Funcionalidad física, química y biológica del suelo en tres usos de la tierra, un análisis para García Rovira en Santander.

Juan Carlos Eugenio Sánchez

Fernando Alonso Estupiñán Pinzón

Propuesta trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Forestal

Director

Ricardo Andrés Oviedo Celis

MSc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Codirector

Mauricio Andrés Ruiz Ochoa

PhD. en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería Forestal.

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres, ***Pedro Eugenio García y Lida Sánchez León***, con profundo respeto y orgullo, por su apoyo motivación, paciencia y esfuerzo constante para formarme como persona y como profesional. Este logro es el resultado de su dedicación y del ejemplo que siempre me han dado.

Juan Carlos Eugenio Sánchez

Dedico este proyecto, fruto de esfuerzo, dedicación y perseverancia, a mis padres, ***Germán Estupiñán e Isabel Pinzón,*** por su amor, apoyo incondicional, paciencia y motivación durante cada etapa de este proceso. Gracias por acompañarme, confiar en mí y brindarme las herramientas necesarias para formarme como persona y profesional.

A mi hermano, ***Cristian Estupiñán***, por su compañía, apoyo y por estar presente en los momentos importantes de mi vida.

A mi familia, por cada palabra de aliento, por creer en mí y por acompañarme en este camino.

Finalmente, dedico este logro a todas aquellas personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este proceso y contribuyeron a que hoy pueda culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Fernando Alonso Estupiñan Pinzón

Agradecimientos

Ante todo, agradezco a Dios por brindarme la vida, la salud y la sabiduría necesarias para afrontar cada una de las etapas de este proceso, así como por permitirme llegar hasta este momento tan importante, culminando de manera satisfactoria mi formación profesional.

Quiero expresar un agradecimiento especial a nuestro director ***MSc. Ricardo Oviedo Celis,*** quien fue un eje fundamental en el desarrollo de este trabajo. Su disposición constante para asesorarnos la claridad de sus orientaciones y la generosidad con la que compartió sus amplios conocimientos y experiencia profesional fueron determinantes para el buen desarrollo de esta investigación, Su acompañamiento representó un apoyo constante a lo largo de todo el proceso.

Asimismo, agradezco a nuestro codirector ***PhD. Mauricio Andrés Ruiz Ochoa***, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y por cada una de sus observaciones y correcciones, las cuales fueron realizadas con rigurosidad y compromiso.

A los propietarios de las fincas donde se llevó a cabo el trabajo de campo, por abrirnos las puertas de sus predios y permitirnos realizar cada una de las actividades planteadas para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, extiendo mi gratitud a la ***Universidad Industrial de Santander*** por brindarme los espacios y recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo, y por ser parte fundamental de mi formación académica y profesional.

Juan Carlos y Fernando

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 12

1 Objetivos 15

1.1 Objetivo General 15

1.2 Objetivos Específicos 15

2 Marco teórico 16

2.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo 16

2.2 Usos del suelo 18

2.2.1 Suelo forestal 18

2.2.2 Suelo agrícola 19

2.3 Funcionalidad del suelo 21

3 Metodología 21

3.1 Área de estudio 21

3.2 Análisis propiedades del suelo por municipio y uso de la tierra 22

3.3 Estimación índice sintético de calidad del suelo 24

3.4 Estimación funcionalidad del suelo. 25

4 Resultados 27

4.1 Caracterización física, química y biológica usos del suelo 27

4.2 Evaluación de la calidad del suelo por contexto de estudio 30

4.3 Funcionalidad del suelo por contexto de uso 33

5 Discusión 38

6 Conclusiones 42

7 Recomendaciones 43

Referencias bibliográficas 45

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Conjunto de propiedades químicas, físicas y biológicas seleccionadas para evaluacion de calidad del suelo 23

Tabla 2. Agrupación propiedades del suelo por funciones 25

Tabla 3. Diferencias en las propiedades físicas del suelo entre usos del suelo según el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey 28

Tabla 4 Diferencias en las propiedades químicas del suelo entre usos del suelo según el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey. 29

Tabla 5. Diferencias en las propiedades biológicas del suelo entre usos del suelo según el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey. 30

Tabla 6. Contribución por componentes principales propiedades físicas, químicas y biológicas para usos del suelo analizados 32

Tabla 7. Cuantificación índice general calidad para usos del suelo analizados 33

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Localización área de estudio 23

Figura 2. Diagrama de violín y boxplot para IGCS por uso del suelo. Estimación área de densidad por el método matemático Kernel 34

Figura 3. Funcionalidad física de usos del suelo para el contexto de estudio. Valores estimados como Z-Core a partir de $\bar{x}$ y σ. | 35

Figura 4. Funcionalidad química de usos del suelo para el contexto de estudio. Valores estimados como Z-Core a partir de $\bar{x}$ y σ 37

Figura 5. Funcionalidad biológica de usos del suelo para el contexto de estudio. Valores estimados como Z-Core a partir de $\bar{x}$ y σ 38

Glosario

Funcionalidad del suelo: Capacidad del suelo para mantener procesos y condiciones que permiten el desarrollo de funciones ecológicas y el sostenimiento de los ecosistemas.

Calidad del suelo: Condición del suelo en relación con su capacidad para desempeñar funciones dentro de los límites de un ecosistema y contexto de uso determinados.

Funcionalidad física: Capacidad del suelo para mantener condiciones estructurales e hídricas que favorecen procesos como la infiltración, almacenamiento y movimiento del agua.

Funcionalidad química: Capacidad del suelo para mantener condiciones relacionadas con la disponibilidad y almacenamiento de nutrientes, el carbono y el equilibrio químico.

Funcionalidad biológica: Capacidad del suelo para sostener la actividad y diversidad de organismos edáficos y los procesos biológicos asociados.

Disponibilidad de nutrientes: Condición que determina la cantidad de nutrientes presentes en formas potencialmente accesibles para los organismos y, particularmente, para las plantas.

Acervo de nutrientes: Reserva de elementos nutritivos almacenados en el suelo que pueden participar en los ciclos biogeoquímicos.

Biota edáfica: Conjunto de organismos que habitan el suelo y participan en procesos como la descomposición, transformación y ciclaje de nutrientes.

Ciclaje de nutrientes: Conjunto de procesos mediante los cuales los elementos nutritivos son transformados, movilizados y reincorporados al sistema suelo-planta.

Sumidero de carbono: Capacidad del suelo para almacenar y retener carbono, contribuyendo a su permanencia dentro del sistema edáfico.

Barbecho: Uso de la tierra en el que un terreno agrícola permanece temporalmente sin cultivo, permitiendo la recuperación parcial de algunas propiedades y procesos del suelo.

Plantación forestal: Sistema de uso de la tierra establecido mediante la plantación y manejo de especies forestales, orientado a la producción de bienes forestales y al mantenimiento de funciones asociadas al ecosistema.

Cultivo agrícola: Uso de la tierra destinado al establecimiento y manejo de especies agrícolas para la producción de alimentos, materias primas u otros productos.

Gestión edáfica: conjunto de prácticas y estrategias orientadas al manejo y conservación del suelo, dirigidas a mantener o mejorar sus propiedades, procesos y capacidad para desempeñar funciones ecológicas.

Resumen

Título: Funcionalidad física, química y biológica del suelo en tres usos de la tierra, un análisis para García Rovira en Santander [*]

Autor: Juan Carlos Eugenio Sánchez, Fernando Alonso Estupiñán Pinzón[**]

Palabras Clave: Calidad del suelo, funcionalidad del suelo; gestión edáfica, usos de la tierra.

Descripción.

El suelo es un recurso natural estratégico para el soporte y sustento de los sistemas vivos; sin embargo, las presiones antrópicas impulsan cambios que pueden alterar su calidad y funcionalidad. Esta investigación evaluó, mediante un enfoque integral, la calidad y funcionalidad del suelo bajo tres usos de la tierra (cultivo agrícola, barbecho y plantación forestal) en dos localidades de García Rovira, Santander. Se realizó un muestreo en cada uso de la tierra, mediante la colecta de muestras a 30 cm de profundidad, las cuales fueron analizadas para un conjunto de 29 propiedades: físicas (8), químicas (17) y biológicas (4). Los datos fueron analizados mediante ANOVA y prueba post-hoc de Tukey ($p < 0,05$) para identificar diferencias entre usos de la tierra, así como mediante un índice de calidad y puntuaciones Z para evaluar la funcionalidad del suelo. Los resultados de la caracterización inicial evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre usos, destacándose una mayor densidad de hongos y bacterias en la plantación forestal. El índice de calidad del suelo mostró que ninguno de los usos alcanzó la máxima puntuación; sin embargo, la plantación forestal fue clasificada como de alta calidad, con una puntuación de 0,8. Asimismo, se estableció un conjunto mínimo de datos (CMD) de 18 indicadores para la región. En cuanto a la funcionalidad, el cultivo agrícola presentó mayor valoración en la regulación hídrica, la plantación forestal se destacó en el ciclaje de nutrientes, y el barbecho se mantuvo en una posición intermedia en las métricas evaluadas. Se concluye que el uso de la tierra tiene una marcada incidencia sobre la calidad y funcionalidad del suelo, destacándose el desempeño de la plantación forestal. Estos resultados resaltan la importancia de un manejo silvicultural adecuado para mantener las condiciones del suelo, y aportan información de referencia para orientar procesos de gestión edáfica a escala local en la región de García Rovira.

---

[*] Trabajo de Grado

[**] Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ricardo Andrés Oviedo Celis. Magister Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Codirector: Mauricio Andres Ruiz Ochoa. Doctor en Ingeniería Recursos Hidráulicos.

Abstract

Title: Physical, chemical and biological functionality of the soil in three land uses, an analysis for García Rovira in Santander [*]

Author(s): Juan Carlos Eugenio Sánchez, Fernando Alonso Estupiñán Pinzón [**]

Key Words: Soil quality, Soil functionality; soil management, land use.

Description.

Soil is a strategic natural resource for supporting and sustaining living systems; however, anthropogenic pressures drive changes that can alter its quality and functionality. This research evaluated, using a comprehensive approach, the quality and functionality of soil under three land uses (agricultural crop, fallow, and forest plantation) in two locations in García Rovira, Santander. Sampling was carried out in each land use, collecting samples at a depth of 30 cm, which were analyzed for a set of 29 properties: physical (8), chemical (17), and biological (4). The data were analyzed using ANOVA and Tukey's post-hoc test ($p < 0.05$) to identify differences between land uses, as well as using a quality index and Z-scores to evaluate soil functionality. The results of the initial characterization showed statistically significant differences between uses, with a higher density of fungi and bacteria in the forest plantation. The soil quality index showed that none of the land uses reached the maximum score; however, the forest plantation was classified as high quality, with a score of 0.8. A minimum data set (MDS) of 18 indicators was also established for the region. Regarding functionality, agricultural land showed the highest rating for water regulation, the forest plantation stood out for nutrient cycling, and fallow land remained in an intermediate position across the evaluated metrics. It is concluded that land use has a marked impact on soil quality and functionality, with the forest plantation's performance being particularly noteworthy. These results highlight the importance of appropriate silvicultural management to maintain soil conditions and provide reference information to guide soil management processes at the local level in the García Rovira region.

---

[*] Degree Work

[**]Forestry Engineering Program. Director: Ricardo Andrés Oviedo Celis. Master's in Sustainable Development and Environment. Co-director: Mauricio Andrés Ruiz Ochoa. PhD in Hydraulic Resources Engineering

Introducción

El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes para el sostenimiento de la vida en el planeta, ya que de él dependen procesos fundamentales como la producción de alimentos, la regulación de ciclos biogeoquímicos, el almacenamiento y la purificación del agua, y el mantenimiento de la biodiversidad terrestre. Adicional a esto, el suelo igualmente es fuente para suministro de materias primas y de nutrientes esenciales para las plantas, además de cumplir funciones importantes como la regulación del clima, y en el sostenimiento de los ecosistemas (Julca-Otiniano et al., 2006).

La formación del suelo es el resultado de procesos que ocurren durante largos periodos de tiempo. Al respecto, la literatura sobre ciencia del suelo aún conserva como referente de esto los aportes documentados de Dokuchaev en 1967 y Jenny en 1941, quienes establecieron bases conceptuales sobre los factores de formación como: el clima, los organismos, el relieve y la roca madre que materializan el largo plazo de formación. En tal sentido, esta lenta velocidad de formación del suelo es la razón por la cual se le considera un recurso natural no renovable a la escala de la vida humana (FAO, 2015). No obstante, y pesar de la importancia reconocida del suelo, este recurso se encuentra sometido a presiones crecientes derivadas de actividades productivas como la agricultura, la ganadería, la extracción de recursos naturales y la expansión de las áreas urbanas, que en conjunto modifican sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo cual compromete su capacidad de aportar servicios ecosistémicos a la población humana.

El cambio de uso del suelo es reconocido como uno de los principales aspectos que inciden negativamente sobre la dinámica de nutrientes, y la funcionalidad del ecosistema edáfico (Reyes-

Palomino & Cano, 2022). Diversos estudios han documentado que la conversión de coberturas naturales, como los bosques, hacia usos agrícolas o pecuarios genera pérdidas de materia orgánica, disminución de la actividad biológica y deterioro de las propiedades físicas del suelo, tales como aumento en la densidad aparente y la perdida de estructura, situación que afecta su calidad y su capacidad productiva a largo plazo (Cherubin et al., 2016). Esta situación no es ajena en Colombia donde las transformaciones del suelo han sido igualmente documentadas en zonas rurales, de las cuales el cambio de coberturas forestales a sistemas agrícolas y ganaderos impactan de forma medible la funcionalidad físico-química del recurso (De la Rosa et al., 2023). A pesar, de que la conversión de suelos forestales hacia usos agrícolas de corta o larga rotación es una práctica extendida a nivel global, aún persisten vacíos importantes en la comprensión de sus efectos diferenciales sobre la calidad y funcionalidad del suelo, particularmente cuando se comparan usos como el forestal, el barbecho y los cultivos agrícolas permanentes (Yela-Lara et al., 2023).

Frente a esta problemática, la evaluación de la calidad y la funcionalidad del suelo mediante el uso de indicadores se ha consolidado como una herramienta metodológica clave para el diagnóstico ambiental. Se entiende que un buen indicador de calidad del suelo debe ser medible, sensible a los cambios de manejo, y capaz de reflejar las funciones y los servicios ecosistémicos que el suelo presta a la sociedad (Karlen et al., 1997). En esta misma línea, se ha planteado que los indicadores deben integrar la mayor cantidad posible de propiedades físicas, químicas y biológicas, de manera que permitan una interpretación integral del estado del recurso y no una visión parcial basada en una sola dimensión de análisis (Zornoza et al., 2015). La calidad del suelo, entendida de esta forma, no es un valor absoluto sino un concepto relativo que depende del uso que se le dé al suelo, y de la función ecosistémica que se busque priorizar; razón por la cual su evaluación integral

resulta indispensable para orientar decisiones de manejo, conservación y planificación del territorio (Bünemann et al., 2018).

En la provincia de García Rovira, departamento de Santander, se han adelantado algunos esfuerzos investigativos orientados a determinar índices de calidad del suelo en municipios de la región, los cuales han permitido un primer acercamiento a la caracterización edáfica local (Becerra et al., 2022). Sin embargo, la información disponible continúa siendo limitada, especialmente en lo referente a la funcionalidad del suelo bajo usos representativos de la dinámica productiva provincial, como las plantaciones forestales, los terrenos en barbecho posteriores a la conversión de uso agrícola y los cultivos de durazno, este último con incrementos de su extensión en municipios como Cerrito en los últimos años. Tal situación, evidencia un vacío de conocimiento que limita la toma de decisiones informadas sobre el manejo sostenible del suelo en la región, y que justifica el desarrollo de investigaciones que aporten información local, actualizada y comparable entre usos de la tierra.

En atención a lo anterior, el presente trabajo de grado busca contribuir al conocimiento de la influencia del uso del suelo sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y su relación con la funcionalidad edáfica, en tres usos de suelo (forestal, barbecho y agrícola de durazno) representativos de dos localidades del municipio de García Rovira, Santander. Los resultados derivados de esta investigación contribuyen a generar un referente técnico, y científico sobre el estado del suelo en la provincia, que sirve de insumo para futuras estrategias de manejo, conservación y toma de decisiones por parte de las comunidades, los productores y las entidades competentes en la región.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del uso de la tierra en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, en tres localidades de García Rovira, mediante análisis de campo y laboratorio, y definir su relación con la funcionalidad y calidad del suelo.

1.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas en tres usos de la tierra, mediante muestreo al azar, para conocer las particularidades edáficas en cada municipio.
2. Contrastar la calidad del suelo mediante un índice general para cada uso de la tierra, a fin de identificar indicadores relevantes que definen el estado actual del suelo.
3. Revisar la funcionalidad del suelo, a partir de su condición de calidad y los aportes ecosistémicos generados en cada área seleccionada, para establecer referentes de manejo y conservación del suelo a escala local.

2 Marco teórico

2.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

Las características fisicoquímicas y biológicas del suelo revelan los atributos que permiten si clasificación. Además, estos atributos están asociados a la respuesta que tiene el suelo cuando es objeto de procesos productivos, que igualmente lo articula a la funcionalidad del suelo y del medio ambiente. Para la comunidad científica del suelo, las propiedades que lo integran se convierten en la principal herramienta de trabajo en campo y laboratorio, lo que genera también retos sobre la forma en que se deben emplear para lograr un uso integral de la realidad del suelo (Bai et al., 2018; Bünemann et al., 2018).

Las características físicas del suelo, son la expresión del vínculo entre las fuerzas externas que actual sobre el suelo y los elementos sólidos que las soportan. Son esenciales en procesos de evaluación ante un comportamiento específico en diversos usos, como la agricultura, silvicultura y la construcción, donde características como la textura y densidad han logrado un entendimiento no solo físico sino funcional del suelo cuando son empleadas (Guerra, 2014). Otro aspecto para destacar de las propiedades físicas es la capacidad de interactuar con las químicas y biológicas. En este sentido, la fracción sólida es el soporte donde las químicas y los microrganismos tiene un habitad inicial de interacción que hace posible la dinámica interna del suelo. Lo antes mencionado, expresa la relación directa entre la naturaleza de las partículas del suelo, y la capacidad de retención de agua y nutrientes un factor que actualmente aún es motivo de estudios a escalas diferentes (Armas, 2012).

Las características químicas del suelo han sido vinculadas en su mayoría con la fertilidad y la sostenibilidad de los sistemas de producción que sustenta un suelo. El potencial de hidrógeno, es quizá el más común entre científicos y comunidades campesinas, para quienes se ha convertido

en un referente de acidez o alcalinidad. Otra propiedad química relevante es la capacidad de intercambio catiónico (CIC) la cual expresa la carga negativa del suelo (Saavedra-Mora et al., 2019).

Asimismo, la concentración y el equilibrio de macronutrientes y micronutrientes son factores decisivos para la productividad agrícola y la salud del suelo (Moreno Páez, 2021; Arteaga, 2016). Los aspectos antes mencionados sobre la fertilidad del suelo, no serían posibles si se omite el análisis de la roca madre, que se convierte en la expresión inicial de los minerales y por ende los nutrientes en la interfaz suelo – planta (López de Rojas & Pérez de Roberti, 1990).

Las propiedades biológicas "guardan relación con la compleja red de organismos que alberga y que pueden influir en la evolución del suelo y sus propiedades físicas y químicas" (Casas, 2012). Según la investigación científica, "los microorganismos presentes en el suelo son factores clave en los ciclos de la mayoría de los nutrientes, especialmente en el ciclo del carbono, nitrógeno, azufre y fósforo" (Widmer et al., 2001). Son el conjunto de propiedades que menor integración tiene en estudios del suelo, situación que ha motivado a la comunidad científica hacia promover su uso, esto a pesar, de factores como costos y la infraestructura especializada que es requerida y de la cual no se tiene disponibilidad en la mayor de países o entidades.

2.1.1 Dinámica de descomposición de acículas y acidificación del suelo en Pinus patula

La descomposición de las acículas de *Pinus patula* constituye un proceso importante en la dinámica de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes de los ecosistemas forestales. Una vez que las acículas caen al suelo, experimentan transformaciones físicas, químicas y biológicas que dependen de la temperatura, la humedad, la composición química del material vegetal y la actividad de los microorganismos descomponedores. Berg (2014) explica que la descomposición

de las acículas de pino ocurre en diferentes etapas y que su velocidad está condicionada por la composición del material, especialmente por sus contenidos de nitrógeno, lignina y otros compuestos orgánicos.

La acumulación de acículas sobre la superficie puede favorecer la acidificación del suelo mediante la liberación de compuestos orgánicos durante su descomposición, la transformación de nutrientes y los procesos de lixiviación. Estos mecanismos pueden contribuir a la disminución del pH y a la reducción de la disponibilidad de algunos nutrientes básicos, como calcio y magnesio. En una plantación de *Pinus patula* en la provincia de Mpumalanga, Sudáfrica, se identificó que la acumulación de hojarasca podía representar un problema para la productividad forestal debido a la liberación de ácidos orgánicos, la modificación de la infiltración del agua y la inmovilización de nutrientes (Applied Soil Ecology, 2002).

2.2 Usos del suelo

2.2.1 Suelo forestal

Se identifica como suelo forestal, aquel donde se desarrollan actividades propias de la silvicultura de plantaciones o sistemas agroforestales. Además, de los suelos que debido a procesos naturales dan soporte a ecosistemas forestales como bosques. La textura del suelo juega un papel fundamental en el desarrollo de plantaciones forestales. Los suelos con texturas francas son ideales para el establecimiento de especies forestales. Según Riestra et al. (2012), "estos suelos son adecuados para soportar el desarrollo de especies forestales debido a que poseen suficientes reservas de carbono y mejoran ciertas propiedades físicas como la densidad aparente". La densidad aparente es un indicador crítico para el desarrollo radicular en plantaciones forestales. Según Rubio

Gutiérrez (2010), los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces. Mora-Chacón et al. (2019) reportaron que, en suelos forestales, la densidad aparente promedio fue de 0.98±0.18 g/cm³, encontrándose los valores más bajos en zonas de bosque (0.94±0.17) comparado con áreas agrícolas

El pH óptimo para la mayoría de plantaciones forestales oscila entre 6,0 y 7,5. Según Prasad y Power (1997), el pH óptimo de los suelos debe variar entre 6,5 y 7,0 para obtener los mejores rendimientos, ya que en este rango los nutrientes son más fácilmente asimilables. La materia orgánica es fundamental para la fertilidad de los suelos forestales. Según Julca-Otiniano et al. (2006), la materia orgánica del suelo contiene cerca del 5% de N total, pero también contiene otros elementos esenciales como fósforo y magnesio.

Los nutrientes primarios son fundamentales para las plantaciones forestales. Según Camacho et al. (2024), la demanda de nutrientes NPK en plantaciones forestales presenta una relación de N>K>P. El contenido de materia orgánica en terrenos forestales puede alcanzar más del 7-8%, en comparación con el 1-3% en suelos agrícolas. Cedeño et al. (2022) encontraron que el suelo forestal contiene más del doble de materia orgánica (30,00%) comparado con suelos agrícolas.

2.2.2 Suelo agrícola

Los suelos denominados cómo agrícolas, son aquellos destinados a la producción de alimentos, en ciclos productivos de rotación corta o larga. En tal sentido, se ha documentado que en su gran mayoría los actuales suelos agrícolas, previamente fueron suelos forestales que sostenían bosques. Este es quizá, uno de los grandes problemas que sectores como el ambiental enfrenta a nivel global, y que ha causado afectaciones en los recursos naturales implicados en la cadena de producción alimentaria (Yela-Lara et al., 2023). El duraznero presenta una gran

capacidad de adaptación a una variedad amplia de texturas de suelo. Según Agrotendencia (2025), los suelos ideales deben ser sueltos, con buen drenaje, de texturas francos, francos arenosos o francos arcillosos, franco arcillo arenosos.

Para estos suelos, los estudios físicos se basan en gran medida en análisis de la densidad aparente, catalogada como un indicador crítico para el desarrollo radicular del duraznero. Al respecto, García-Gallegos et al. (2020) reportaron un rango de 1,1 a 1,2 g/cm3 lo que contradice el patrón normal de compactación que le es atribuido a estos cultivos. Sierra et al. (2011) indican que suelos bajo cultivos de duraznero desarrollan sus raíces en forma superficial y penetran de 30 a 38 cm de profundidad, aunque el mayor desarrollo del sistema radicular se genera a 10 cm de profundidad bajo el diámetro de la copa del árbol. Lo anterior, puede ser un aspecto para detallar en el contexto de la propuesta y la funcionalidad que se busca evaluar.

El duraznero es muy sensible a las condiciones asfixiantes del suelo. Gratacós (2011) enfatiza que no se comporta bien en suelos arcillosos, compactos y con humedad excesiva. Es fundamental evitar los encharcamientos de agua. El pH óptimo para el duraznero presenta un rango específico bien definido. Los requerimientos de pH para el duraznero van en un rango entre 6 a 7,5. West Analítica (2023) especifica que las mejores condiciones de desarrollo se obtienen en límites ligeramente ácidos, es decir de 6.0 a 6.5.

Callejas et al. (2011) confirman que el duraznero se desarrolla en forma óptima en el rango de pH entre 6,0 a 7,5, mientras que el documento de Tamaulipas (2019) amplía ligeramente este rango a pH de 6 a 8. Flores-Román et al. (2011) reportaron que, en estudios con durazno, el carbono orgánico aumentó con la aplicación de enmiendas orgánicas. La materia orgánica es fundamental para mejorar las características físicas del suelo: La densidad aparente del suelo tiene relación directa con su contenido de materia orgánica.

2.3 Funcionalidad del suelo

El suelo es un sistema abierto y dinámico, por tanto, su estudio debe completar el conjunto de procesos que acontecen en su interior (Sirishantha et al., 2023). Las funciones del suelo, corresponde a la expresión de los servicios ecosistémicos aportados para el beneficio de las comunidades. En tal sentido, todo aquello que el suelo aporta no solo debe ser objeto de reconocimiento, sino por el contrario, también requiere ser estudiado.

La multifuncionalidad del suelo se mide principalmente a través de la selección y evaluación de un conjunto de indicadores que reflejan las múltiples funciones y servicios que el suelo puede desempeñar. Estos indicadores integran propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y se relacionan con funciones como la productividad agrícola, la regulación del ciclo hidrológico, la captura de carbono, y el mantenimiento de la biodiversidad, entre otras (Carter et al., 1997; Andrews y Carroll, 2001).

Los estudios sobre funcionalidad del suelo, tienen mayor cobertura en usos del suelo agrícolas entre investigadores. No obstante, con el paso de los años la comunidad científica ha dado inicio a nuevos estudios que buscan explorar las funciones del suelo en otros contextos (Narváez-Ortiz et al., 2015). En el contexto forestal, comprender las funciones del suelo genera no solo informaciones para el sector, también permite que los bosques sean reconocidos y conservados desde lo servicios del ecosistema, articulados al medio físico natural que lo soporta.

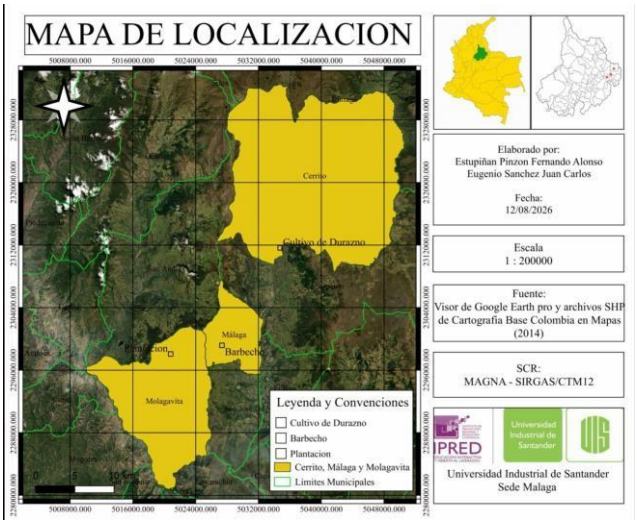
3 Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio fue desarrollado en los municipios de Málaga, Molagavita y Cerrito pertenecientes a la provincia de García Rovira departamento de Santander. Para la evaluación de la funcionalidad del suelo, fueron seleccionadas tres sitios de estudio así: en Molagavita, una plantación forestal de *Pinus patula* localizada en Lat 6.697877, Long-72.811960 sobre 2.473 m

s.n.m cuyo historial de establecimiento data de 5 años, establecida en terrenos con problemas de erosión y donde se han llevado a cabo labores silviculturales como podas de formación. En Málaga, se evaluó un área con 14 años de barbecho localizada a Lat 6.707752, Long-72.753095 sobre 2.654 m s.n.m, del cual por informaciones locales se conoce que fue un terreno destinado a agricultura de maíz durante 20 años. Y para el municipio de Cerrito, el sitio de estudio correspondió a un cultivo tecnificado de durazno *Prunus persica* localizado a Lat 6.820511, Long-72.685649 y 2.620 m s.n.m establecido hace 9 años, del cual, se conoce que su establecimiento estuvo precedido de un proceso de conversion de bosque a cultivo de ajo **Figura 1**

Figura 1.
Localización área de estudio



3.2 Análisis propiedades del suelo por municipio y uso de la tierra

Para el análisis de propiedades físicas, químicas y biológicas de los tres usos de la tierra, se implementó un muestreo al azar como se describe a continuación: *i)* se estableció una parcela transitoria de 100 m² por cada uso de suelo, garantizando homogeneidad en el relieve para aislar el efecto de la topografía. *ii)* cada parcela, fue dividida en subunidades de muestreo de 1 x 1 m, *iii)* dentro de cada parcela, se seleccionaron aleatoriamente 6 unidades de 1 m² (intensidad del 6%), número determinado para capturar la variabilidad local de las propiedades físico-químicas y

biológicas, donde se procedió a la extracción de suelo a una profundidad de 30 cm. El método de muestreo propuesto, permitió obtener 6 muestras por sitio de estudio, para un total de 18 muestras donde se analizaron las propiedades referidas en la ***(Tabla 1)***. El manejo de las muestras desde su colecta, hasta la entrega al laboratorio para los análisis químicos y biológicos se realizó según los protocolos de (Gelvez et al., 2020). En el caso de las propiedades físicas, los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio donde actualmente la UIS realiza sus actividades académicas, y las químicas y biológicas con entidades como UIS sede central y IGAC.

Tabla 1.

Conjunto de propiedades químicas, físicas y biológicas seleccionadas para evaluacion de calidad del suelo

Propiedad	Unidad	Clasificación
Carbono	% (porcentaje)	Química
Materia orgánica	% (porcentaje)	Química
Potencial de hidrógeno	Sin unidad	Química
Fósforo (P) disponible (Bray II)	mg/kg (miligramos/kg)	Química
Cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na)	cmol (+) / kg	Química
Acidez intercambiable	cmol (+) / kg	Química
Conductividad eléctrica	dS/m	Química
Capacidad Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)	cmol (+) / kg	Química
Boro	ppm	Química
Fe	ppm	Química

Mn	ppm	Química
Cu	ppm	Química
Zn	ppm	Química
S	ppm	Química
Ca/Mg	cmol (+) / kg	Química
Ca/K	cmol (+) / kg	Química
Mg/K	cmol (+) / kg	Química
Ca+Mg/K	cmol (+) / kg	Química
Textura (A-L-Ar)	%	Física
Densidad aparente	kg/m³	Física
Densidad real	g/cm³ o kg/m³	Física
Porosidad total	%	Física
Humedad gravimétrica	%	Física
Velocidad de infiltración	cm/h o mm/h	Física
Hongos	UFC/ conteo en placa	Biológica
Pseudomonas Fluorescentes	UFC/conteo en placa	Biológicas
Abundancia de lombrices	Individuo/und área	Biológica

3.3 Estimación índice sintético de calidad del suelo

La calidad del suelo, se estimó mediante la metodología propuesta por (Velásquez, 2017). Este índice, segmenta la calidad del suelo por propiedades físicas, químicas y biológicas, aspecto concordante con el alcance de la propuesta y el muestro de suelo previamente descrito. Inicialmente fue conformado el conjunto mínimo de datos (CMD) mediante ACP para cada conjunto de propiedades. De este análisis, se estimaron las contribuciones y valores propios del conjunto inicial de propiedades. Luego, se procedió con la estimación del umbral, valor que sirvió para seleccionar las propiedades que se convertirían en indicadores de la calidad. Paso seguido, se realizó la normalización implementada bajo el criterio *más es mejor* y *menos es mejor*, que unifico los indicadores en un rango de 0.0 a 1.0. Posterior a esto, se realizó una nueva transformación de variables mediante un PCA, y con base en esto, estimar los subíndices para cada conjunto de propiedades que oscilaron entre 1.0 a 3.0. Finalmente, conformar índice sintético de calidad para cada uso de la tierra como lo expresa la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Índice sintético de calidad del suelo

$$IGCS = Biológicas\ X_b + Químicas\ X_q + Físicas\ X_f$$

Dónde:

X_b = Coeficiente obtenido del PCA – Valores de inercia para propiedades biológicas

X_q = Coeficiente obtenido del PCA – Valores de inercia para propiedades químicas

X_f = Coeficiente obtenido del PCA – Valores de inercia para propiedades físicas

La calidad del suelo para cada sitio se determinó a partir de la fórmula del IGCS, procedimiento que consiste en multiplicar el valor de cada subindicador por el coeficiente obtenido en la fórmula y, finalmente, sumar y reducir todos los productos para cada sitio. La categorización de la calidad del suelo tendrá como base los siguientes rangos: 0.1 a 0.2 muy baja, 0.2 a 0.4 baja, 0.4 a 0.6 media, 0.6 a 0.8 alta y 0.8 a 1.0 muy alta.

3.4 Estimación funcionalidad del suelo.

La funcionalidad de cada uso del suelo se determinó como lo propone (Wagg et al., 2014). Estos autores plantean inicialmente definir el conjunto, que para el estudio correspondieron a funciones agrupadas según las propiedades analizadas en el producto 1 y 2. En este caso las funciones del suelo fueron agrupadas como se indica en la ***(Tabla 2)***

Tabla 2.
Agrupación propiedades del suelo por funciones

Componente	Función del suelo	Propiedades asociadas
Físico	Estructura del suelo	Densidad aparente Densidad real Porosidad total
	Regulación hídrica	Velocidad de infiltración

		Humedad gravimétrica
	Granulometría	Arena Limo Arcilla
Químico	Disponibilidad de nutrientes	Capacidad de intercambio catiónico Potencial de hidrógeno Conductividad eléctrica
	Sumidero de carbono	Materia orgánica Carbono orgánico
	Acervo de macronutrientes	Nitrógeno total, Fósforo, Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio.
	Acervo de micronutrientes	Boro, Hierro, Zinc, Manganeso, Cobre
	Relaciones catiónicas	Relación Calcio/Magnesio Relación Calcio/Potasio.
Biológicas	Ciclaje de nutrientes	Densidad de hongos Densidad de bacterias
	Biota edáfica	Edafofauna Lombrices

Para cada conjunto de funciones, se procedió a estimar la puntuación Z de cada propiedad. En este caso, no los análisis incluyeron las 29 propiedades iniciales. Los valores Z obtenidos según la ***Ecuación 2***, tuvieron un rango de -3 a 3, que para el caso del proyecto fue asumido como un óptimo de la función si la tendencia se presenta hacia 3. El procedimiento de puntuación Z, busco homogenizar las propiedades del suelo, para de esta forma integrarlas de forma coherente al análisis de funcionalidad.

Ecuación 2. Estimación puntuación Z

$$Score\ Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde

X = valor estimado de la propiedad en laboratorio

μ = Media del conjunto de datos de la propiedad del suelo
σ = Desviación estándar del conjunto de datos de la propiedad del suelo

4 Resultados

4.1 Caracterización física, química y biológica usos del suelo

El análisis de varianza mediante ANOVA de un factor reveló diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en el 75 % de las variables físicas evaluadas. Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey permitieron identificar los usos del suelo entre los cuales se presentaron estas diferencias ***(Tabla 3)***. La fracción de limo fue la única propiedad que mostró diferencias significativas entre los tres usos del suelo evaluados. En el suelo destinado a la agricultura se observaron diferencias en la densidad aparente y la porosidad total, mientras que, en el barbecho, la humedad gravimétrica fue otra de las propiedades que presentó diferencias significativas. Por su parte, el suelo bajo plantación forestal se diferenció respecto a la velocidad de infiltración y el contenido de arena. Finalmente, la densidad real y la fracción de arcilla no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los usos del suelo evaluados.

Tabla 3.

Diferencias en las propiedades físicas del suelo entre usos del suelo según el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey

Variable	Uso del suelo		
	Agrícola	Barbecho	Plantación
Da (g/cm^3)	1,63 ± 0,17 a	1,14 ± 0,09 b	1,17 ± 0,07 b
Dr (g/cm^3)	2,59 ± 0,05 a	2,54 ± 0,08 a	2,52 ± 0,06 a
Pt (%)	49,33 ± 2,66 b	57,00 ± 5,25 a	55,17 ± 5,08 a

HG (%)	15,67 ± 4,50 b	22,83 ± 5,71 a	12,17 ± 2,14 b
In (mm/h)	166,00 ± 31,69 a	154,51 ± 5,95 a	106,72 ± 4,06 b
A (%)	50,83 ± 2,32 b	52,33 ± 5,24 b	67,17 ± 5,15 a
L (%)	39,67 ± 2,58 a	28,00 ± 2,53 b	19,67 ± 1,63 c
Ar (%)	14,00 ± 2,61 b	23,33 ± 5,47 a	17,67 ± 3,44 ab

Nota: ANOVA y Test de Tukey evaluados con significancia (P<0.05). Letras iguales no representan diferencias estadísticas entre usos del suelo de la propiedad.

Para el conjunto de propiedades químicas, el análisis de varianza reveló un mayor número de diferencias estadísticamente significativas entre los usos del suelo. Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey permitieron identificar diferencias significativas ($p < 0.05$) en un subconjunto de cuatro propiedades relacionadas con elementos menores entre los usos agrícola, barbecho y plantación forestal. Este comportamiento también se observó para calcio, potasio y la relación calcio/magnesio ***(Tabla 4).*** Por otra parte, el potencial de hidrógeno, el zinc y la concentración de sales presentaron diferencias significativas asociadas al uso agrícola, mientras que el fósforo, boro, magnesio y la capacidad de intercambio catiónico mostraron diferencias entre el barbecho y la plantación forestal ***(Tabla 4).***

Tabla 4

Diferencias en las propiedades químicas del suelo entre usos del suelo según el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey.

Variable	**Uso del suelo**		
	Agrícola	**Barbecho**	**Plantación**
pH (und)	5.71 ± 0.47 a	4.89 ± 0.24 b	4.89 ± 0.13 b
C (%)	2.62 ± 0.26 a	2.92 ± 0.52 a	2.80 ± 0.39 a
P (ppm)	322.25 ± 68.76 b	28.23 ± 11.34 a	398.44 ± 130.69 b
Ca (meq/100g)	5.34 ± 0.60 a	3.54 ± 0.70 b	1.25 ± 0.19 c

Mg (meq/100g)	0.91 ± 0.10 a	0.78 ± 0.15 a	0.17 ± 0.02 b
Na (meq/100g)	0.38 ± 0.42 a	0.10 ± 0.02 a	0.07 ± 0.01 a
K (meq/100g)	1.37 ± 0.15 a	0.33 ± 0.06 b	0.14 ± 0.02 c
B (ppm)	0.35 ± 0.06 a	0.14 ± 0.04 b	0.04 ± 0.01 c
Fe (ppm)	184.03 ± 34.79 a	117.66 ± 41.33 b	33.06 ± 9.37 c
Mn (ppm)	7.28 ± 1.27 a	4.90 ± 1.72 b	2.08 ± 0.70 c
Cu (ppm)	2.60 ± 0.49 a	0.35 ± 0.12 b	0.25 ± 0.07 b
Zn (ppm)	6.37 ± 1.20 a	0.41 ± 0.14 b	0.41 ± 0.11 b
CE (mmho/cm)	0.14 ± 0.02 a	0.05 ± 0.01 b	0.04 ± 0.01 b
MO (%)	3.89 ± 0.39 a	5.03 ± 0.90 b	4.84 ± 0.67 ab
CICE (meq/100g)	7.93 ± 0.89 a	6.95 ± 1.39 a	4.51 ± 0.70 b
Rel Ca/Mg(meq/100g)	6.04 ± 0.68 a	5.38 ± 1.58 a	9.49 ± 1.47 b
Rel Ca/K (meq/100g)	4.23 ± 0.58 a	11.22 ± 0.58 b	9.00 ± 0.99 c

Nota: ANOVA y Test de Tukey evaluados con significancia (P<0.05). Letras iguales no representan diferencias estadísticas entre usos del suelo de la propiedad.

Los resultados del análisis de las propiedades biológicas destacan al suelo forestal como estadísticamente diferente en relación con la densidad de los grupos microbianos evaluados, particularmente hongos y bacterias. Por su parte, las propiedades asociadas con organismos de mayor tamaño corporal, como insectos y lombrices, mostraron diferencias significativas entre los tres usos del suelo evaluados en el área de estudio, de acuerdo con el ANOVA. Las comparaciones posteriores permitieron establecer que estas diferencias se presentaron principalmente entre el suelo forestal y los usos agrícolas, evidenciando una respuesta diferenciada de las comunidades de organismos edáficos frente al cambio de uso del suelo.

Tabla 5.

Diferencias en las propiedades biológicas del suelo entre usos del suelo según el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey.

Variable	**Uso del suelo**

	Agrícola	Barbecho	Forestal
Hongos UFC/g	2.76x10^6 ± 2.01 x10^4 **b**	4.97 x10^6 ± 7.13 x10^5 **b**	2.10x10^5 ± 2.48x10^4 **a**
Bacterias UFC/g	1.56x10^7 ± 7.49x10^4**a**	2.37x10^7 ± 1.20x10^6 **a**	2.88x10^6 ± 3.94x10^5 **b**
Edafofauna (Ind/cm^3)	1.33 ± 0.82 **c**	4.17 ± 0.75 **b**	11.67 ± 1.63 **a**
Lombrices (Ind/cm^3)	1.33 ± 0.82 **c**	3.17 ± 0.41 **b**	5.50 ± 0.84 **a**

Nota: ANOVA y Test de Tukey evaluados con significancia (P<0.05). Letras iguales no representan diferencias estadísticas entre usos del suelo de la propiedad

4.2 Evaluación de la calidad del suelo por contexto de estudio

La evaluación de calidad del suelo para los tres usos del suelo se presenta de forma segmentada con detalle en pasos fundamentales que permitieron su cuantificación. El análisis inicial de componentes principales (ACP) aplicado en cada grupo de propiedades, mostro una selección del 62% del total de propiedades integradas al estudio ***(Tabla 6)***. De las físicas, un 75% de las propiedades obtuvieron valores iguales o superiores al umbral (14.77), y crearon el nuevo subconjunto de indicadores de la calidad del suelo donde solo la porosidad y la humedad gravimétrica fueron descartados. Para las químicas, el subconjunto de indicadores estuvo conformo por el 64% de las propiedades iniciales, donde la presencia de elementos mayores y menores, y las relaciones de base sobresalieron por contribuciones iguales o mayores respecto del umbral estimado (8.39). Por último, las propiedades biológicas mostraron la más baja participació

al incluir como indicador solo la densidad de bacterias que represento un 25% ***(Tabla 6)***. De esta forma, se conformó un conjunto mínimo de datos (CMD) de 18 indicadores, a partir de los cuales se construyo la parte dos del indicador de calidad.

Tabla 6.

Contribución por componentes principales propiedades físicas, químicas y biológicas para usos

del suelo analizados.

Propiedad	CP1	CP2	Umbral
A	3.853	***29.466***	**14.733**
L	***21.973***	2.388	
Ar	9.419	***22.284***	
Da	***16.966***	3.1247	
Dr	***16.049***	2.3902	
Pt	14.256	10.029	
HG	3.305	13.959	
In	14.175	***16.3552***	
P	0.057	***12.00***	**8.36**
Ca	***8.632***	1.68	
Mg	6.669	7.06	
Na	2.017	2.08	
K	***8.818***	1.52	
B	***9.210***	0.00	
Fe	***8.434***	2.72	
Mn	8.174	2.82	
Cu	***8.423***	2.43	
Zn	8.153	3.36	
pH	6.293	1.00	
CE	***8.505***	1.22	
CICE	7.025	7.43	
C	0.001	***15.54***	
MO	1.052	***16.72***	
Rel/CaMg	2.966	***12.41***	
Rel/CaK	5.570	***10.01***	
Hongos	28.86	1.657	**40.33**
Bacterias	15.536	***80.669***	
Edafofauna	29.381	2.473	
Lombrices	26.2165	15.199	

La estimación de coeficientes, revelo los pesos de cada indicador dentro de su grupo para conformar la ***(Ecuación 3).*** Este resultado, corresponde a la expresión matemática que genera las métricas específicas para el contexto de estudio, y se convierte en un referente de cuantificación donde la secuencia de pesos fue: *>físicas, > químicas, > biológicas*.

Ecuación 3. Ecuación calidad del suelo contexto de estudio

$$\boldsymbol{IGCS} = Físicas * (3.0) + Químicas * (2.8) + Biológicas * (2.2)$$

Al aplicar la ***(Ecuación 3),*** se obtuvieron las métricas del IGCS que se presentan en la

(Tabla 7). En esta sección se compila la información del procesamiento final de datos, donde la normalización para lograr valores entre 0.0 y 1.0 fue fundamental. En el uso agrícola se observó una tendencia hacia valores cercanos a 0.0, con un máximo de 0.37. Por su parte, el barbecho mostró un patrón de valores superiores, que oscilaron entre 0.46 y 0.67. Para la plantación forestal, los resultados revelaron igualmente una variación en las métricas estimadas, las cuales se concentraron en un rango de 0.64 a 1.0, siendo el único uso del suelo donde el óptimo fue alcanzado para las réplicas que conformaron la muestra evaluada ***(Tabla 7).***

Tabla 7.
Cuantificación índice general calidad para usos del suelo analizados

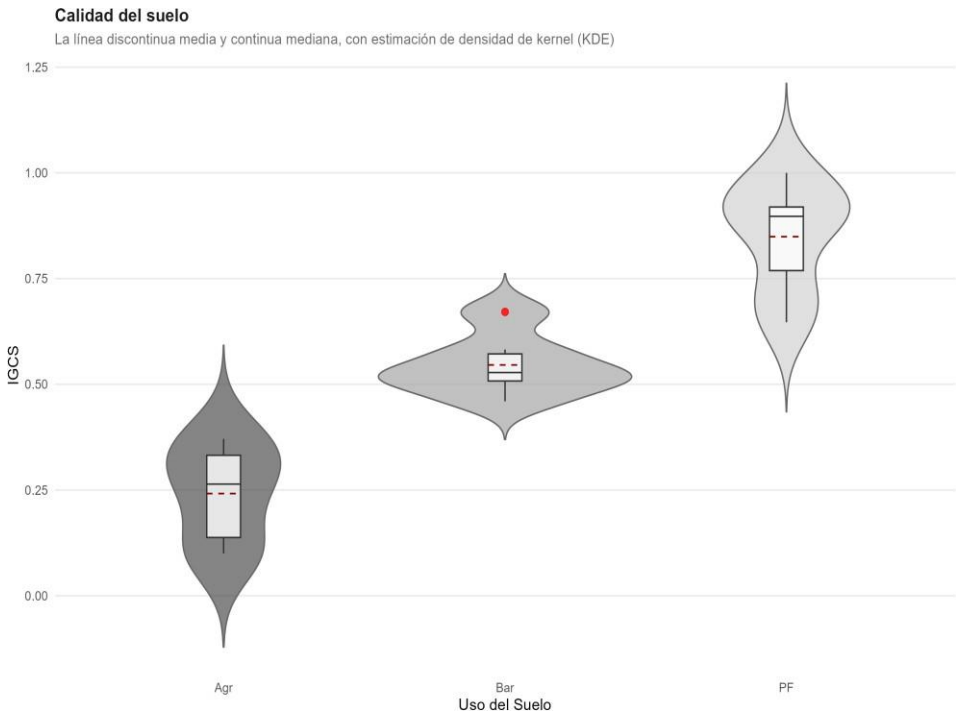
Uso del suelo	F	Q	B	I_F	I_Q	I_B	IGSC preliminar	IGCS Nor
Agr	0.150	0.303	0.675	0.454	0.849	1.477	2.780	0.290
Agr	0.106	0.358	0.310	0.322	1.003	0.679	2.004	0.104
Agr	0.100	0.370	0.297	0.302	1.035	0.650	1.987	0.100
Agr	0.314	0.366	0.271	0.948	1.023	0.594	2.565	0.238
Agr	0.400	0.350	0.380	1.207	0.978	0.831	3.017	0.346
Agr	0.488	0.370	0.279	1.474	1.034	0.611	3.119	0.371
Bar	0.450	0.450	0.400	1.358	1.258	0.875	3.491	0.460
Bar	0.610	0.330	0.420	1.841	0.922	0.918	3.682	0.505
Bar	0.650	0.450	0.230	1.962	1.258	0.503	3.723	0.515
Bar	0.720	0.350	0.310	2.173	0.978	0.678	3.829	0.541
Bar	0.810	0.370	0.410	2.445	1.034	0.897	4.376	0.671
Bar	0.950	0.250	0.200	2.867	0.699	0.437	4.003	0.582
PF	0.610	0.800	0.590	1.841	2.236	1.290	5.367	0.908
PF	0.590	0.820	0.620	1.781	2.292	1.356	5.428	0.923
PF	0.620	0.950	0.560	1.871	2.655	1.225	5.751	1.000
PF	0.640	0.750	0.570	1.932	2.096	1.246	5.274	0.886
PF	0.460	0.680	0.450	1.388	1.901	0.984	4.273	0.647
PF	0.380	0.750	0.630	1.147	2.096	1.378	4.621	0.730

Los diagramas de violín y de caja (boxplot) del IGCS mostraron un patrón de calidad diferenciado entre los usos del suelo ***(Figura 2)***. La cuantificación final reveló que la plantación forestal obtuvo la media más alta del IGCS, equivalente a 0.8, seguida por el barbecho con 0.5 y, finalmente, el cultivo con 0.3. En ningún caso se logró el óptimo de calidad; no obstante, la escala de rangos definidos clasifica a la plantación en calidad alta, al barbecho en media, y al cultivo en

baja. En este mismo sentido, la dispersión de los diagramas reveló tendencias más homogéneas en los valores de la plantación y del cultivo. Sin embargo, en la plantación forestal los valores más altos de calidad no superaron la media, al contrario de lo observado en el barbecho, donde los valores de menor calidad fueron mayoritarios, lo que define la tendencia registrada.

Figura 2.

Diagrama de violín y boxplot para IGCS por uso del suelo. Estimación área de densidad por el método matemático Kernel.



4.3 Funcionalidad del suelo por contexto de uso

El análisis de *Z-score* para la funcionalidad física de los usos del suelo reveló patrones diferenciados entre las funciones establecidas ***(Figura 3).*** La estructura del suelo fue mejor en el cultivo; no obstante, los valores reportados para el barbecho y la plantación mostraron cercanía respecto de sus medias. Respecto de la regulación hídrica, esta mostró un mayor grado de variación, y la plantación forestal obtuvo los valores más bajos; sin embargo, la marcada dispersión de los valores en el cultivo se asume como un aspecto que incide en el resultado obtenido.

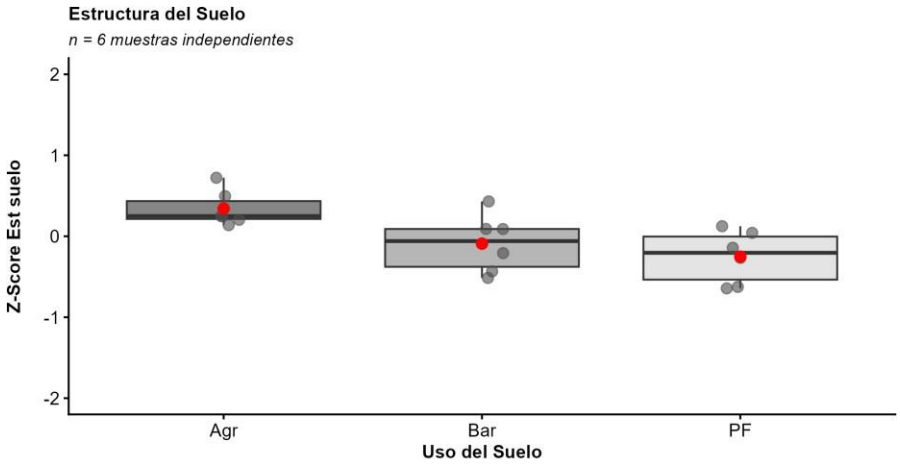
Finalmente, la granulometría fue la única función donde los tres usos del suelo presentaron igualdad.

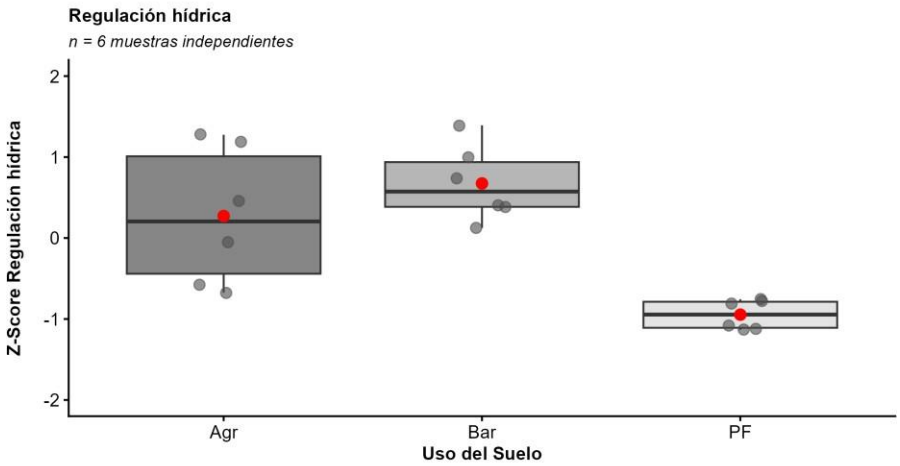
La funcionalidad química mostró una mayor diferenciación entre los usos del suelo respecto del patrón físico previamente referido; no obstante, en ningún caso las categorías definidas alcanzaron el límite superior de 3 ***(Figura 4)***. La función disponibilidad de nutrientes permitió diferenciar ampliamente los usos agrícolas, mientras que la plantación forestal presentó la menor valoración. Esta tendencia se mantuvo para las funciones asociadas con el acervo de macro y micronutrientes. Por su parte, la función sumidero de carbono mostró al barbecho y a la plantación forestal como los usos con mayor potencial para su promoción. Finalmente, las relaciones catiónicas, particularmente las asociadas con Mg y K, revelaron una mejor funcionalidad en la plantación forestal.

El análisis de las funciones biológicas mostró a la plantación forestal como un uso del suelo que favorece en mayor medida este conjunto de dinámicas ***(Figura 5)***. De manera particular, la plantación presentó una valoración considerablemente superior para la función asociada con la biota edáfica, mientras que los restantes usos registraron valores medios inferiores a cero. Para la función de ciclaje de nutrientes, asociada con la descomposición de la materia orgánica, el barbecho y la plantación forestal se destacaron como los usos que presentaron mayor potencial para su promoción.

Figura 3.

Funcionalidad física de usos del suelo para el contexto de estudio. Valores estimados como Z-Core a partir de $\bar{x}$ *y* σ. |


Estructura del Suelo
n = 6 muestras independientes
Z-Score Est suelo
2
1
0
-1
-2
Agr
Bar
PF
Uso del Suelo


Regulación hídrica
n = 6 muestras independientes
Z-Score Regulación hídrica
2
1
0
-1
-2
Agr
Bar
PF
Uso del Suelo

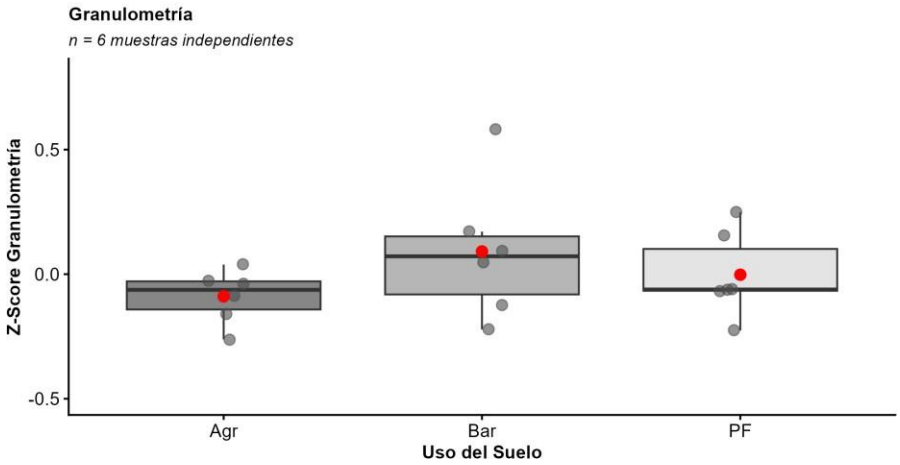

Granulometría
n = 6 muestras independientes
Z-Score Granulometría
0.5
0.0
-0.5
Agr
Bar
PF
Uso del Suelo

Figura 4.

Funcionalidad química de usos del suelo para el contexto de estudio. Valores estimados como Z-Core a partir de $\bar{x}$ *y*

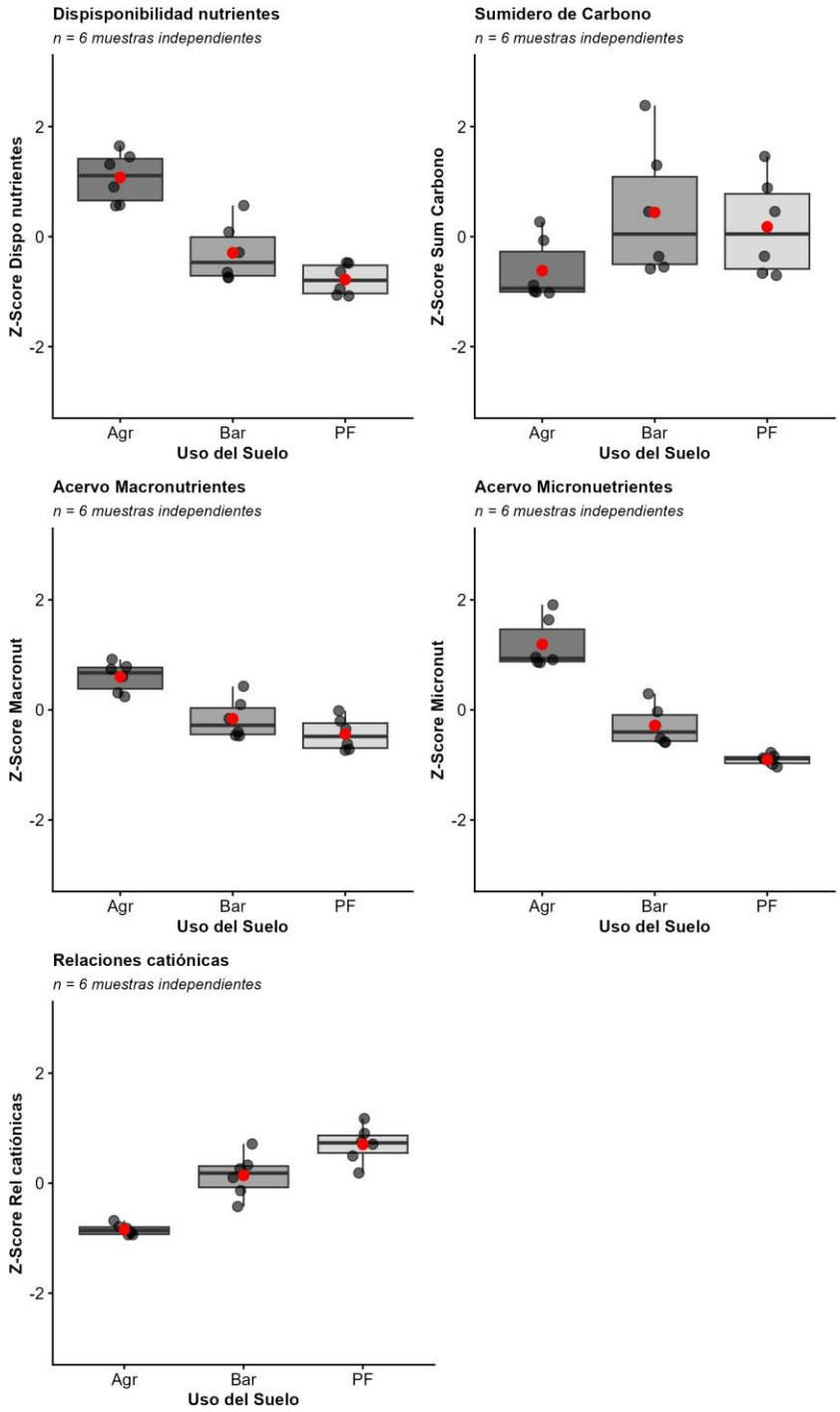
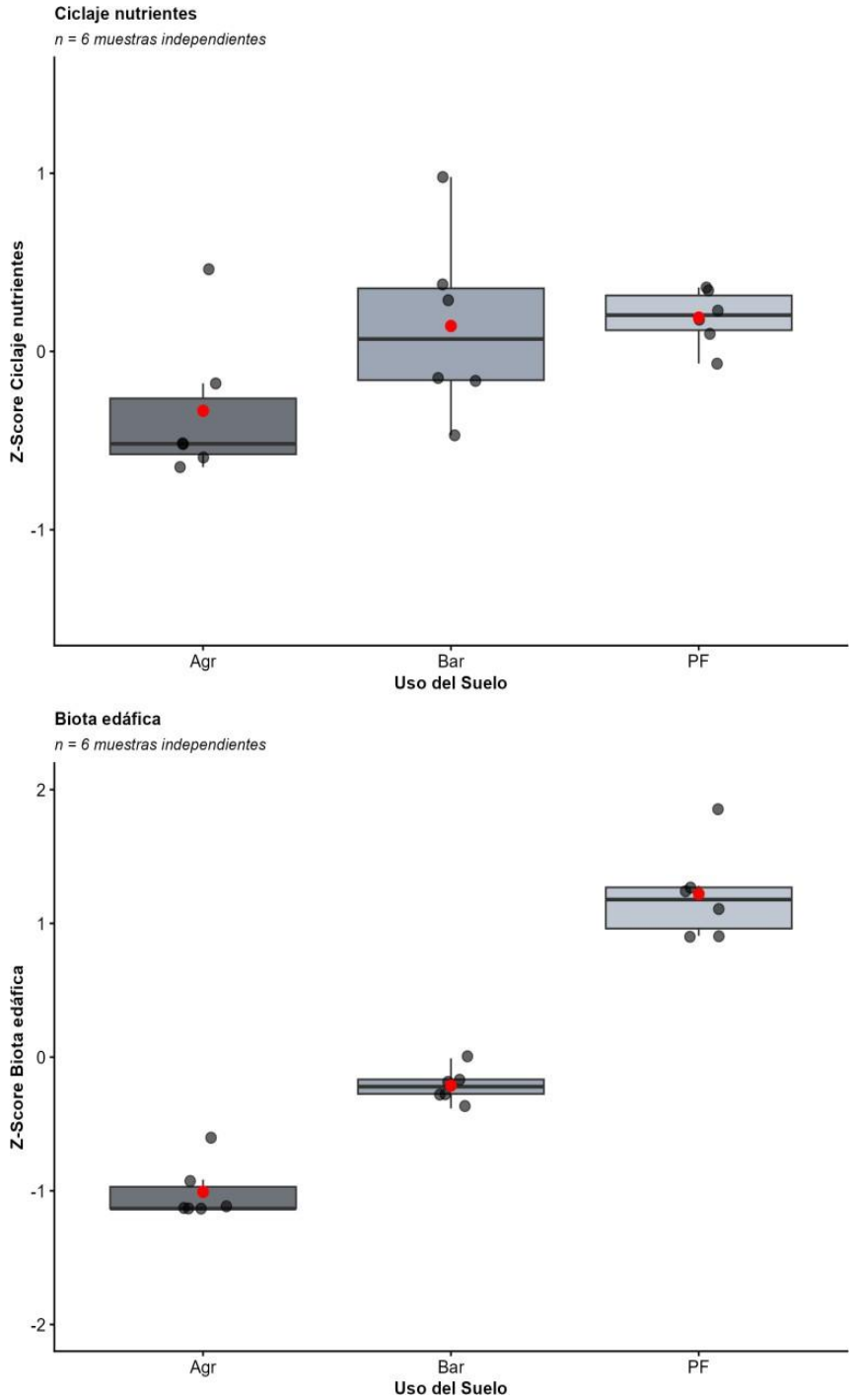


Figura 5.

Funcionalidad biológica de usos del suelo para el contexto de estudio. Valores estimados como Z-Core a partir de $\bar{x}$ y σ



5 Discusión

El estudio del suelo requiere de abordajes integrales, enfocados en reducir las brechas de información sobre los procesos y funciones que este estratégico recurso natural lleva a cabo. El actual contexto de presión y transformación del paisaje natural por actividades antrópicas, coloca en riesgo la estabilidad del suelo, por tanto, es necesario desarrollar exploraciones a escala local sobre estos aspectos. La caracterización inicial de propiedades físicas, químicas y biológicas para los tres usos del suelo, ha sido una herramienta metodológica y estadística de amplio uso en la ciencia del suelo, y como lo evidencian los resultados, el manejo implementado incidió sobre estos atributos en función de los tiempos y tipo de cobertura implementada (Bejar & Luna, 2025). La diferencia hallada para la densidad aparente y porosidad total en el cultivo, pone de manifiesto como este uso del suelo, así como, las prácticas de mecanización implementadas, conducen a cambios marcados en la mecánica del suelo, respuesta documentada igualmente en estudios de (Zheng, 2021; Holsen, 2008). La plantación y barbecho, generaron respuestas similares en Da, Pt, lo que sugiere en principio, que la ausencia de procesos de mecanización frecuentes representa un aspecto favorable para la conservación del suelo, no obstante, otras variables como la velocidad de infiltración indican que una cobertura con mayor complejidad estructural regula y retarda el ingreso de agua al suelo, hallazgo que contrasta con estudios de Hernández et al., (2024) para García Rovira donde la plantación forestal arrojo mayores valores, tal respuesta, podría explicarse por la diferencia en la textura y el historial previo del suelo en que se evaluaron las dos plantaciones.

Las diferencias identificadas para el conjunto de propiedades químicas, es concordante con Takoutsing et al., (2016) quienes destacan su dinámica como una característica que se manifiesta en mayor grado cuando los contrastes incluyen suelos forestales como fue el enfoque acá tratado. El alto valor de conductividad eléctrica del cultivo respecto de los demás usos, puede explicarse

por el manejo de riego que requiere en las etapas iniciales, y que según Almeida & Serralheiro, (2022) se trata de una práctica que puede conducir a la salinización total del suelo si no es controlada. En todo caso, esto hallazgos sugieren que es una propiedad con carácter residual a largo plazo por el tiempo en que se realizaron las mediciones. Los valores elevados de fósforo reportados para la plantación, podrán explicarse por un mayor aporte de materia orgánica, y para el cultivo por efecto residual de la fertilización.

La acumulación constante de hojarasca (litter) en la superficie del suelo de la plantación explicaría la baja abundancia relativa de hongos ligninolíticos, debido a que la comunidad fúngica predominante está compuesta por microorganismos no especializados para degradar estructuras con altos contenidos de lignina, como las acículas maduras. Este comportamiento es concordante con lo reportado por Yin et al. (2025), quienes al estudiar las comunidades microbianas en bosques de *Pinus tabuliformis* observaron dinámicas similares en la especialización funcional del microbioma frente a sustratos recalcitrantes. Por otro lado, respecto de las bacterias, el desarrollo de un sistema radicular de mayor complejidad estructural y la consecuente liberación continua de exudados en la rizosfera explicarían las mayores densidades y el incremento en el conteo de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) de este grupo microbiano en el sistema forestal, en comparación con el cultivo y barbecho, hallazgo igualmente informado y coincidente con investigaciones de Zhang et al. (2022); Upadhyay et al. (2009).

Las respuestas observadas de la funcionalidad evidencian el carácter sistémico del suelo y su no uniformidad ante los manejos que le son implementados. Este resultado fue soportado desde las diferentes segmentaciones que las propiedades tuvieron como funciones específicas en los usos del suelo. Como lo expresa Valujeva et al. (2020) este tipo de análisis, no busca en ningún caso generar comparaciones que castiguen un manejo en especial, por el contrario, son herramientas que la ciencia del suelo cuantifica para comprender en mayor grado las interacciones resultantes del Nexus planta-suelo en coberturas productivas. Los hallazgos en términos generales no

establecen un suelo en óptimos de funcionalidad ni de calidad como fue antes documentado, sin embargo, algunos aspectos acá mostrados se convierten en líneas relevantes de compresión del sistema suelo.

Por ejemplo, los valores de las funciones físicas sugieren cierta similitud en los tres suelos, lo cual podría estar relacionado con la respuesta no dinámicas en tiempo que tienen las propiedades físicas, además, de un nivel de homogeneidad alto en las fracciones minerales de separados. La puntuación obtenida por PF en la regulación hídrica, analizada desde la velocidad de infiltración es concordante con Hernández et al. (2024) para quienes este uso del suelo promovió la gestión del agua edáfica al compararla con otros usos productivos, lo que sugieren en principio que este tipo de cobertura actúa como un eslabón fundamental en la conservación hídrica a escala local.

Las variables químicas evaluadas presentan un panorama de mayor variedad de respuestas en cada uso del suelo. Las puntuaciones altas obtenidas por el cultivo agrícola en los aspectos nutricionales podrían explicarse por el suministro continuo de elementos minerales mediante la fertilización periódica; esto fue confirmado por el propietario, quien manifestó aplicar un régimen de fertilización cada tres meses. Este aspecto coincide con lo planteado por Solano y Arancibia (2024), quienes validan dicha práctica, pero advierten que un exceso en estos procesos reduce la calidad del suelo a largo plazo, lo cual concuerda con los resultados presentados. En tal sentido, esta interpretación corresponde a un abordaje inicial y no a una conclusión contundente del estudio. La capacidad del suelo como sumidero de carbono fue mayor en el barbecho y en la plantación, lo que pone de manifiesto dos focos de análisis. Por una parte, los manejos sin intervención mecánica constante promueven esta función ecosistémica; por otra, el aporte continuo de residuos orgánicos incrementa la fuente de carbono que se incorpora al suelo mediante el proceso de humificación (Gómez-Calderón et al., 2018).

Finalmente, los hallazgos para las funciones biológicas integradas destacan al barbecho y

a la plantación forestal como usos del suelo que promueven dicha actividad. En el caso del barbecho, la abundancia de bacterias y hongos sugiere un estado de recuperación edáfica que explicaría la respuesta funcional observada, evidenciando que las prácticas antrópicas intensivas desfavorecen la conservación del suelo (Shen et al., 2025). Respecto a la plantación, la generación de microclimas edáficos podría justificar este resultado. Además, la mayor complejidad estructural de esta cobertura vegetal constituye un factor determinante para que comunidades microbianas especializadas estén presentes y ejecuten procesos clave, tales como el ciclaje de nutrientes en sustratos complejos como las acículas de las coníferas. Esto concuerda con lo reportado por Oviedo et al. (2026), quienes, al comparar sistemas agrícolas y forestales de coníferas, establecieron relaciones específicas en función de los materiales que integran la capa de hojarasca (litter).

Los valores de funcionalidad edáfica registrados en las plantaciones forestales las posicionan como coberturas estratégicas para la mitigación del cambio climático y la restauración de suelos degradados en la provincia de García Rovira. Este comportamiento se explica porque la densidad del dosel y la acumulación de la capa de hojarasca (litter) actúan como un amortiguador térmico e hídrico, mitigando la escorrentía y la erosión que comúnmente afectan a los sistemas agrícolas descapotados de la región andina. Al respecto, la literatura científica internacional coincide en que las plantaciones estables aceleran la recuperación de la macroporosidad y la estabilidad de los agregados (Oyarzún y Castillo, 2024). Por lo tanto, destacar el desempeño de esta cobertura no solo valida su viabilidad técnica como sumidero de carbono y activador biológico, sino que fundamenta la necesidad de promoverlas bajo esquemas de silvicultura, ofreciendo a los productores locales una alternativa productiva a largo plazo, no obstante, los aspectos de aprovechamiento deben ser analizados para no crear escenarios irreales de los impactos que esto causa al suelo si la plantación es talada.

En síntesis, la respuesta funcional revelada en este estudio preliminar evidencia cómo cada

uso del suelo genera dinámicas diferenciadas, siendo el manejo antrópico y las características intrínsecas de cada cobertura los aspectos que en mayor grado explicarían estos hallazgos. Por lo tanto, esta investigación establece una línea de base explicativa a partir de la cual es necesario aunar esfuerzos académicos. Esto permitirá ampliar el estudio de los suelos forestales y profundizar en sus contrastes dentro de la región de Santander y los Andes de Colombia.

6 Conclusiones

Las propiedades del suelo mostraron valores diferenciados en cada uno de los usos analizados. Esta respuesta permitió establecer un referente sobre la forma en que el recurso edáfico se relaciona con la cobertura implementada o en proceso de recuperación. Específicamente, estos resultados son clave para comprender que las propiedades físicas, químicas y biológicas no deben ser asumidas como un estándar homogéneo para la provincia de García Rovira en Santander.

La inclusión de las propiedades biológicas del suelo constituye una herramienta complementaria indispensable para estudios con este enfoque, la cual, en este caso particular, validó de forma integral las respuestas observadas. En tal sentido, es necesario complementar los trabajos próximos sobre física y química del suelo con estas variables biológicas para lograr una mayor comprensión del sistema edáfico.

Las métricas obtenidas sobre la calidad del suelo, según el indicador empleado, fueron determinantes para comprender la realidad del recurso a partir de un conjunto de propiedades que destacaron por su respuesta a la cobertura implementada. El uso de este indicador se valida por su integralidad, un aspecto altamente relevante en la ciencia del suelo y más aún para este estudio, donde se asumió la existencia de múltiples tipologías de suelo debido a la amplia distribución espacial de los puntos de muestreo.

La no existencia de un óptimo de calidad, según el indicador empleado, debe ser interpretada con cautela por los propietarios y la academia. Si bien se trata de resultados desfavorables en algunos casos, la realidad del territorio debe permitir que estas herramientas de estudio edáfico sirvan para

redefinir los lineamientos de gestión del suelo, sin que esto implique eliminar las actividades productivas que por tradición cultural han permanecido en las fincas de la región.

Los hallazgos de este estudio demuestran que la plantación de *Pinus patula* favorece el potencial de secuestro de carbono y la creación de microclimas edáficos esenciales para el ciclaje de nutrientes complejos. Sin embargo, su promoción no debe concebirse de manera aislada, es necesario integrar la silvicultura como herramienta de planificación de esos cultivos. De este modo, las plantaciones operarán como herramientas de conectividad ecológica y conservación del recurso suelo, diversificando simultáneamente la economía de las comunidades rurales tradicionales sin desplazar sus prácticas culturales de producción.

La herramienta de funcionalidad empleada en este estudio permitió revelar datos sobre los usos del suelo que hasta la fecha no se tenían para la región. En tal sentido, sus métricas constituyen un insumo clave y preliminar sobre cómo se debe comprender el suelo desde las realidades de la cobertura que soportan. Por lo tanto, el alcance de este estudio no busca penalizar ningún uso del suelo; por el contrario, pretende sentar las bases para futuros análisis que sirvan como elementos de gestión edáfica integral para el sector forestal, específicamente desde el enfoque de las plantaciones forestales.

7 Recomendaciones

Consolidar la inclusión de indicadores biológicos en los próximos estudios de monitoreo funcional edáfico en Santander, superando las evaluaciones tradicionales que solo contemplan variables físicas y químicas.

Ampliar el diseño de muestreo espacial en la provincia de García Rovira para generar una base de datos detallada de la calidad del suelo, evitando la estandarización y reconociendo la diversidad de tipologías edáficas de la región

Incorporar el bosque natural en los próximos estudios edáficos de la región como un escenario de referencia para evaluar la calidad y funcionalidad del suelo. Este diseño experimental

permitirá contrastar y complementar los resultados aquí generados, facilitando una comprensión integral de las respuestas ecológicas en estos ecosistemas de alta importancia social y ambiental para los Andes colombianos.

Diseñar futuras investigaciones bajo un enfoque transdisciplinar que vincule las métricas de funcionalidad del suelo con los factores socioeconómicos de las familias rurales, garantizando que las soluciones técnicas de manejo sostenible se co-diseñen respetando la tradición agrícola y las realidades del territorio.

Referencias bibliográficas

Agrotendencia (2025). Informe sobre sustentabilidad y uso del suelo en Colombia. Agencia Nacional de Tierras.

Ardila-García, V., & Rodríguez-González, C. (2022). Agricultura de conservación como estrategia potencial para la gestión sostenible del suelo en agroecosistemas de Cachipay, Cundinamarca. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2674

Armas, J. (2012). Procesos bioquímicos en suelos tropicales y su impacto en la productividad agrícola. Revista de Ciencias Ambientales, 6(1), 45-60.

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (s.f.). Política para la gestión sostenible del suelo. https://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

Bautista Cruz, A., Etchevers Barra, J., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas, 13(2), 90-97.

Berg, B. (2014). Foliar litter decomposition: A conceptual model with focus on pine (Pinus) litter—A genus with global distribution. International Scholarly Research Notices, 2014, artículo 838169. https://doi.org/10.1155/2014/838169

Becerra, C., Oviedo, A., & Duarte, D. (2022). Determinación del índice de calidad del suelo en dos municipios de García Rovira, Santander, Colombia. Universidad Industrial de Santander.

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.

W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 120, 105–125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Burbano Orjuela, H. (2017). La calidad y salud del suelo influyen sobre la naturaleza y la sociedad. Revista Tendencias, 18(1), 117-134.

Cardoso, E., Vasconcellos, R., Moreira, F., & Filho, B. (2013). Soil quality indicators for tropical regions: a review. Plant and Soil, 372(1-2), 1-21.

Casas, J. (2012). Soil microbial diversity and its influence on soil quality. Soil Biology Studies, 7(4), 235–252.

Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. Terra Latinoamericana, 39, 1-12. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698

Cherubin, M., Karlen, D., Cerri, C., Franco, A., Tormena, C., Davies, C., & Cerri, C. (2016). Land use change impacts on soil quality of tropical agroecosystems. Soil Use and Management, 32(1), 21-34.

Cherubin, M., Karlen, D., Cerri, C., Franco, A., Tormena, C., Davies, C., & Cerri, C. (2016). Land use change impacts on soil quality of tropical agroecosystems. Soil Use and Management, 32(1), 21-34.

De la Rosa, F., Martínez, P., & Sánchez, R. (2023). Impacto del uso del suelo sobre la funcionalidad físico-química en áreas rurales de Colombia. Revista Colombiana de Ciencias del Suelo, 12(1), 45-63.

Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. Agrociencia, 51(8), 813-831.

Etchevers Barra, J. D., Cotler, H., & Hidalgo, C. (2020). Salir de la invisibilidad: nuevos retos para la ciencia del suelo. Terra Latinoamericana, 38(4), 931-938. https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867

FAO. (2015). Estado mundial del recurso suelo (EMRS) – Resumen técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Gallegos, J., Afanador, F., Coca, D., Vargas, A., Bautista, M., Hernández, A. (2020). Evaluación de la calidad del suelo en contextos agrícolas de Colombia. Journal of Environmental Studies. 34(3), 205-220.

Garavito, G. (s.f.). Soil properties and nutrient cycles in Colombian highlands. Unpublished manuscript, Universidad Nacional de Colombia.

García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Pastos y Forrajes, 35(2), 125-138.

Gelvez, I., Moreno, J., Santos, A. (2020). Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico. Practicas Agropecuarias – AGROSAVIA. https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404098

Gómez-Calderón, Natalia, Villagra-Mendoza, Karolina, & Solorzano-Quintana, Milton. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). Revista Tecnología en Marcha, 31(1), 167-177. https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506

Gratacós, R. (2011). Fundamentos de calidad del suelo y análisis físico-químicos. Editorial Agrícola, 2ª Edición.

Guerra, A. (2014). Propiedades bioquímicas del suelo y su influencia sobre la productividad forestal. Revista de Ciencias Forestales. 10(2), 110-125.

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. Idesia (Arica), 24(1), 49-61. https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. Idesia (Arica), 24(1), 49-61. https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. Soil Science Society of America Journal, 61(1), 4-10.

Latorre, D. (2024). Indicadores de calidad de suelo, agua y oferta ambiental para sistemas agrícolas sostenibles. AGROSAVIA Editorial.

Llanga, L., Avila-Salem, M. E., Montesdeoca, F., Aponte, H., Ron-Garrido, L., Espinosa, J., Rivera, M., Borie, F., Cornejo, P., & Alvarado Ochoa, S. (2023). Efecto de la labranza y fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador. Siembra, 10(1), e4261. https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4261

López de Rojas, E., & Pérez de Roberti, R. (1990). Métodos de análisis físico y químico de suelos. Ediciones Técnicas.

Mora-Chacón, J., Nakajima, S., Rojas, P., & Rojas, C. (2019). Efecto de la cobertura forestal sobre las características del suelo en la finca experimental interdisciplinaria de modelos agroecológicos: un estudio de caso. InterSedes, 20 (42), 210-226. https://dx.doi.org/10.15517/isucr.v20i42.41851

Moreno Páez, T. (2021). Aplicación de indicadores biológicos para evaluar la calidad del suelo en suelos forestales. Tesis, Universidad Nacional de Colombia.

Narváez-Ortiz, W., Morales-Díaz, A., Benavides-Mendoza, A., Reyes-Valdés, M. (2015). Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 6(spe12), 2383-2397.

Nierop, K. G. J., & Verstraten, J. M. (2006). Fate of tannins in Corsican pine litter. Journal of Chemical Ecology, 32, 2709–2719. https://doi.org/10.1007/s10886-006-9194-9

Nuñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., & Prado-Hernández, J. V. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14(6), e3148. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148

Oviedo, R., Patiño, M., Hernádez, C., Bastida, F., Pascual, J., Ros, M., (2026). Soil multifunctionality and changes in the microbiome community following the transition from forest to agriculture in southern Spain. Geoderma Regional. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01050

Oyarzún, C., Castillo, Y. (2024) Efectos de las plantaciones forestales sobre la exportación de nutrientes, erosión del suelo, transporte de sedimentos y macro-invertebrados en el centro-sur de Chile: una revisión. Revista Bosque, 45(1): 3-15. https://doi.org.10.4067/S0717-92002024000100003

Prasad, R., & Power, F. (1997). Soil Quality and Soil Health. Kluwer Academic Publishers.

Pulido Fernández, M. (2014). Indicadores de calidad del suelo en áreas de pastoreo (Tesis doctoral). Universidad de Extremadura.

Quintero, V. (2013). Experiencias en sistemas silvopastoriles en Colombia y su impacto en la calidad del suelo. Colombia Forestal, 16(31), 7-14.

Reyes-Palomino, P., & Cano, A. (2022). Evaluación del efecto del cambio de uso del suelo en la dinámica de nutrientes en suelos tropicales. Revista Colombiana de Ciencias Agrícolas, 15(1), 112-126.

Reyes-Palomino, P., & Cano, A. (2022). Evaluación del efecto del cambio de uso del suelo en la dinámica de nutrientes en suelos tropicales. Revista Colombiana de Ciencias Agrícolas, 15(1), 112-126.

Rubio Gutiérrez, L. (2010). Caracterización bioquímica del suelo forestal en bosques nativos. Revista Forestal Colombiana, 9(3), 200-210.

Saavedra-Mora, C., Espinosa, C., & Rodríguez, L. (2019). Indicadores de calidad del suelo para restauración ecológica. Ecología Austral, 29(3), 393-405.

Salcedo-Pérez, E., Ruiz-Blandón, B. A., Hernández-Álvarez, E., González-Cruz, R., Bernabé-Antonio, A., Orozco-Guareño, E., Ramírez-López, L. B., Anzaldo-Hernández, J., & Delgado-Fornué, E. (2019). Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 10(52), 34-54. https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.398

Salome, J., Gómez, A., & Pérez, F. (2016). Cambios en la materia orgánica del suelo relacionados con el uso y manejo en la zona cafetera. Revista de Ciencias Agrícolas, 11(2), 104-118.

Santiago-Mejía, B. E., Martínez-Menez, M. R., Rubio-Granados, E., Vaquera-Huerta, H., & Sánchez-Escudero, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 15(2), 275-288. https://doi.org/10.22231/asyd.v15i2.796

Sarmiento, E., Fandiño, S., & Gómez, L. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. Ecosistemas, 27(3), 130-139. https://doi.org/10.7818/ECOS.1598

Solano, Sol Valeria Vicente, & Arancibia, Margarita Elluz Calle. (2024). Fertilizantes en la producción agrícola: un análisis de la percepción de uso. Apuntes del Cenes, 43(78), 209-234. Epub January 31, 2025.https://doi.org/10.19053/uptc.01203053.v43.n78.2024.17532

Shen, J., Zeng, X., Fan, S., & Liu, G. (2025). Impacts of Intensive Management Practices on the Long-Term Sustainability of Soil and Water Conservation Functions in Bamboo Forests: A Mechanistic Review from Silvicultural Perspectives. Forests, 16(5), 787. https://doi.org/10.3390/f16050787

Sierra, F., Ramírez, J., & Torres, M. (2011). Calidad física del suelo en sistemas agroforestales de la región Caribe colombiana. Revista de Suelos, 21(1), 56-68.

Sirishantha, D., Karunadhipathi, U., Ampitiyawatta, A., Muttil, N., Rathnayake, U. Climate Change and Soil Dynamics: A Crop Modelling Approach. Soil Syst. 2023, 7, 82. https://doi.org/10.3390/soilsystems7040082

Toledo, D. M., Arzuaga, S. A., Galantini, J. A., & Vazquez, S. (2018). Indicadores e índices biológicos de calidad de suelo en sistemas forestales. Ciencia del Suelo, 36(2), 1-12.

Trujillo-González, J. M., Mahecha, J. D., & Torres-Mora, M. A. (2018). El recurso suelo: un análisis de sus funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 9(2), 29-38. https://doi.org/10.22490/21456453.2095

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. (s.f.). Suelos colombianos: Una mirada desde la academia. https://www.utadeo.edu.co/files/node/publication/field_attached_file/pdf-suelos_colombianos-_pag_-_web_0.pdf

Vásquez Polo, J. R., & Macías Vázquez, F. (2017). Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia. Terra Latinoamericana, 35(1), 7-17.

Wagg, C., Bender, S., Widmer, F., van der Heijden, M. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. PNAS. 111, 5266–5270. https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111

Widmer, F., Fliebbach, A., Lützow, M., & Mäder, P. (2001). Dinámica de la comunidad microbiana del suelo después del cambio de uso del suelo. Applied Soil Ecology. 16(3), 255-263.

Yáñez Díaz, M. I., Cantú Silva, I., & Garza Ocañas, F. (2023). Efecto en las propiedades fisicoquímicas de un Regosol con cambios de uso de suelo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 14(79), 58-79. https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1359

Yela-Lara, S., del-M., Baca-Gamboa, A.-E. (2023). Dinámicas de cambio de las coberturas del suelo y su impacto en el sector suroriental de Pasto, Colombia. Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185), 996-1007. https://doi.org/10.18257/raccefyn.1995

Zornoza, R., Acosta, J. A., Bastida, F., Domínguez, S. G., Toledo, D. M., & Faz, A. (2015). Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. Soil, 1(1), 173-185.