y la presencia de cepas con actividad amilolítica, que estas podían estar en las coberturas indistintamente de si se tenían valores altos de nutrientes o valores altos de densidad, resistencia a la penetración y temperatura. Basados en los resultados es posible inferir que aunque las coberturas tengan características ambientales muy marcadas que las definen, tienen particularidades y una variabilidad intrínseca que permite el establecimiento de comunidades microbianas, ya que estos procesos obedecen a redes de interacción ecológicas más complejas que actúan sobre procesos aparentemente sencillos como puede ser el crecimiento microbiano o la degradación de almidón (Sanchez-Gorostiaga *et al.*, 2019).

Sin embargo, para el caso de las coberturas de pastos, los valores p muestran diferencias significativas respecto al número de cepas con actividad amilolítica en comparación con las coberturas de referencia que son los bosques, es decir, con respecto al número de cepas con actividad amilolítica los pastos son diferentes a los bosques, albergando los pastos un menor número de cepas con actividad amilolítica. Seleznev *et al.*, 2020, investigó los efectos antropogénicos en la actividad biológica de suelos arcillosos en praderas y obtuvo como resultado que

la los nutrientes y la proporción de microorganismos amilolíticos disminuía en suelos antropizados en comparación con suelos naturales. Teniendo en cuenta que los pastos son las coberturas que sufren un mayor grado de antropización esto explica porque la cantidad de cepas con actividad amilolítica fueron significativamente menores en estas coberturas en comparación con los bosques de referencia, las zonas de regeneración y los sistemas agroforestales de café.

Asimismo, otra idea que explica el resultado anteriormente narrado son las características de los pastos, los cuales son coberturas con suelo desnudo, con poca o nula presencia de dosel, donde los valores de materia orgánica y nutrientes resultan menores, en comparación con los bosques, zonas de regeneración y cultivos de café donde la incorporación de nutrientes a la biofase resulta mayor, considerando especialmente que estos son sistemas donde se encuentran especies arbóreas que arrojan material al suelo como hojas o frutos, ricos en carbohidratos como el almidón que sirven como materia prima para la proliferación de microorganismos con capacidad de degradarlos (Amilolíticos).

8.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO

La conductividad hidráulica del suelo mostró que los bosques son coberturas donde se registraron los mayores valores de infiltración; y esta capacidad podría estar vinculada al gradiente de altitud y a la confluencia de las fuentes de escorrentía de primer orden, que confluyen en los puntos de unión de la cuenca, donde la meteorización del suelo estaría más avanzada por la actividad acerada de transformación. Lozano-Baez *et al.*, 2021, evaluó las propiedades hidráulicas del suelo en la Serranía del Perijá Colombiano, relacionándolo con los diferentes cambios en las coberturas vegetales, obteniendo valores elevados de conductividad hidráulica del (Ks) en coberturas de Bosques y cultivos de café, los autores concluyen que la presencia de árboles resulta beneficioso para las propiedades hidráulicas del suelo y afirman que la baja cantidad de materia orgánica, la alta resistencia a la penetración del suelo, la alta densidad aparente y actividades ganaderas aumentan el grado de compactación del suelo, afectando negativamente la conductividad hidráulica en este.

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto a las coberturas que presentan mayores valores de temperatura y la humedad, se tiene que estas corresponden a los sistemas agroforestales de café y a los pastos, mientras que los de menores valores de estas variables, corresponden a bosques, siendo estas las que menor porcentaje de cobertura vegetal, lo que sugiere una relación negativa en estas variables.

Las mayores extensiones de cobertura vegetal están representadas por los bosques y las zonas de regeneración, mientras que los de menor porcentaje son los pastos, exceptuando algunos que se puede clasificar como pastos arbolados. La evidencia sugiere que los cambios en la vegetación son cruciales para el comportamiento de las variables físicas y químicas del suelo, así como las biológicas, los bosques demuestran ser coberturas más estables con respecto a sus propiedades físicas y químicas con patrones de relación entre las variables claramente establecidos, en contraste las regeneraciones, a pesar de tener cobertura vegetal representativa, no presenta patrones de relación de variables claros debido que estas coberturas han respondido a cambios en la vegetación que afectan las características de las propiedades físicas y químicas.

La resistencia a la penetración presenta mayores valores en las coberturas donde la temperatura era mayor y la humedad menor (Pastos y sistemas agroforestales de café), igualmente, los tipos de coberturas que presentan mayor densidad aparente son los sistemas agroforestales de café y los pastos; lo que posiblemente esté relacionado con una mayor compactación del suelo, resultados coherentes con la evidencia que soporta que los cambios en el uso del suelo y la pérdida de las coberturas vegetales afecta directamente la cantidad de carbono y materia orgánica de este, impidiendo el secuestro de carbono y esto condiciona la estructura física del suelo relacionada con la capacidad de este para retener agua y minerales. Sin embargo, esto no impide el establecimiento de comunidades microbianas con densidades celulares altas que responden a las condiciones particulares de cada cobertura.

Los bosques, zonas de regeneración y sistemas agroforestales de café son coberturas asociadas con valores altos en las variables relacionadas con calidad del suelo, como materia orgánica, carbono orgánico y nutrientes. Los pastos son coberturas asociadas con variables que indican grado de compactación como densidad aparente, resistencia a la penetración y temperatura.

Los análisis estadísticos permiten concluir que los valores más altos del número de células por gramo de suelo se encuentran en las ventanas 3 y 4 (No compensación) y los más bajos en las ventanas 1 y 2 (Compensación) y adicionalmente existen diferencias significativas entre las diferentes coberturas y las ventanas. Adicionalmente, a partir del mapeo de la actividad amilolítica de los microorganismos es posible concluir que una mayor representatividad de estas se da en las ventanas 3 y 4 (No compensación) y una menor representatividad en las ventanas 1 y 2 (Compensación). En términos generales, se presenta una alta heterogeneidad desde el indicador microbiológico, ubicando a las zonas por fuera del programa de compensación como las de mayor abundancia en microbiota y actividad, lo que podría explicarse ecológicamente al constituir sistemas con menor transformación del paisaje y con las coberturas de mayor estabilidad.

Es de resaltar que las coberturas en las ventanas incluidas en el programa de compensación, podrían estar mostrando que la renovación constante de su estructura vegetal (SAF, cultivos) le otorga un comportamiento más acorde a la intervención antrópica, que no necesariamente se considera negativa, por el hecho de que está en constante renovación. Lo descrito, refleja que los sistemas de organización y simbiosis microbiana son cambiantes, considerando que el establecimiento de sistemas de regeneración y otras figuras en el plan de compensación, deben responder en el tiempo con la estabilidad.

La conductividad hidráulica del suelo es más alta en coberturas de bosques y más baja en pastos mostrando que suelos bajo coberturas de bosques tienen una mayor capacidad de retención de agua.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda dar continuidad a la evaluación de las variables microbiológicas, para así poder determinar atributos asociados a las comunidades microbianas no solo bacterianas y así dilucidar el comportamiento en asociación y su sinergia dentro de las coberturas y los paisajes.

Las diferencias en altitud de una de las ventanas de muestreo y el análisis de la información abren la ventana para considerar en futuros estudios la posición del paisaje como un factor que influye en las variables fisicoquímicas del suelo.

A partir de los resultados obtenidos se muestra interesante evaluar en el área de estudio, la incidencia detallada de las actividades que se realizan en no compensación tales como quema, tala y uso de fertilizantes inorgánicos.

Para futuros estudios se recomienda tener en cuenta la variabilidad intrínseca dentro de un mismo tipo de cobertura, ya que esta explica los patrones heterogéneos observados en los resultados.

Así mismo, para la variable conductividad hidráulica, necesita ser analizada con más detalle, para observar la dinámica y la relación de esta con respecto a las demás variables físicas y químicas y también las microbiológicas.

Por otro lado, con respecto a las variables microbiológicas en futuros estudios a la escala de paisajes, sería interesante vincular herramientas genómicas que permitan obtener información más detallada respecto a las redes ecológicas que forman las comunidades dentro de las diferentes coberturas vegetales, considerando que los métodos tradicionales para el aislamiento de microorganismos tienen limitaciones.

11. REFERENCIAS

- Agroecosistemas, T.E.S., 2020. Efecto del manejo agrícola 389–398.
- Aguilera, 2016. Serranía del Perijá: Geografía , capital humano , economía y medio ambiente i María Aguilera Díaz ii. Ser. Doc. Trab. Sobre Econ. Reg. del Banco la República 134.
- Almendro-Candel, M.B., Navarro-Pedreño, J., Meléndez-Pastor, I., Córdoba Sola, P., Gómez-Lucas, I., 2006. Materia orgánica y movilidad de nitrógeno y potasio en un Antrosol del sureste español (Alicante) enmendado con lodo de depuradora. *Edafología* 13, 151–160.
- Asadu, C.L.A., Obasi, S.C., Dixon, A.G.O., 2010. Variations in soil physical properties in a cleared forestland continuously cultivated for seven years in eastern nsukka, Nigeria. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41, 123–132. <https://doi.org/10.1080/00103620903426931>
- Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2005). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2(8), 805–814.
- Bello, H., Isa, T., Isa, M., Akinmuisere, K., 2013. Effects Of Land Use On The Nature And Population Of Microorganisms In The Semi-Arid Region Of North-Eastern Nigeria. *Int. J. Environ.* 2, 224–230. <https://doi.org/10.3126/ije.v2i1.9223>
- Bolaños, E.M., 2020. Impacto de las prácticas agroecológicas sobre la conservación, incremento o interacción de servicios ecosistémicos en suelos agrícolas: Revisión de Literatura. *Esc. Agrícola Panam.* 38.
- Bufebo, B., Elias, E., Agegnehu, G., 2021. Effects of landscape positions on soil physicochemical properties at Shenkolla Watershed, South Central Ethiopia. *Environ. Syst. Res.* 10. <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00222-8>
- Callejas, R., 2011. Generalidades del departamento del cesar. Corp. Auton. del cesar. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Carvajal, A.F., Feijoo, A., Quintero, H., Rondón, M.A., 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Rev. la Cienc. del Suelo y Nutr. Veg.* 9, 222–235. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912009000300005>
- Carvajal, A.F., Pabón, J.D., 2014. Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la Región Andina Colombiana. *Soc. Nat.* 26, 95–112. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140107>
- Chintala, R., Owen, R.K., Schumacher, T.E., Spokas, K.A., Mcdonald, L.M., Kumar, S., Clay, D.E., Malo, D.D., Bleakley, B., 2014. Denitrification kinetics in biomass- and biochar-amended soils of different landscape positions. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3762-2>
- Ciancaglini, N., 2000. Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. INTA EEA San Juan 10.
- Contreras Santos, J.L., Martínez Atencia, J., Cadena Torres, J., Fallas Guzmán, C.K., 2019. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agron. Costarric.* 44, 29–41.

- <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
CORPOCESAR. (2020). Programa de compensación forestal del Departamento de Cesar.
- CVC, 2016. Capítulo 13. Cobertura y uso de la tierra. Actual. POMCA Río La Vieja. (Plan Ord. y Manejo cuenca río La Vieja). Corporación Autónoma Reg. del Val. del Cauca (pp. 13-92). 1950.
- Eduardo Martínez, H., Juan Pablo Fuentes, E., Edmundo Acevedo, H., 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Rev. la Cienc. del Suelo y Nutr. Veg.* 8, 68–96. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912008000100006>
- Ellies, A., Ramirez, C., Mac Donald, R., 1993. Variacion en la resistencia del suelo por su uso. *Turrialba* 43, 77–82.
- FAO. (1992). Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Recuperado de [URL].
- Fang, X., Zhao, W., Wang, L., Feng, Q., Ding, J., Liu, Y., Zhang, X., 2016. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 3309–3323. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3309-2016>
- Findell, K.L., Berg, A., Gentine, P., Krasting, J.P., Lintner, B.R., Malyshev, S., Santanello, J.A., Shevliakova, E., 2017. The impact of anthropogenic land use and land cover change on regional climate extremes. *Nat. Commun.* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01038-w>
- Flores-Delgadillo, L., Alcalá-Martínez, J.R., 2010. Manual de Procedimientos Analíticos: Laboratorio de Física de Suelos. *Inst. Geol.* 56.
- Friedman, M., 1940. A COMPARISON OF ALTERNATIVE TEST OF SIGNIFICANCE FOR THE PROBLEM OF m RANKINGS. *Ann. Stat.* 19, 1403–1433.
- Garrido Velarde, J.G., Hernández Blanco, J.H., Montero Parejo, M.J., 2017. Estudio de la cobertura del dosel del castaño. *Rev. científica Monfragüe Resiliente* 1, 114–130.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Laser particle size analysis, in: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph No.* pp. 383–411.
- Geisseler, D., Scow, K.M., 2014. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms - A review. *Soil Biol. Biochem.* 75, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.023>
- Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J. R., & Beard, K. H. (2010). A Meta-analytic review of corridor effectiveness. *Conservation Biology*, 24(3), 660-668
- Gömöryová, E., Barančíková, G., Tobiašová, E., Halás, J., Skalský, R., Koco, Š., Gömöry, D., 2020. Responses of soil microorganisms to land use in different soil types along the soil profiles. *Soil Water Res.* 15, 125–134. <https://doi.org/10.17221/20/2019-SWR>
- González, A., Rodríguez, G., Fábrega Duque, J., 2021. Impacto de la cobertura boscosa y uso de suelo sobre la textura y conductividad hidráulica del suelo en la subcuenca del río Estibaná. *Congr. Nac. Cienc. y Tecnol. – APANAC* 257–262. <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3194>
- Guo, N., Degen, A.A., Deng, B., Shi, F., Bai, Y., Zhang, T., Long, R., Shang, Z., 2019. Changes in vegetation parameters and soil nutrients along degradation

- and recovery successions on alpine grasslands of the Tibetan plateau. *Agric. Ecosyst. Environ.* 284, 106593. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106593>
- Guo, X., Chen, H.Y.H., Meng, M., Biswas, S.R., Ye, L., Zhang, J., 2016. Effects of land use change on the composition of soil microbial communities in a managed subtropical forest. *For. Ecol. Manage.* 373, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.048>
- Guzman, J.G., Al-Kaisi, M.M., 2011. Landscape position effect on selected soil physical properties of reconstructed prairies in Southcentral Iowa. *J. Soil Water Conserv.* 66, 183–191. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.3.183>
- Hågvar, S., Dyrkolbotn, S., & Steinnes, E. (2005). Relationships between soil chemistry, vegetation and ecosystem processes at three oligotrophic catchments in Norway. *Ecological Bulletins*, 53, 207-216.
- Hankin, L., Sands, D., Hill, D., 1974. RELATION OF LAND USE TO SOME DEGRADATIVE ENZYMATIC. *Soil Sci.* 118, 38–44.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853.
- Henríquez, C., Ortiz, O., Largaespada, K., Portugués, P., Vargas, M., Villalobos, P., Gómez, D., 2011. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, AL CORTE TANGENCIAL, DENSIDAD APARENTE Y TEMPERATURA EN UN SUELO CAFETALERO, JUAN VIÑAS, COSTA RICA 35, 175–184.
- Hernández-garcía, L.M., López-hernández, D., Hernández, L., Ojeda, A., Quintero, E., Caipo, S., 2018. Earthworms , microbial biomass and enzymatic activities as useful indicator of agroecosystem sustainability in protecte *Scientific Times Journal of Agri Science Earthworms , microbial biomass and enzymatic activities as useful bioindicators of agroec.*
- ICONTEC, 2008. NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 5596. CALIDAD DE SUELO, DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.
- ICONTEC, 2007. NTC 5526.
- ICONTEC, 2006. NTC 5403.
- Jara Domínguez, C.E., Luis David, M.D., Alvarez, Toro, P., Carlos Eduardo, N.R., 2019. ESTABLECIMIENTO DE ENSAYOS PARA MODELACIÓN DE FRIJOL EN EL, TeSAC Cauca, Colombia.
- Kaur, R., Jhorar, O. P., Malik, R. S., & Singh, J. (2009). Distribution and retention of heavy metals in the soil of effluent irrigated agriculture land. *Journal of Environmental Biology*, 30(1), 61-66.
- Lennox, G. D., Gardner, T. A., Thomson, J. R., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A. C., ... & Aragão, L. E. (2019). Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests. *Global Change Biology*, 25(7), 2608-2624.
- Lorena, C., Medina, A., 2017. Evaluación de la fertilidad del suelo en función de la actividad enzimática en cultivo ecológico y convencional de pimiento (*Capsicum sp.*).
- Lozano-Baez, S.E., Cooper, M., Ferraz, S.F. de B., Rodrigues, R.R., Castellini, M., Di Prima, S., 2019. Recovery of soil hydraulic properties for assisted passive and active restoration: Assessing historical land use and forest structure.

- Water (Switzerland) 11. <https://doi.org/10.3390/w11010086>
- Lozano-Baez, S.E., Domínguez-Haydar, Y., Di Prima, S., Cooper, M., Castellini, M., 2021. Shade-grown coffee in colombia benefits soil hydraulic conductivity. *Sustain.* 13, 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13147768>
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., Ortiz-Medel, J., 2010. Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnol. y Ciencias del Agua* 1, 89–103.
- Mathewos, M., 2020. Assessment of selected soil physicochemical properties on different land-use systems and landscape positions at Hamesa watershed , Wolayita zone , Southern Ethiopia. *J. Soil Sci. Environ.* 11, 122–130. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2019.0774>
- Melgarejo, J., M^a, M., López Ortiz, I., Fernández Aracil, P., 2021. INUNDACIONES Y SEQUÍAS Análisis Multidisciplinar para Mitigar el Impacto de los Fenómenos Climáticos Extremos.
- Mendoza, R., Espinoza, A., 2017a. Guía Técnica para muestreo de suelos., Universidad Nacional Agraria.
- Mendoza, R., Espinoza, A., 2017b. Guía Técnica para muestreo de suelos. Asa 13–21.
- Menezes, R.S.C., Sales, A.T., Primo, D.C., Albuquerque, E.R.G.M. de, Jesus, K.N. de, Pareyn, F.G.C., Santana, M. da S., Santos, U.J. dos, Martins, J.C.R., Althoff, T.D., Nascimento, D.M. do, Gouveia, R.F., Fernandes, M.M., Loureiro, D.C., Araújo Filho, J.C. de, Giongo, V., Duda, G.P., Alves, B.J.R., Ivo, W.M.P. de M., Andrade, E.M. de, Pinto, A. de S., Sampaio, E.V. de S.B., 2021. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma* 390. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>
- Micu, M., Badulescu, L., Israel-Roming, F., 2017. a Review on the Enzymatic Indicators. *Bull. Sci. Biotechnol.* XXI, 223–228.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis.* Washington, DC: Island Press.
- Mo, L., Zanella, A., Bolzonella, C., Squartini, A., Xu, G.L., Banas, D., Rosatti, M., Longo, E., Pindo, M., Concheri, G., Fritz, I., Ranzani, G., Bellonzi, M., Campagnolo, M., Casarotto, D., Longo, M., Linnyk, V., Ihlein, L., Yeomans, A.J., 2022. Land Use, Microorganisms, and Soil Organic Carbon: Putting the Pieces Together. *Diversity* 14. <https://doi.org/10.3390/d14080638>
- Mojena, E.E., 2020. Pensamiento 2019–2020.
- Naidu, G., M. Rao, T., & Sahu, B. (2003). Amylolytic bacteria and enzymes: Prospects and applications for starch industry. *African Journal of Biotechnology*, 2(12), 645-648.
- Ni, J., Cheng, Y., Wang, Q., Ng, C.W.W., Garg, A., 2019. Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modelling. *J. Hydrol.* 571, 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.009>
- Norambuena, P. V, Walter, L.L., Vera, W.L., 2002. Comparison between the pipette and bouyoucos methods and their relation with water retention in eight soils of the andean plateau , Parinacota Province , Chile. *Agric. Téc.* 62, 150–157.
- Ortega Molina, L.F., 2014. Evaluación comparativa del papel de diferentes

- coberturas vegetales sobre algunos servicios ecosistémicos en los Andes colombianos 140.
- Osorio, N.W., 2012. pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. Manejo Integr. del Suelo y Nutr. Veg. 1, 4–7.
- Pancholy, S., Rice, E., 1972. Soil Enzymes in Relation to Old Field Succession: Amylase, Cellulase, Invertase, Dehydrogenase, and Urease 1 SUNIL K. PANCHOLY AND ELROY L. RicE 2. Soil Enzym. Relat. to Old F. Succession Amylase, Cell. Invertase, Dehydrogenase, Urease 37, 47–50.
- Reiners, W.A., Bouwman, A.F., Y, P.W.F.J., Keller, M., 2014. Tropical Rain Forest Conversion to Pasture : Changes in Vegetation and Soil Properties Author (s): W . A . Reiners , A . F . Bouwman , W . F . J . Parsons and M . Keller Published by: Ecological Society of America Stable URL : <http://www.jstor.org/stab>. Ecol. Soc. Am. 4, 363–377.
- Rezaei, S.A., Gilkes, R.J., 2005. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. Geoderma 125, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.011>
- Salihu, Y., Saidu, Rabi, G.A., Umar A A, Zeynep, Unzile, 2015. Detection of Alpha-Amylase Activity from Soil Bacteria. IOSR J. Biotechnol. Biochem. 1, 1–9.
- Sanchez-Gorostiaga, A., Bajić, D., Osborne, M.L., Poyatos, J.F., Sanchez, A., 2019. High-order interactions distort the functional landscape of microbial consortia, PLoS Biology. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000550>
- Savva, Y., Szlavecz, K., Pouyat, R. V., Groffman, P.M., Heisler, G., 2010. Effects of Land Use and Vegetation Cover on Soil Temperature in an Urban Ecosystem. Soil Sci. Soc. Am. J. 74, 469–480. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0107>
- Sekaran, U., Mccoy, C., Kumar, S., 2019. Soil microbial community structure and enzymatic activity responses to nitrogen management and landscape positions in switchgrass (*Panicum virgatum* L .) 836–851. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12591>
- Sherene, T., 2017. Role of Soil Enzymes in Nutrient Transformation: A Review. Bio Bull. 3 (1), 109–131.
- Soleimani, A., Hosseini, S.M., Massah Bavani, A.R., Jafari, M., Francaviglia, R., 2019. Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran. Catena 177, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.018>
- Song, Y.T., Zhou, D.W., Zhang, H.X., Li, G. Di, Jin, Y.H., Li, Q., 2013. Effects of vegetation height and density on soil temperature variations. Chinese Sci. Bull. 58, 907–912. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5596-y>
- Tichý, L., 2016. Field test of canopy cover estimation by hemispherical photographs taken with a smartphone. J. Veg. Sci. 27, 427–435. <https://doi.org/10.1111/jvs.12350>
- Tiwari, S., Singh, C., Boudh, S., Rai, P.K., Gupta, V.K., Singh, J.S., 2019. Land use change: A key ecological disturbance declines soil microbial biomass in dry tropical uplands. J. Environ. Manage. 242, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.052>
- Veverka, J.S., Udawatta, R.P., Kremer, R.J., 2019. Soil health indicator responses

- on Missouri claypan soils affected by landscape position , depth , and management practices 74, 126–137. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.2.126>
- Villazón Gómez, J.A., Martín Gutiérrez, G., Cobo Vidal, Y., Candelario, R., Tablada, N., Alejandro, R., Reyes, G., 2022. Variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un haplustert crómico bajo pasto natural Spatial variability of soil resistance to penetration on a chromic haplustert under natural grassland. *Idesia* 40, 7–14.
- Wickings, K., Grandy, A.S., Kravchenko, A.N., 2016. Agriculture , Ecosystems and Environment Going with the fl ow : Landscape position drives differences in microbial biomass and activity in conventional , low input , and organic agricultural systems in the Midwestern U . S . "Agriculture, Ecosyst. Environ. 218, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.005>
- Wydro, U., Wollejko, E., Jabłńska-Trypuć, A., Butarewicz, A., Lłoboda, T., 2018. The effect of organic substrates application on the amylolytic activity of urban soils. *J. Ecol. Eng.* 19, 251–259. <https://doi.org/10.12911/22998993/89673>
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H., De Moraes, J.M., 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *For. Ecol. Manage.* 222, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070>

12. ANEXOS

Anexo 1. Descripción de las características de los puntos muestreados.

SITIO	VENTANA	PAISAJE	PUNTO	COBERTURA	OBSERVACIONES
W1F1	W1	COMPENTATION	F1	FOREST	Arboles entre 40 -60 m de alto.
W1F2	W1	COMPENTATION	F2	FOREST	Arboles entre 20 y 40 m de alto.
W1F3	W1	COMPENTATION	F3	FOREST	Arboles entre 20 y 30 m de alto, actividades de quema.
W1F4	W1	COMPENTATION	F4	FOREST	Arboles entre 50 -70 m de alto, vegetación espesa, actividades de tala en un lateral.
W1R1	W1	COMPENTATION	R1	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 20 años, arboles entre 25 - 30 m de alto.
W1R2	W1	COMPENTATION	R2	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 18 años; arboles entre 15-20 m; Suelo cubierto por helechos.
W1R3	W1	COMPENTATION	R3	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 15 años; arboles entre 25-30 m.
W1R4	W1	COMPENTATION	R4	REGENERATION	Arboles entre 15 - 20 m de alto, actividades de quema, raramente ingresa ganado
W1C1	W1	COMPENTATION	C1	COFFEE	Plantas de café entre 1.70 - 1.80 m de alto, variedad Colombia y Arabigo; café en sombra con Nogal y Platano
W1C2	W1	COMPENTATION	C2	COFFEE	Plantas de café entre 1.80 - 2.0 m de alto, variedad Arabigo, Borbón y Colombia, Café en sombra con Nogal, Guamo y Platano.
W1C3	W1	COMPENTATION	C3	COFFEE	Plantas de café entre 1 - 1.5 m de alto, variedad Colombia y Castillo; Café en sombra con Nogal, Guamo, Gurapo, Guineo;
W1C4	W1	COMPENTATION	C4	COFFEE	Plantas de café entre 1.80 - 2.0 m de alto, variedad Colombia, café en sombra con Nogal, Mango, Guamo;

					Recientemente fumigado con Glifosato.
W1P1	W1	COMPENTATION	P1	PASTURE	Pasto con algunos helechos secos cubriendo el suelo.
W1P2	W1	COMPENTATION	P2	PASTURE	Pasto con circulación de ganado, suelo compacto.
W1P3	W1	COMPENTATION	P3	PASTURE	Potrero, pastan ganado, mula, excrementos, actividades de quema.
W1P4	W1	COMPENTATION	P4	PASTURE	Pasto arbolado, cerca a la carretera.
W2F1	W2	COMPENTATION	F1	FOREST	Arboles entre 20 - 25 m de alto.
W2F2	W2	COMPENTATION	F2	FOREST	Arboles entre 25 - 35 m de alto.
W2F3	W2	COMPENTATION	F3	FOREST	Arboles entre 30 -50 m de alto, una corriente de agua lo atraviesa.
W2F4	W2	COMPENTATION	F4	FOREST	Arboles entre 40 - 60 m de alto, suelo rocoso, un cupero de agua lo atraviesa.
W2R1	W2	COMPENTATION	R1	REGENERATION	Restauración activa de aproximadamente 12 años, Plantación en líneas de plantivo de 3x3.
W2R2	W2	COMPENTATION	R2	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 20 años, actividades de quema.
W2R3	W2	COMPENTATION	R3	REGENERATION	
W2R4	W2	COMPENTATION	R4	REGENERATION	Regeneración inicial
W2C1	W2	COMPENTATION	C1	COFFEE	Plantas de café entre 1.0 y 1.8 m de alto, café floreciendo, café en sombra.
W2C2	W2	COMPENTATION	C2	COFFEE	Plantas de café entre 1.50 - 2.0 m de alto, variedad Castillo y Colombia.
W2C3	W2	COMPENTATION	C3	COFFEE	Plantas de café entre 50 - 100 m de alto, No está en sombra.
W2C4	W2	COMPENTATION	C4	COFFEE	Plantas de café entre 1.0 - 150 m de alto, variedad Colombia, café en sombra con aguate, mango, platano, Nogal, Oreja de Mula, Papamp.
W2P1	W2	COMPENTATION	P1	PASTURE	
W2P2	W2	COMPENTATION	P2	PASTURE	Pasto arbolado.

W2P3	W2	COMPENTATION	P3	PASTURE	Pasto con arboles dispersos.
W2P4	W2	COMPENTATION	P4	PASTURE	Pasto abandonado de 7 años, no tiene circulación de ganado.
W3F1	W3	NO COMPENTATION	F1	FOREST	Arboles entre 25 -50 m de alto.
W3F2	W3	NO COMPENTATION	F2	FOREST	Arboles entre 30 - 50 m de alto, actividades de tala en los laterales.
W3F3	W3	NO COMPENTATION	F3	FOREST	Arboles entre 10 - 20 m de alto.
W3F4	W3	NO COMPENTATION	F4	FOREST	Arboles entre 50 - 60 m de alto, un cuerpo de agua atraviesa el bosque.
W3R1	W3	NO COMPENTATION	R1	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 10 años.
W3R2	W3	NO COMPENTATION	R2	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 12 años.
W3R3	W3	NO COMPENTATION	R3	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 9 años, arboles entre 4 -10 m de alto.
W3R4	W3	NO COMPENTATION	R4	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 12 años, arboles entre 10 - 15 m de alto.
W3C1	W3	NO COMPENTATION	C1	COFFEE	Plantas de café entre 1.5 - 2 m de alto, café en sombra con Yarumo, Guamo, Aguacate.
W3C2	W3	NO COMPENTATION	C2	COFFEE	Plantas de café entre 50 - 1.0 m de alto, café en sombra con Guamo, Platano, Yarumo y Balzo.
W3C3	W3	NO COMPENTATION	C3	COFFEE	Plantas de café entre 50 - 1.0 m de alto, café en sombra con Guamo, Caucho, Aguacate, Platano y Guineo.
W3C4	W3	NO COMPENTATION	C4	COFFEE	Plantas de café entre 60 - 110 m de alto, café en sombra con platano, Aguacate y Roble.
W3P1	W3	NO COMPENTATION	P1	PASTURE	Pasto con helechos que cubren el suelo, recientemente fumigado.
W3P2	W3	NO COMPENTATION	P2	PASTURE	Pasto con algunos arboles dispersos.
W3P3	W3	NO COMPENTATION	P3	PASTURE	
W3P4	W3	NO COMPENTATION	P4	PASTURE	Pasto con algunos arboles dispersos.

W4F1	W4	NO COMPENTATION	F1	FOREST	Arboles entre 30 - 50 m de alto, rio pasa por un lateral.
W4F2	W4	NO COMPENTATION	F2	FOREST	Arboles entre 30 - 60 m de alto, rio cercano.
W4F3	W4	NO COMPENTATION	F3	FOREST	Arboles entre 30 - 40 m de alto.
W4F4	W4	NO COMPENTATION	F4	FOREST	Arboles entre 30 - 40 m de alto, un rio lo atraviesa, actividades de quema cercanas al bosque.
W4R1	W4	NO COMPENTATION	R1	REGENERATION	Regeneración natural de aproximadamente 20 años, arboles entre 10 - 20 m de alto.
W4R2	W4	NO COMPENTATION	R2	REGENERATION	Regeneración natural con arboles entre 15 - 30 m de alto
W4R3	W4	NO COMPENTATION	R3	REGENERATION	Regeneración natural
W4R4	W4	NO COMPENTATION	R4	REGENERATION	Regeneración natural, arboles entre 10 - 15 m de alto.
W4C1	W4	NO COMPENTATION	C1	COFFEE	Plantas de café entre 1.0 - 1.5 m de alto, variedad Castillo, café en sombra con Platano, Guayaba, Aguacate, Papaya.
W4C2	W4	NO COMPENTATION	C2	COFFEE	Plantas de café entre 80 - 1.2 m de alto, variedad Castillo, café con poca sombra con Platano, Mango, Aguacate.
W4C3	W4	NO COMPENTATION	C3	COFFEE	Plantas de café entre 1.0 - 1.5 m de alto, variedad Castillo, café en sombra con Yarumo, Cedro, Platano, Totumo, Guasimo.
W4C4	W4	NO COMPENTATION	C4	COFFEE	Plantas de café entre 2.0 - 3.0 m de alto, variedad Castillo, Café en sombra con Mandarina, Yarumo, Roble, abundante sombra, se encuentra al lado del bosque.
W4P1	W4	NO COMPENTATION	P1	PASTURE	pasto con suelo descubierto.
W4P2	W4	NO COMPENTATION	P2	PASTURE	Pasto con suelo rocoso, la muestra no se pudo tomar con el barrenador.
W4P3	W4	NO COMPENTATION	P3	PASTURE	Pasto con circulación de ganado, presentes en el momento del muestreo, Pasto Castilla, algunos

					arboles dispersos.
W4P4	W4	NO COMPENTATION	P4	PASTURE	Pasto Castilla, algunos arboles dispersos.

Anexo 2. Nomenclatura de las variables analizadas.

ETIQUETA	PREFIJO	PROPUESTA	NOMBRE	NAMES
SITIO	sit	SITIO	sit_sitio	sit_sitio
VENTANA	sit	VENTANA	sit_ventana	sit_ventana
PUNTO	sit	PUNTO	sit_punto	sit_punto
COBERTURA	sit	COBERTURA	sit_cobertura	sit_cobertura
Latitud	sit	Latitud	sit_latitud	sit_latitud
Longitud	sit	Longitud	sit_longitud	sit_longitud
Altura	fis	Altura	fis_altura	fis_altura
Temp del suelo (°C)	fis	temperatura	fis_temperatura	fis_temperatura
Hum del suelo (%)	fis	humedad	fis_humedad	fis_humedad
Cobertura dosel (%)	fis	dosel	fis_dosel	fis_dosel
Densidad Aparente aparente del suelo (Mg/m³)	fis	da	fis_da	fis_da
Resistencia a la penetración a la Penetración (Kg/cm²)	fis	resistencia	fis_resistencia	fis_resistencia
Porcentaje de arena (% A)	fis	arena	fis_arena	fis_arena
Porcentaje de arcilla (% Ar)	fis	arcilla	fis_arcilla	fis_arcilla
Porcentaje de limo (% L)	fis	limo	fis_limo	fis_limo
Clase textural	fis	textura	fis_textura	fis_textura
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	fis	ce	fis_ce	fis_ce
Capacidad Interc Catiónico Efect (CICE)	fis	cice	fis_cice	fis_cice
Ks	fis	ks	fis_ks	fis_ks
pH (1:2,5)	qui	ph	qui_ph	qui_ph
Acidez (Al+H)	qui	acidez	qui_acidez	qui_acidez
Aluminio (Al) Intercambiable	qui	al	qui_al	qui_al
Carbono Orgánico (CO)	qui	c	qui_c	qui_c
Materia Orgánica (MO)	qui	mo	qui_mo	qui_mo
Azufre (S) disponible	qui	s	qui_s	qui_s
Calcio (Ca) disponible	qui	ca	qui_ca	qui_ca
Magnesio (Mg) Disponible	qui	mg	qui_mg	qui_mg
Potasio (K) Disponible	qui	k	qui_k	qui_k
Boro (B) Disponible	qui	b	qui_b	qui_b
Hierro (Fe) olsen Disponible	qui	fe	qui_fe	qui_fe
Cobre (Cu) olsen Disponible	qui	cu	qui_cu	qui_cu
Manganeso (Mn) olsen Disponible	qui	mn	qui_mn	qui_mn
Zinc (Zn) olsen Disponible	qui	zn	qui_zn	qui_zn
Sodio (Na) Disponible	qui	na	qui_na	qui_na