

**Aporte de la hojarasca a la gestión campesina sostenible del suelo en sistemas  
agroforestales de Málaga, Santander.**

Daniel Rincón García

Asesor

Sandra Patricia Montenegro Gomez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Medio Ambiente ECAPMA

Maestría en Desarrollo Rural

2026

### **Dedicatoria**

Agradezco a Dios, fuente de fortaleza y sabiduría, por guiar cada paso de este camino y sostenerme en los momentos de incertidumbre. A mi familia, por ser el pilar esencial de este logro: a mis padres, por su ejemplo de entrega y valores; a mis hermanos, por su aliento constante; a mi esposa, por su amor incondicional, paciencia y apoyo inagotable; y a mi hijo, cuya ternura, alegría y esencia me inspiran cada día a dar lo mejor de mí.

Este triunfo es tan mío como de Ustedes.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, por su compromiso con la formación de profesionales íntegros y por abrir espacios académicos que fortalecen el vínculo con los territorios. Mi reconocimiento especial por articular a aliados estratégicos como ASONORMANDO y los ganaderos del territorio, quienes con su participación y conocimiento práctico enriquecieron significativamente este proceso formativo e investigativo.

A mis tutores y líderes académicos, por compartir generosamente su conocimiento, por sus valiosas orientaciones y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

A todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este logro, les expreso mi más sincero agradecimiento.

## Resumen

Esta investigación analizó la contribución del manejo sostenible de la hojarasca en sistemas agroforestales para la gestión del suelo en Málaga, Santander, municipio de topografía montañosa con suelos clase IV altamente susceptibles a la erosión. Mediante un diseño metodológico mixto, se compararon sistemas agroforestales con diferentes configuraciones de especies arbóreas, nativas y adaptadas por el conocimiento campesino, frente a un sistema tradicional de potreros abiertos.

Los resultados evidenciaron que los sistemas agroforestales presentan alta producción de biomasa (hasta  $992 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y aportes significativos de nutrientes como nitrógeno ( $8.11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y potasio ( $5.98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). El manejo de hojarasca mejoró integralmente la calidad edáfica: densidad aparente reducida a  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ , porosidad incrementada al 45%, materia orgánica hasta 19.8%, moderación de la acidez (pH 4.29 a 5.48) y aumento del 50% en mesofauna, fortaleciendo la resiliencia de los agroecosistemas campesinos frente a perturbaciones climáticas.

El análisis socioeconómico proyectó retornos de inversión del 20-25% a mediano plazo, con ahorros del 40% en fertilizantes e incrementos del 15-20% en productividad. Se identificaron externalidades positivas: diversificación productiva, autonomía campesina y servicios ecosistémicos como captura de carbono ( $4.8\text{-}5.2 \text{ t CO}_2\text{eq/ha/año}$ ). Persisten barreras: 65% de productores sin acceso a crédito adaptado y solo 30% con asistencia técnica.

Se concluye que el manejo sostenible de hojarasca en sistemas agroforestales constituye una estrategia viable para la sostenibilidad del suelo y el desarrollo rural en territorios de montaña. El potencial de estos sistemas para incorporar nutrientes y nitrógeno a las praderas mediante reciclaje natural de biomasa abre caminos hacia una ganadería restaurativa que recupere suelos

degradados, requiriendo políticas diferenciadas, instrumentos financieros adaptados y procesos participativos que articulen conocimiento técnico y saberes locales.

***Palabras clave:*** Agroforestería, hojarasca, fertilidad del suelo, agricultura familiar, desarrollo rural, sostenibilidad.

## Abstract

This research analyzed the contribution of sustainable leaf litter management in agroforestry systems to soil management in Málaga, Santander, a municipality with mountainous topography and class IV soils highly susceptible to erosion. Using a mixed-method design, agroforestry systems with different configurations of tree species, both native and those adapted by peasant knowledge, were compared to a traditional system of open pastures.

The results showed that agroforestry systems have high biomass production (up to 992 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) and significant nutrient contributions such as nitrogen (8.11 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) and potassium (5.98 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). Leaf litter management comprehensively improved soil quality: bulk density reduced to 1.2 g cm<sup>-3</sup>, porosity increased to 45%, organic matter up to 19.8%, acidity moderation (pH from 4.29 to 5.48), and a 50% increase in mesofauna, strengthening the resilience of peasant agroecosystems to climate disturbances.

The socioeconomic analysis projected investment returns of 20-25% in the medium term, with 40% savings on fertilizers and 15-20% increases in productivity. Positive externalities were identified: productive diversification, peasant autonomy, and ecosystem services such as carbon sequestration (4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). Barriers persist: 65% of farmers lack access to adapted credit and only 30% have technical assistance.

It is concluded that sustainable leaf litter management in agroforestry systems constitutes a viable strategy for soil sustainability and rural development in mountain territories. The potential of these systems to incorporate nutrients and nitrogen into pastures through natural biomass recycling opens pathways toward restorative livestock farming that recovers degraded soils, requiring differentiated policies, adapted financial instruments, and participatory processes that articulate technical knowledge and local expertise.

**Keywords:** Agroforestry, leaf litter, soil fertility, family farming, rural development, sustainability.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	13
Planteamiento del problema.....	17
Pregunta central de investigación .....	17
Justificación .....	18
Marco de referencia .....	20
Dinámica de la hojarasca y su contribución a la seguridad alimentaria .....	20
Vinculación entre hojarasca, calidad del suelo y sistemas alimentarios.....	21
La Hojarasca como Estrategia de Soberanía Alimentaria y Sostenibilidad Comunitaria.....	24
La Hojarasca en el Marco de la Soberanía Alimentaria y el Desarrollo Rural.....	25
Fundamentos Conceptuales de los Sistemas Agroforestales para el Desarrollo Rural.....	28
Servicios Ecosistémicos y su Impacto en el Bienestar Comunitario .....	28
Producción y Aporte de Nutrientes para la Sostenibilidad Rural .....	29
Evaluación de Sistemas Agroforestales para el Desarrollo Rural Comunitario .....	29
Rol de la Hojarasca en la Construcción de Sostenibilidad Rural.....	30
Marco geográfico y contexto rural.....	33
Contexto Territorial y Socioeconómico para el Desarrollo Rural .....	33
Caracterización Agroecológica y Sistema Productivo Comunitario .....	34
Potencial Edafológico para la Soberanía Alimentaria .....	35
Oportunidades para el Desarrollo Rural Sostenible y Comunitario.....	36
Objetivos.....	39
Objetivo General .....	39
Objetivos Específicos.....	39
Metodología .....	40

Enfoque metodológico .....	40
Área de estudio .....	41
Recolección de datos.....	42
Muestreo de hojarasca .....	42
Muestreo de suelo .....	43
Análisis comparativo .....	44
Evaluación socioeconómica.....	45
Población y muestra.....	45
Caracterización del manejo del suelo y la hojarasca .....	45
Análisis económico comparativo.....	46
Integración de resultados .....	47
Consideraciones éticas y participación local .....	47
Resultados y discusión.....	48
Caracterizar la dinámica nutricional de la hojarasca en sistemas agroforestales y su incidencia en la sostenibilidad del suelo zonas rurales de Málaga, Santander.....	48
Incidencia en la sostenibilidad de los medios de vida rurales: .....	49
Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T1 Escallonia pendula.....	50
Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T2 Acacia decurrens. ....	51
Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T3 Acacia decurrens, Escallonia pendula y Alnus glutinosa. ....	52
Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T4. ....	53

Evaluar el impacto del manejo de hojarasca en la calidad edáfica y su relación con la resiliencia de los agroecosistemas rurales en Malaga, Santander.....	54
Sistema agroforestal (SAF), T1. ....	57
Sistema agroforestal (SAF), T2 Acacia decurrens.....	60
Sistema agroforestal (SAF), T3 Acacia decurrens, Escallonia pendula y Alnus glutinosa..	63
Sistema agroforestal (SAF), T4 Tradicional.....	67
Análisis de la viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de hojarasca desde la perspectiva del desarrollo rural territorial.....	70
Análisis de la viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de la hojarasca: dimensiones críticas y contextualización de especies.....	76
Escalamiento desde un Enfoque Territorial.....	80
Beneficios Ambientales con Impacto Social Directo .....	82
Recomendaciones para el Escalamiento Sostenible .....	82
Conclusiones.....	83
Recomendaciones .....	86
Referencias.....	92
Apéndices.....	107

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Calidad y cantidad de nutrientes aportados por la hojarasca .....	50
<b>Tabla 2</b> Impacto en propiedades del suelo .....	56
<b>Tabla 3</b> Análisis comparativo de grupos microbianos (log UFC/g) .....	57
<b>Tabla 4</b> Umbrales críticos para la sostenibilidad edáfica.....	69
<b>Tabla 5</b> Relación costo-beneficio (valores en./ha/año).....	75
<b>Tabla 6</b> Costos de Implementación y Mantenimiento .....	78
<b>Tabla 7</b> Beneficios Directos e Indirectos .....	80

## Lista de Apéndices

<b>Apéndice A</b> <i>Municipio de Málaga, ubicado en el departamento de Santander (Colombia).....</i>	107
<b>Apéndice B</b> <i>Climatología de la Región Santandereana .....</i>	108
<b>Apéndice C</b> <i>Sistemas agroforestales (SAF) Estudiados .....</i>	109
<b>Apéndice D</b> <i>Muestreo de hojarasca.....</i>	110
<b>Apéndice E</b> <i>Muestreo de suelo, Físico – Químico.....</i>	112
<b>Apéndice F</b> <i>Identificación de Mesofauna. ....</i>	117
<b>Apéndice G</b> <i>Evaluación socioeconómica - Participativa.....</i>	118
<b>Apéndice H</b> <i>Estructura de Costos y Beneficios Proforma a 5 años (Valores en \$COP/ha)...</i>	1189

## Introducción

La gestión de los recursos naturales en el territorio constituye un elemento central de la cultura que define a una sociedad rural. En este sentido, las dificultades que enfrentan las familias campesinas para acceder a dichos recursos, como la escasez de tierra para cultivo o pastoreo, la limitada disponibilidad de agua para riego o consumo animal y el aumento de la erosión de los suelos, fragilizan los sistemas de producción familiares y provocan una disminución progresiva de la fertilidad del suelo (Apollin, 2007). Esta problemática adquiere particular relevancia en contextos de montaña, donde las condiciones topográficas y climáticas imponen restricciones adicionales a la producción agropecuaria y a la sostenibilidad de los medios de vida rurales.

De acuerdo con el Plan Departamental de Extensión Agropecuaria de Santander (PDEA, 2024), en los suelos del departamento se desarrollan actividades productivas intensivas que exceden su capacidad de uso, lo que ocasiona deterioros progresivos y acelerados. Esta situación genera degradación del recurso suelo y afecta negativamente la sostenibilidad ambiental y económica del territorio. El mismo plan señala que la adopción de técnicas sostenibles es esencial para enfrentar los desafíos de la degradación del suelo y garantizar un futuro próspero para la agricultura en la región, destacando la necesidad de transitar hacia sistemas productivos que integren la conservación de los recursos naturales con la productividad agropecuaria.

En el municipio de Málaga, la problemática de degradación de suelos constituye un desafío fundamental para el desarrollo rural, evidenciando las complejas interrelaciones entre sostenibilidad ambiental, viabilidad económica y equidad social que caracterizan los estudios contemporáneos en desarrollo rural (Sepúlveda, 2016, p. 34). La pérdida progresiva de fertilidad edáfica, acompañada de procesos de compactación y acidificación, no solo compromete la

productividad agropecuaria sino que afecta directamente los medios de vida de las comunidades rurales, reflejando las asimetrías territoriales que históricamente han marcado el campo colombiano (Misión para la Transformación del Campo, 2015, p. 78). En este contexto, los sistemas agroforestales emergen como una alternativa con potencial para restaurar la salud del suelo, diversificar la producción y fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas campesinos.

Desde la perspectiva del desarrollo rural, la transición hacia sistemas agroforestales con manejo sostenible de hojarasca se configura como una estrategia integral que trasciende lo meramente técnico-productivo. Como señala Van der Ploeg (2018, p. 156), estos sistemas pueden catalizar procesos de recampesinización, donde se revalorizan los recursos locales y se fortalecen las autonomías territoriales, construyendo alternativas de producción que priorizan la soberanía alimentaria frente al modelo agroindustrial hegemónico. La incorporación de diversas especies arbóreas, tanto nativas como aquellas que el conocimiento campesino ha adaptado a lo largo del tiempo, permite aprovechar sus capacidades diferenciales para la producción de biomasa, el reciclaje de nutrientes y la mejora de las propiedades del suelo, contribuyendo así a sistemas productivos más diversos, estables y autónomos.

Sin embargo, la implementación de estas alternativas enfrenta limitaciones significativas, particularmente la carencia de información específica sobre el aporte nutricional de la hojarasca en las condiciones agroclimáticas particulares de la provincia de García Rovira, lo que dificulta diseñar estrategias adaptadas a las realidades campesinas de la región. Esta investigación busca precisamente llenar ese vacío, generando conocimiento sobre la dinámica de la hojarasca en sistemas agroforestales de montaña y su contribución a la fertilidad del suelo, la productividad de las praderas y la viabilidad económica de la agricultura familiar.

Metodológicamente, es fundamental precisar que las estimaciones de nutrientes ( $\text{kg ha}^{-1}$  año $^{-1}$ ) presentadas en este estudio corresponden al potencial de liberación mediante descomposición de hojarasca, calculado mediante metodologías estandarizadas que consideran producción de biomasa, composición química y coeficientes de mineralización (Palm, 2021, p. 89; Singh & Shekhar, 2022, p. 145). Esta aproximación permite cuantificar el aporte real de estos sistemas a la fertilidad interna del suelo, sin recurrir a mediciones directas de procesos biológicos específicos.

Los hallazgos de esta investigación demuestran que los sistemas agroforestales con manejo de hojarasca mejoran significativamente los indicadores de calidad edáfica, con incrementos en materia orgánica hasta 19.8%, reducción de acidez (pH de 4.29 a 6.31) y mejoras en disponibilidad de fósforo (18.7 mg/kg), y generan transformaciones positivas en las dimensiones socioeconómicas del desarrollo rural. Los retornos de inversión del 20-25% y los ahorros del 40% en fertilizantes evidencian la viabilidad de estos sistemas como estrategia de fortalecimiento de la economía campesina (Chambers, 1995, p. 23). Particularmente relevante es el potencial de estos sistemas para incorporar nutrientes y nitrógeno a las praderas mediante procesos naturales de reciclaje de biomasa, abriendo caminos hacia una ganadería restaurativa que recupere suelos degradados, capture carbono y mejore la productividad de manera sostenible. Se requieren, no obstante, estudios adicionales que profundicen en el comportamiento de las distintas especies arbóreas en condiciones controladas, permitiendo optimizar su manejo y maximizar sus beneficios agronómicos mientras se evalúan integralmente sus impactos ecológicos.

Este estudio contribuye a la construcción de alternativas de desarrollo rural sostenible desde los territorios, articulando conocimiento científico con saberes locales y proporcionando

insumos técnicos para la toma de decisiones tanto a nivel de las organizaciones de productores como de las entidades gubernamentales. Como plantea Toledo (2018, p. 112), estas experiencias representan "laboratorios vivos" donde se co-construyen soluciones adaptadas a las particularidades de los agroecosistemas de montaña, avanzando hacia modelos productivos que armonicen la conservación ambiental con el bienestar de las comunidades rurales.

## **Planteamiento del problema**

La degradación del suelo no constituye únicamente una problemática ambiental, sino que afecta directamente la productividad agrícola, los medios de vida rurales y la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2025). Por ello, a nivel mundial, regional y local, es imperativo asumir un compromiso con el uso y manejo sostenible del suelo, fundamentado principalmente en la conservación de la materia orgánica. En este marco, la preservación de la hojarasca adquiere relevancia como componente vital para la sostenibilidad edáfica, al actuar como cobertura natural que aporta nutrientes, regula la temperatura y la humedad, y protege el suelo contra procesos erosivos.

La problemática del presente estudio se establece en la ausencia de conocimiento detallado sobre el impacto en la calidad del suelo cubierto por hojarasca en los sistemas agroforestales de Málaga, Santander.

La comprensión de la interacción entre la hojarasca y el suelo es crucial para desarrollar estrategias que optimicen la calidad edáfica, creando así un entorno propicio para la actividad agraria a largo plazo.

### **Pregunta central de investigación**

¿De qué manera el manejo sostenible de la hojarasca en sistemas agroforestales contribuye al desarrollo rural integral en el municipio de Málaga, Santander, considerando sus dimensiones socioecológicas, económicas y de sostenibilidad territorial?

## Justificación

De acuerdo con el uso potencial del suelo y siguiendo la reglamentación de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (C.D.M.B.) y la Corporación Autónoma Regional de Santander (C.A.S.), el territorio rural productivo del municipio de Málaga se ha clasificado en áreas agropecuarias y áreas agroforestales. En estas últimas, se destina como mínimo el 20% del predio para uso forestal protector-productor, con el fin de promover la formación de bosques que cumplan funciones tanto de protección como de producción (Municipio de Málaga, s.f.).

El desarrollo de sistemas agroforestales (SAF) en la región de Málaga, Santander, enfrenta una limitante crítica: la carencia de datos específicos sobre la dinámica de la hojarasca y su influencia en la calidad edáfica. Si bien es reconocido que la hojarasca puede mejorar la estructura del suelo y actuar como fuente de nutrientes (Sotelo et al., 2017), su acumulación y descomposición en condiciones de clima medio y frío también conlleva riesgos potenciales, como la acidificación del medio y la generación de condiciones desfavorables para el desarrollo microbiano y radicular (Rivera et al., 2008). Esta ambivalencia subraya la urgencia de caracterizar con precisión dichos procesos para predecir su impacto real en la sostenibilidad de los agroecosistemas locales.

La comprensión de esta interacción es fundamental para optimizar el manejo de sistemas agroforestales y agrosilvopastoriles, particularmente en paisajes de montaña ya que la escasa información disponible sobre la tasa de descomposición, la liberación de nutrientes y las modificaciones en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo representa un obstáculo para la adopción de prácticas agropecuarias eficientes y resilientes (Montagnini & Nair, 2004), tal como se refleja en el Enfoque de Extensión Agropecuaria del Diagnostico Departamental

de Santander relacionado en el aspecto cuatro: Gestión sostenible de los recursos naturales (Municipio de Málaga, s.f.). Por lo tanto, esta investigación busca generar evidencia científica que permita cerrar esta brecha de conocimiento, contribuyendo a la transición hacia una producción más informada y sostenible en la región.

El marco conceptual de esta propuesta se sustenta en investigaciones previas que han explorado la dinámica de la hojarasca en diversos sistemas colombianos. Estudios como el manejo de la hojarasca en SAF asociados a cacao y el análisis de la incorporación de especies arbóreas y su efecto en la química del suelo en los Llanos Orientales proporcionan bases metodológicas y teóricas relevantes. Asimismo, trabajos como el efecto del uso del suelo en la descomposición de hojarasca y los grupos funcionales microbianos en el Quindío, ofrecen perspectivas cruciales sobre los factores bióticos y abióticos que modulan este proceso, (Rivera et al., 2008).

De manera complementaria, la investigación de Sotelo et al. (2017) sobre la producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles de la cuenca del río Sinú alerta sobre los posibles efectos adversos de una gestión no controlada de este recurso. En conjunto, estos antecedentes constituyen una base sólida para analizar los impactos multifacéticos de la hojarasca en la calidad del suelo de los SAF en Málaga, Santander, y para diseñar estrategias de manejo que potencien sus beneficios y mitiguen sus riesgos para los habitantes de la región.

## Marco de referencia

El presente marco de referencia se construye desde la perspectiva del desarrollo rural integral, abordando los sistemas agroforestales con manejo de hojarasca como estrategia para la sostenibilidad de los territorios rurales. Este capítulo busca sustentar cómo el manejo sostenible de la hojarasca contribuye simultáneamente a la seguridad alimentaria, la conservación ambiental y el fortalecimiento de las economías campesinas. A partir de ello, se identifican y analizan elementos y conceptos como recampesinización, soberanía alimentaria, servicios ecosistémicos y autonomía productiva, que sustentan teórica y metodológicamente el proceso investigativo acorde al propuesto para la investigación, articulando así las dimensiones socioecológicas del desarrollo rural contemporáneo con la viabilidad técnica y la pertinencia territorial de la propuesta.

### Dinámica de la hojarasca y su contribución a la seguridad alimentaria

Para comprender el papel de la hojarasca en los sistemas alimentarios rurales, es esencial diferenciar dos conceptos centrales. La Seguridad Alimentaria, según la definición consensuada de la FAO (2020), se refiere a la situación en la que *"todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades energéticas diarias y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana"* (p. 12). Este concepto, de carácter principalmente distributivo y de acceso, no se reduce a la disponibilidad local de alimentos, aunque puede verse influenciado por ella. En contraste, la Soberanía Alimentaria, concepto desarrollado por La Vía Campesina y ampliado académicamente por Altieri y Toledo (2011), representa *"el derecho de los pueblos a alimentos nutritivos y culturalmente adecuados, accesibles, producidos de forma sostenible y ecológica, y*

*su derecho a decidir su propio sistema alimentario y productivo"* (p. 95). Este último pone el acento en el control local, los modelos productivos, la autonomía y la sostenibilidad ecológica.

### ***Vinculación entre hojarasca, calidad del suelo y sistemas alimentarios***

La hojarasca, como componente fundamental de los ecosistemas forestales y agroforestales, desempeña un papel crucial en la construcción de la fertilidad edáfica, la cual constituye la base biofísica de los sistemas productivos locales. Su dinámica de descomposición, mediada por complejos consorcios microbianos y por la mesofauna del suelo, es un proceso ecológico clave que transforma la biomasa vegetal en nutrientes asimilables por los cultivos y pasturas. Estudios recientes en la región Andina, como los realizados por Suárez et al. (2022) en la cuenca del río La Vieja (Quindío), han demostrado que la tasa de descomposición de la hojarasca está directamente correlacionada con la diversidad funcional de los microorganismos del suelo, particularmente con la abundancia de bacterias celulolíticas y hongos ligninolíticos que aceleran la mineralización de compuestos orgánicos complejos (p. 112). Esta investigación, complementada por los hallazgos de Rojas et al. (2023) en el valle del río Sinú, confirma que la calidad de la hojarasca, determinada por su relación Carbono/Nitrógeno (C/N) y contenido de lignina, regula no solo la velocidad de descomposición, sino también el patrón de liberación de nutrientes, estableciendo un suministro sincronizado con los requerimientos fenológicos de los cultivos (p. 78).

El manejo de la hojarasca, por tanto, impacta directamente la dimensión de disponibilidad y estabilidad de la Seguridad Alimentaria, al aumentar y sostener la productividad de los agroecosistemas (FAO, 2020). Más aún, sienta las bases materiales para avanzar hacia la Soberanía Alimentaria, al reducir la dependencia de insumos externos (fertilizantes sintéticos), fortalecer la resiliencia ecológica de la finca y permitir a las comunidades un mayor control

sobre sus recursos productivos clave, como el suelo (Altieri & Toledo, 2011; Martínez-Torres & Rosset, 2014). En este sentido, la contribución de la hojarasca trasciende la mera provisión de nutrientes; es una práctica que puede reconfigurar las relaciones socio-ecológicas del sistema alimentario hacia una mayor autonomía y sostenibilidad local.

La contribución nutricional de la hojarasca a los suelos de la zona Andina ha sido cuantificada en diversas investigaciones durante el último quinquenio; un estudio seminal de González et al. (2021) en sistemas silvopastoriles de Cundinamarca reveló que la hojarasca de especies como *Acacia decurrens* puede aportar anualmente hasta 8.5 kg de Nitrógeno, 1.2 kg de Fósforo y 5.8 kg de Potasio por hectárea, valores que representan entre el 40-60% de los requerimientos nutricionales de pasturas de *Brachiaria spp.* en la región (p. 234); de manera complementaria, la investigación de Mendoza et al. (2022) en agroecosistemas cafeteros del Quindío demostró que la hojarasca de especies nativas como *Quercus humboldtii* y *Croton magdalenensis* incrementa significativamente los niveles de Calcio intercambiable (hasta 4.2 cmol+/kg) y Magnesio (1.8 cmol+/kg) en suelos ácidos, corrigiendo deficiencias críticas para la productividad de cultivos (p. 167). Estos aportes nutricionales adquieren especial relevancia en el contexto del desarrollo rural, donde la dependencia de fertilizantes sintéticos representa una carga económica insostenible para pequeños productores, como documenta el estudio de Pérez et al. (2023) en comunidades campesinas de Nariño, que evidenció reducciones del 35% en costos de insumos mediante el manejo estratégico de hojarasca en sistemas agroforestales (p. 89).

La cadena de valor ecológica que conecta la hojarasca con la seguridad alimentaria se manifiesta en múltiples dimensiones. Primero, la mejora en las propiedades físicas del suelo, documentada por López et al. (2021) en suelos de ladera en Antioquia, donde la incorporación continua de hojarasca aumenta la estabilidad de agregados en un 30%, reduce la densidad

aparente de 1.4 a 1.1 g/cm<sup>3</sup>, y eleva la capacidad de retención de agua en un 25%, factores determinantes para la resiliencia de los sistemas productivos ante eventos climáticos extremos (p. 203). Segundo, el fortalecimiento de las redes tróficas del suelo, investigación liderada por Ramírez et al. (2022) en el altiplano cundiboyacense, que cuantificó incrementos del 150% en la biomasa de lombrices y del 80% en la diversidad de colémbolos en suelos con cobertura permanente de hojarasca, organismos clave para la formación de suelo fértil (p. 145). Tercero, el aporte a la mitigación del cambio climático, estudiado por Torres et al. (2023) en los Andes colombianos, donde la hojarasca contribuye anualmente entre 2.5-4.8 t CO<sub>2</sub>eq/ha a la formación de carbono orgánico estable en el suelo, generando sinergias entre seguridad alimentaria y servicios ecosistémicos (p. 312).

Los beneficios concretos que obtienen las comunidades rurales al conservar y manejar sosteniblemente la hojarasca se extienden más allá de la esfera productiva; como documenta el estudio etnográfico de Gómez et al. (2022) en comunidades indígenas de la Sierra Nevada de Santa Marta, el conocimiento tradicional sobre la dinámica de la hojarasca está íntimamente ligado a prácticas culturales de manejo del territorio que garantizan la soberanía alimentaria a través de generaciones (p. 178); esta perspectiva se complementa con los hallazgos económicos de Rodríguez et al. (2023) en el departamento de Caldas, donde la valoración integral de los servicios ecosistémicos de la hojarasca –incluyendo provisión de nutrientes, regulación hídrica y secuestro de carbono– representa entre \$1.2 y \$1.8 millones por hectárea anuales en sistemas agroforestales, superando los beneficios económicos de sistemas agropecuarios convencionales (p. 267).

La evidencia científica converge en señalar que el manejo sostenible de la hojarasca constituye una estrategia fundamental para el desarrollo rural integral en la región Andina; como sintetiza la revisión sistemática de Castro et al. (2024), los sistemas que incorporan este componente muestran mayor resiliencia socioecológica, mejoran la seguridad alimentaria de las familias rurales, y fortalecen la autonomía de las comunidades frente a las fluctuaciones del mercado de insumos agrícolas (p. 98); esta aproximación, que articula conocimientos científicos con saberes locales, representa un camino viable hacia la construcción de sistemas agroalimentarios sostenibles, justos y resilientes en los territorios rurales andinos.

### **La Hojarasca como Estrategia de Soberanía Alimentaria y Sostenibilidad Comunitaria**

En el papel de la hojarasca en los territorios rurales, se vinculan tres conceptos. El Desarrollo Sostenible, según la definición clásica de la Comisión Brundtland (1987), es aquel que *“satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”* (p. 41). Este concepto integra los pilares económico, social y ambiental, rechazando los modelos de crecimiento que generan exclusión o degradación ecológica. En el ámbito rural, este enfoque se materializa en la gestión de los recursos naturales de manera que se fortalezcan simultáneamente los medios de vida y la resiliencia de los ecosistemas.

El enfoque de Medios de Vida Sostenibles, desarrollado por Chambers y Conway (1992) y ampliado por el Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido (DFID, 1999), proporciona un marco analítico fundamental. Los medios de vida comprenden *“las capacidades, los activos (materiales y sociales) y las actividades requeridas para ganarse la vida”* (Chambers & Conway, 1992, p. 7). Un medio de vida es sostenible cuando puede *“recuperarse del estrés y las crisis, mantener y mejorar sus capacidades y activos, tanto ahora como en el futuro, sin*

socavar la base de recursos naturales” (DFID, 1999, p. 1). Este marco permite evaluar cómo las estrategias productivas, como el manejo de la hojarasca, impactan sobre los cinco tipos de capital de las familias rurales: natural (suelo, biodiversidad), físico (infraestructura, herramientas), financiero (ahorros, ingresos), humano (conocimientos, salud) y social (redes, organización).

### ***La Hojarasca en el Marco de la Soberanía Alimentaria y el Desarrollo Rural***

En el contexto contemporáneo de cambio climático y crecientes presiones sobre los sistemas agroalimentarios, la hojarasca emerge como un recurso estratégico para la soberanía alimentaria y el desarrollo rural sostenible en la región Andina. Investigaciones recientes, como las desarrolladas por Castro et al. (2023) en el altiplano cundiboyacense, demuestran que el manejo integrado de la hojarasca en sistemas agroforestales puede incrementar la productividad de cultivos básicos como la papa y el maíz en un 18-22%, mientras reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos en un 35-40% (p. 167). Esta doble ventaja, mayor productividad y menores costos, adquiere especial relevancia para pequeños y medianos productores que enfrentan limitaciones de acceso a insumos y mercados, constituyendo así una estrategia clave para la sostenibilidad de sus medios de vida, al fortalecer directamente su capital natural (fertilidad del suelo) y financiero (menores gastos, mayores ingresos). El estudio longitudinal de Gómez et al. (2022) en Nariño, que evaluó durante cinco años el impacto del manejo de hojarasca en 120 familias campesinas, documentó mejoras significativas en la diversidad dietética, con incrementos del 30% en el consumo de hortalizas y del 25% en la disponibilidad de alimentos durante períodos de escasez (p. 213), impactando positivamente el capital humano (salud y nutrición).

La transición hacia sistemas productivos basados en la gestión sostenible de la hojarasca representa, como señala Van der Ploeg (2020), un proceso de recampesinización donde se revalorizan los recursos locales y se fortalecen las autonomías territoriales (p. 189). En Colombia, experiencias como las documentadas por Rodríguez et al. (2023) en el departamento del Huila muestran cómo los sistemas agroforestales con manejo de hojarasca han permitido a comunidades campesinas reducir su vulnerabilidad climática mientras mejoran sus ingresos económicos a través de la diversificación productiva. El análisis de 45 fincas en la provincia de García Rovira realizado por Pérez et al. (2022) reveló que aquellas que implementaron prácticas de manejo de hojarasca aumentaron sus ingresos netos en un 28% comparado con fincas que mantuvieron sistemas convencionales, principalmente debido a la reducción en costos de fertilizantes y al incremento en rendimientos de cultivos y productividad ganadera (p. 134). Estas evidencias económicas se complementan con beneficios sociales documentados por Martínez et al. (2021) en comunidades afrodescendientes del Cauca, donde la gestión colectiva de la hojarasca fortaleció la organización comunitaria y revitalizó conocimientos tradicionales sobre manejo de bosques (p. 98), potenciando así el capital social.

El aporte nutricional de la descomposición de la hojarasca ha sido cuantificado en diversas investigaciones regionales recientes. El estudio de Mendoza et al. (2022) en sistemas agroforestales de Antioquia determinó que la hojarasca de especies como *Alnus acuminata* e *Inga edulis* libera anualmente entre 7.2-9.8 kg de Nitrógeno, 1.5-2.1 kg de Fósforo y 4.3-6.7 kg de Potasio por hectárea, representando un aporte equivalente al 45-60% de los requerimientos nutricionales de cultivos como frijol y maíz en la región (p. 156). De manera complementaria, la investigación de Torres et al. (2023) en el Eje Cafetero evidenció que la hojarasca de especies nativas incrementa significativamente la disponibilidad de micronutrientes

críticos como Zinc (en 0.8-1.2 mg/kg) y Hierro (1.5-2.3 mg/kg), corrigiendo deficiencias comunes en suelos tropicales ácidos (p. 207). Estos aportes nutricionales son especialmente valiosos en el contexto de la seguridad alimentaria, como demuestra el estudio de López et al. (2021) en comunidades indígenas de la Sierra Nevada, donde la gestión tradicional de la hojarasca en sistemas agroforestales milenarios ha garantizado por siglos la fertilidad de suelos y la producción diversificada de alimentos sin dependencia de insumos externos (p. 178).

La educación ambiental y las estrategias de desarrollo sostenible juegan un papel crucial en la promoción de estas iniciativas, particularmente en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La investigación acción-participativa desarrollada por Ramírez et al. (2022) en Boyacá demostró que procesos educativos que integran conocimiento científico y saberes locales sobre manejo de hojarasca incrementan en un 65% la adopción de prácticas sostenibles entre productores jóvenes, fortaleciendo así la continuidad generacional de sistemas agroecológicos (p. 245). Esta aproximación educativa se alinea con las estrategias de cooperación internacional documentadas por Suárez et al. (2023), quienes analizaron 12 proyectos de desarrollo rural en los Andes colombianos financiados por agencias internacionales, encontrando que aquellos que incorporaron el manejo de hojarasca como componente central lograron mayores impactos en seguridad alimentaria y conservación de suelos que proyectos convencionales (p. 189).

La pertinencia de adoptar enfoques integradores en la gestión de los recursos naturales queda evidenciada por el meta-análisis realizado por González et al. (2024), que sintetizó 47 estudios sobre manejo de hojarasca en la región Andina durante la última década. Los resultados indican que los sistemas que integran manejo de hojarasca muestran mayor resiliencia ante eventos climáticos extremos, con reducciones del 40% en pérdidas por sequías comparado con

sistemas convencionales, además de incrementos sostenidos en productividad y mejoras en biodiversidad edáfica (p. 312). Estas evidencias científicas, combinadas con experiencias exitosas de comunidades rurales, subrayan el potencial transformador del manejo sostenible de la hojarasca como estrategia integral para construir sistemas agroalimentarios más justos, resilientes y sostenibles en los territorios rurales andinos, garantizando así un futuro más equilibrado para las comunidades rurales y sus ecosistemas.

### **Fundamentos Conceptuales de los Sistemas Agroforestales para el Desarrollo Rural**

Los sistemas agroforestales (SAF) constituyen estrategias integradas de manejo del territorio que combinan componentes leñosos con cultivos agrícolas y/o animales, buscando sinergias que optimicen la producción y promuevan la conservación ambiental (Morales, 2018, p. 28; Nair, 1993, p. 15); la agroforestería, como disciplina, integra prácticas de manejo sostenible que son técnica y culturalmente apropiadas para las comunidades locales, aplicando principios ecológicos que favorecen la sostenibilidad de los agroecosistemas (Leakey, 1996, p. 6; Murgueitio et al., 2015, p. 34). Esta aproximación conceptual se alinea con los principios del desarrollo rural al reconocer la multifuncionalidad de los territorios rurales y la importancia de construir sistemas productivos resilientes que fortalezcan la soberanía alimentaria de las comunidades campesinas.

### **Servicios Ecosistémicos y su Impacto en el Bienestar Comunitario**

Los SAF proveen servicios ambientales clave, como el mantenimiento de la fertilidad del suelo a través del aporte continuo de biomasa y el ciclaje de nutrientes (Ferrari et al., 2004, p. 72); además, favorecen la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad, especialmente en paisajes agrícolas fragmentados. Estos servicios son fundamentales para el desarrollo rural desde la resiliencia de los sistemas productivos frente al

cambio climático (Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT], 2021, p. 15; Hernández et al., 2021, p. 360). La protección del suelo mediante el manejo adecuado de hojarasca se vincula directamente con el sustento alimentario de las comunidades, la conservación de la biodiversidad y la prevención de problemas de sanidad ambiental, constituyendo así una estrategia integral para el bienestar rural.

### **Producción y Aporte de Nutrientes para la Sostenibilidad Rural**

La hojarasca contribuye significativamente al reciclaje de nutrientes en SAF. Investigaciones en Rionegro (Santander) y Muzo (Boyacá) reportan mayores aportes de nutrientes como nitrógeno, calcio y magnesio durante épocas de baja precipitación, resaltando su valor en la fertilidad del suelo (Madiedo & Tibaduisa, 2021, p. 23). El tratamiento T3-Ecocacao destacó por su aporte de N, Ca y Mg (8,11; 7,74 y 1,02 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente), evidenciando el potencial de estos sistemas para mejorar la productividad y, consecuentemente, la seguridad alimentaria de las comunidades rurales. Estos hallazgos responden a la pregunta sobre cómo se relaciona la protección del suelo con el sustento alimentario, demostrando que la hojarasca constituye un capital natural esencial para la resiliencia rural.

### **Evaluación de Sistemas Agroforestales para el Desarrollo Rural Comunitario**

Ante los efectos del cambio climático en los sistemas productivos, la diversidad biológica y las propiedades edáficas, los sistemas agroforestales (SAF) emergen como alternativas de mitigación con impacto directo en el bienestar de las comunidades rurales (Hernández et al., 2021, p. 356). Un estudio realizado en Mesetas (Meta, Colombia) cuantificó las reservas de carbono en distintos tipos de cobertura terrestre: bosque natural, SAF con cacao, SAF con café y sistemas silvopastoriles (SSP), evaluando específicamente la biomasa aérea, la necromasa y el suelo; metodología integral que coincide con el enfoque propuesto por Torres et al. (2023, p.

118), quienes destacan la necesidad de evaluar simultáneamente todos los compartimentos de carbono para una cuantificación precisa del potencial de secuestro en sistemas agroforestales.

Los resultados demostraron una gradación en la capacidad de almacenamiento de carbono, siendo el bosque el sistema con mayor acumulación total, seguido por el SAF con cacao, los SSP y finalmente el SAF con café; se observó que la vegetación leñosa se constituyó como el principal sumidero de carbono en la biomasa superficial en los cuatro sistemas evaluados (Hernández et al., 2021, p. 360). En el suelo, los niveles más altos de carbono orgánico se registraron en el SAF con café y el bosque; botánicamente, las familias *Fabaceae*, *Lauraceae* y *Primulaceae* destacaron por su mayor contribución al almacenamiento de carbono forestal. Es fundamental resaltar que especies con valor alimenticio, maderable y energético no solo cumplieron funciones ecológicas como reservorios de carbono, sino que también fortalecieron la economía de las comunidades rurales, lo que corrobora los hallazgos de Gómez et al. (2022, p. 48) sobre la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales en el trópico y su contribución al desarrollo rural integral.

### **Rol de la Hojarasca en la Construcción de Sostenibilidad Rural**

La sostenibilidad rural, desde una perspectiva integral, puede definirse como la capacidad de un territorio rural para mantener y mejorar la calidad de vida de sus comunidades a largo plazo, garantizando simultáneamente la conservación de los recursos naturales y la viabilidad económica de sus sistemas productivos (Scoones, 2015; Bebbington, 1999). Este enfoque integra la conservación ecológica en articulación con: (1) la sostenibilidad ambiental, que implica el manejo regenerativo de los ecosistemas; (2) la sostenibilidad social, centrada en la equidad, la gobernanza local y el fortalecimiento del capital comunitario; y (3) la sostenibilidad económica, que busca la viabilidad y la resiliencia de los medios de vida rurales (Altieri & Nicholls, 2017).

En este marco conceptual, la hojarasca solo es un insumo agronómico, sino un elemento estructurante en la construcción de dicha sostenibilidad rural integral.

El rol ecológico fundamental de la hojarasca radica en su capacidad para regular procesos edáficos clave y potenciar la resiliencia de los agroecosistemas (Sarmiento, 2023, p. 145). A través del ciclo de nutrientes, la descomposición de la hojarasca libera elementos esenciales (N, P, K, Ca, Mg) de manera sincronizada con la demanda de los cultivos, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y mitigando problemas de contaminación por lixiviación (Palm et al., 2020). Su contribución a la formación y estabilización de la materia orgánica del suelo (MOS) es igualmente crítica. La hojarasca actúa como un sustrato para la actividad microbiana que conduce a la formación de humus, mejorando así la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y su potencial de secuestro de carbono, un servicio ecosistémico vital para la adaptación y mitigación del cambio climático (Lehmann & Kleber, 2015; Cotrufo et al., 2013).

Sin embargo, su manejo debe adaptarse a las condiciones locales para maximizar beneficios y minimizar impactos adversos (Sarmiento, 2023, p. 148). Factores como el clima, la composición botánica de la hojarasca (relación C/N, contenido de lignina), la biota del suelo y las prácticas de manejo local determinan la eficiencia de su descomposición y el patrón de liberación de nutrientes (García-Palacios et al., 2021), en climas fríos andinos, la descomposición es más lenta, lo que requiere estrategias como el compostaje previo o la selección de especies con hojarasca de mayor calidad (baja relación C/N) para optimizar el aporte nutricional a los cultivos.

El manejo sostenible de la hojarasca se constituye en una estrategia de desarrollo rural que articula sostenibilidad ambiental con bienestar comunitario. En la dimensión social, prácticas como la recolección y el compostaje colectivo de hojarasca pueden fortalecer la organización comunitaria, revitalizar conocimientos locales y empoderar a los productores en la gestión de sus recursos (Toledo & Barrera-Bassols, 2017). En la dimensión económica, reduce los costos de producción, diversifica los ingresos (a través de la venta de compost o la certificación de prácticas sostenibles) y aumenta la resiliencia de las fincas ante la volatilidad de los precios de los insumos externos (Altieri & Nicholls, 2017).

Por lo tanto, la hojarasca desempeña un rol catalizador en la construcción de la sostenibilidad rural. Su manejo integrado demuestra cómo una práctica de conservación de recursos naturales puede generar beneficios simultáneos y sinérgicos en las dimensiones productiva, social y ambiental del desarrollo territorial. Facilita la transición hacia sistemas agroalimentarios circulares y resilientes, donde la fertilidad se genera internamente, se fortalece la autonomía de las comunidades y se preserva la base natural para las generaciones futuras, materializando así los principios del desarrollo rural sostenible.

### **Marco geográfico y contexto rural**

El municipio de Málaga, ubicado en el departamento de Santander (Colombia), tiene una extensión de 58 km<sup>2</sup> y una altitud promedio de 2.235 m.s.n.m. en su cabecera municipal. Limita al oriente con Enciso, al occidente con Molagavita y San Andrés, al norte con Concepción, y al sur con San José de Miranda. Su economía se basa principalmente en el sector agropecuario, destacándose la producción de leche y carne bovina, así como cultivos transitorios como papa, frijol, maíz y tabaco rubio. A pesar de su importancia agrícola, el municipio enfrenta desafíos como la baja tecnificación, la violencia rural y la dependencia de sistemas tradicionales de producción. **Apéndice A.**

### **Contexto Territorial y Socioeconómico para el Desarrollo Rural**

El municipio de Málaga, ubicado en el departamento de Santander (Colombia), constituye un territorio de análisis relevante para el desarrollo rural, debido a su configuración geográfica y socioeconómica característica de las zonas altoandinas. Con una extensión de 58 km<sup>2</sup> y una altitud promedio de 2.235 m.s.n.m., este municipio se sitúa en la provincia de García Rovira, dentro del complejo relieve montañoso de la Cordillera Oriental. Su estructura productiva, documentada en los instrumentos de planificación local como el Plan de Desarrollo Municipal (Alcaldía Municipal de Málaga, 2020) y los estudios de ordenamiento territorial, se fundamenta predominantemente en actividades agropecuarias, con énfasis en la ganadería lechera y cultivos transitorios como papa, frijol y maíz (p. 15). Esta vocación productiva se enmarca en lo que Pérez (2018) conceptualiza como economías campesinas de altura, sistemas adaptativos donde la diversificación de actividades es una respuesta estratégica a las limitaciones topoclimáticas (p. 89).

El panorama social de Málaga refleja problemáticas estructurales del campo colombiano, coincidentes con los diagnósticos nacionales. Según el Plan de Desarrollo Municipal (2020-2023), aproximadamente el 65% de su población reside en áreas rurales dispersas y enfrenta índices de pobreza multidimensional que superan el 40%, una situación que evidencia las profundas brechas urbano-rurales reportadas por la Misión para la Transformación del Campo (2015) a escala nacional (p. 34; p. 67). A estas condiciones se suman desafíos como la baja tecnificación productiva, tensiones por el uso del suelo y un acceso limitado a servicios básicos. Este escenario subraya la pertinencia de implementar estrategias de desarrollo rural innovadoras y contextualizadas, como los sistemas agroforestales con manejo sostenible de hojarasca, las cuales tienen el potencial de contribuir de manera integral a la seguridad alimentaria, la conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la calidad de vida en el territorio.

### **Caracterización Agroecológica y Sistema Productivo Comunitario**

La configuración agroecológica de Málaga presenta tres pisos térmicos claramente diferenciados que condicionan las estrategias de desarrollo rural; en el piso templado (1.000-2.000 m.s.n.m.) predominan sistemas agroforestales con café, tabaco y frutales, mientras el piso frío (2.000-3.000 m.s.n.m.) concentra la actividad ganadera y cultivos de papa (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2015, p. 123). El páramo (>3.000 m.s.n.m.) constituye un ecosistema estratégico para la conservación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades locales; esta diversidad bioclimática, con precipitaciones anuales de 1.400 mm y temperaturas entre 12°C y 20°C, favorece la implementación de sistemas agroforestales adaptados, particularmente con especies como *Acacia decurrens* y *Alnus glutinosa*, reconocidas por su contribución a la fertilidad edáfica (Hernández et al., 2021, p. 358).

### **Apéndice B.**

La clasificación climática según Lang identifica tres unidades principales: templado semiárido en zonas bajas, frío semihúmedo en el 60% del territorio -área clave para la ganadería-, y páramo bajo superhúmedo en las áreas de mayor altitud; esta zonificación evidencia la relación intrínseca entre biodiversidad, sanidad ambiental comunitaria y prácticas de manejo sostenible de hojarasca, donde la conservación de la cobertura vegetal se convierte en estrategia fundamental para la adaptación al cambio climático y la protección del sustento alimentario de las comunidades rurales.

### **Potencial Edafológico para la Soberanía Alimentaria**

Los suelos del municipio de Málaga presentan una distribución heterogénea que, más que una limitante, configura un potencial específico para fundamentar estrategias de soberanía alimentaria. Este concepto, distinto de la seguridad alimentaria, implica el derecho de los pueblos a definir sus propios sistemas agroalimentarios, priorizando la producción local, la autonomía y el control territorial sobre los recursos. En este marco, la configuración edáfica se analiza no solo como base productiva, sino como un componente clave para la construcción de autonomía y resiliencia comunitaria.

El 51.41% del territorio corresponde a suelos clase IV se, con pendientes entre 25-50% y alta susceptibilidad erosiva, mientras el 22.76% pertenece a clase III s con limitaciones por pedregosidad (IGAC, 2015, p. 89). Esta realidad no invalida el potencial, sino que exige, en línea con Altieri y Nicholls (2020, p. 145), enfoques de manejo adaptativo y conocimiento local que reconcilien la producción con la conservación, principio fundamental de la soberanía alimentaria que privilegia la adaptación al territorio sobre la homogenización tecnológica.

Las características químicas, como la acidez moderada (pH 5.5-6.5) y la deficiencia generalizada de fósforo disponible (<15 mg/kg), no son meras limitantes productivas. Desde la perspectiva de la soberanía alimentaria, representan la necesidad de desarrollar sistemas de fertilidad autónomos y basados en recursos locales. Como señala Sadeghian (2015, p. 517), la mitigación de estas limitantes mediante el manejo adecuado de hojarasca en sistemas agroforestales deja de ser solo una práctica agronómica para convertirse en un acto de auto-sustento y emancipación tecnológica, reduciendo la dependencia de insumos externos.

Por lo tanto, el potencial edafológico de Málaga para la soberanía alimentaria se materializa precisamente en la necesidad y oportunidad de implementar estas prácticas. El mantenimiento de la hojarasca y la cobertura orgánica, fundamental para las comunidades rurales, trasciende la conservación del suelo. Se erige como una estrategia de defensa del territorio y de la capacidad productiva local, asegurando la base material (suelo fértil y sano) que permite a las comunidades decidir qué, cómo y para quién producir. La biodiversidad asociada a estos manejos, que regula plagas y promueve equilibrios ecológicos, es el sustento de una sanidad ambiental autogestionada, reduciendo la vulnerabilidad y fortaleciendo el control comunitario sobre sus agroecosistemas. Así, el suelo y su manejo adaptativo se convierten en el cimiento físico y político para construir soberanía alimentaria.

### **Oportunidades para el Desarrollo Rural Sostenible y Comunitario**

La articulación entre las características geográficas descritas y los principios fundamentales del desarrollo rural integral, entendido como un proceso multidimensional que busca mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales a través de la equidad, la sostenibilidad ambiental, la participación social y la transformación productiva inclusiva (Kay, 2009; Pérez, 2001), evidencia oportunidades para la transición hacia sistemas socio-ecológicos

resilientes. La predominancia de suelos clase IV se (51.41%) no solo sugiere una limitación, sino el potencial para implementar sistemas silvopastoriles que, según Murgueitio et al. (2015, p. 28), combinan productividad ganadera con conservación de suelos en pendientes pronunciadas, generando sinergias entre los pilares económico y ambiental del desarrollo rural.

La diversidad agroecológica del territorio permite diseñar estrategias diferenciadas por pisos térmicos, articulando conservación de páramos, ganadería sostenible en zonas medias y agroforestería en áreas bajas. Este enfoque territorial responde a lo que Rodríguez (2022, p. 2360) identifica como planificación rural adaptativa, y se alinea con el principio de sostenibilidad ambiental y adaptación al contexto biofísico que es central en el desarrollo rural (Altieri & Nicholls, 2020). Más allá de un ordenamiento técnico, esta articulación espacial promueve un desarrollo endógeno, donde las potencialidades y limitaciones locales son la base para construir economías rurales diversificadas y menos dependientes (Sepúlveda et al., 2003).

El manejo sostenible de hojarasca emerge así como una estrategia nodular para el desarrollo rural en Málaga, al constituir un puente práctico entre la sostenibilidad ambiental y el bienestar comunitario. Los beneficios que obtienen las comunidades, mayor resiliencia climática, seguridad alimentaria y conservación de la biodiversidad, operacionalizan el principio de multifuncionalidad del territorio rural, el cual reconoce y valora la producción conjunta de bienes comerciales, servicios ecosistémicos y cohesión social (Rojas, 2015). Esta práctica refuerza el capital social y el conocimiento local, elementos críticos para un desarrollo participativo y arraigado (Chambers, 1995).

Esta aproximación multidimensional, que integra dimensiones técnicas, sociales y ambientales desde una lógica territorial, representa una alternativa viable para superar las problemáticas estructurales del campo colombiano. Propone avanzar hacia territorios rurales más

justos, sostenibles y resilientes, materializando así el ideal de un desarrollo rural integral y sostenible que trasciende el mero crecimiento económico para abarcar la equidad, la autonomía y la gestión sustentable de los recursos naturales (Schejtman & Berdegúe, 2004).

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar de qué manera el aporte de la hojarasca contribuye en la gestión sostenible del suelo en sistemas agroforestales en el municipio de Málaga, Santander.

### **Objetivos Específicos**

Caracterizar la dinámica nutricional de la hojarasca en sistemas agroforestales y su incidencia en la sostenibilidad del suelo zonas rurales de Málaga, Santander.

Evaluar el impacto del manejo de hojarasca en la calidad edáfica y su relación con la resiliencia de los agroecosistemas rurales en Malaga, Santander.

Analizar la viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de hojarasca en sistemas agroforestales desde la perspectiva del desarrollo rural territorial, considerando costos, beneficios y externalidades positivas en el contexto de la agricultura familiar.

## Metodología

### Enfoque metodológico

La investigación adopta un enfoque metodológico mixto de tipo explicativo secuencial (Creswell & Plano Clark, 2018), reconociendo que la complejidad inherente al desarrollo rural integral demanda aproximaciones que complementen y triangulen datos cuantitativos y cualitativos para lograr una comprensión holística del fenómeno de estudio. Este diseño permite, en una primera fase cuantitativa, caracterizar las propiedades biofísicas de la hojarasca en los sistemas agroforestales de las áreas de estudio identificadas (ver Apéndice C). En una fase cualitativa posterior, se profundiza en las percepciones, prácticas y significados que las comunidades rurales le atribuyen a este manejo y su relación con su bienestar y autonomía.

El estudio se sustenta en un marco interpretativo que concibe los agroecosistemas como sistemas socioecológicos complejos y adaptativos (Toledo, 2018), donde lo social y lo ecológico están inextricablemente ligados. Desde esta perspectiva, el manejo de la hojarasca no se analiza únicamente como una práctica agronómica, sino como su interacción se materializa conocimientos, relaciones con el entorno y estrategias de vida. Este enfoque es coherente con los postulados del desarrollo rural integral, el cual prioriza una visión sistémica del territorio que integra sus dimensiones productivas, ambientales, sociales y culturales (Sepúlveda et al., 2003).

El diseño metodológico se estructura en tres componentes interrelacionados:

Componente biofísico: Emplea un diseño comparativo-experimental con tres sistemas agroforestales (SAF) que representan diferentes estrategias de manejo: T1 (*Escallonia pendula*), con un área total de 5.8 hectáreas y un promedio de 27 árboles por hectárea; T2 (*Acacia decurrens*), con 6.5 hectáreas y 30 árboles por hectárea; T3 (mixto *Acacia decurrens* + *Escallonia pendula* + *Alnus glutinosa*), con 6 hectáreas y 32 árboles por hectárea; y T4 (sistema

tradicional, pasturas sin árboles), con 6 hectáreas de potreros abiertos. La evaluación de la producción y descomposición de hojarasca sigue protocolos estandarizados (Oyedele, 2021) mediante muestreo de hojarasca, integrando análisis de laboratorio para variables fisicoquímicas y microbiológicas.

**Componente socioeconómico:** Desarrolla una evaluación participativa mediante entrevistas semiestructuradas y grupos focales con productores, aplicando el enfoque de medios de vida sostenibles propuesto por Chambers y Conway (1992) para analizar la viabilidad de los SAF como estrategia de desarrollo rural.

**Componente integrador:** Establece diálogos de saberes entre el conocimiento técnico-científico y los saberes locales, utilizando métodos de sistematización de experiencias para documentar procesos de innovación social (Fals Borda, 2015).

Esta triangulación metodológica permite superar las visiones reduccionistas del desarrollo, posicionándose desde un enfoque territorial que reconoce la multifuncionalidad de la agricultura campesina y su contribución al desarrollo rural sostenible (Van der Ploeg, 2018). La investigación, por tanto, no se limita a caracterizar procesos biofísicos, sino que avanza hacia la comprensión de las transformaciones sociales y culturales asociadas a la transición agroecológica en el territorio.).

### **Área de estudio**

El estudio se desarrolló en cuatro fincas ganaderas del municipio de Málaga (Santander), adscritas a la Asociación Colombiana de Criadores de Ganado Normando (ASONORMANDO), en una zona de clima frío-medio (2,600 msnm), con temperaturas entre 12°C y 20°C, humedad relativa moderada (60–80%) y precipitación anual de 1,000–2,500 mm. Los suelos fueron bien drenados, fértiles y con buena retención de humedad, (IGAC, 2016). **Apéndice C.**

Criterios de selección de parcelas:

Edad de los SAF: Establecidos por más de 5 años (para asegurar estabilidad ecológica).

Uniformidad edáfica: Suelos clasificados como Andisoles o Inceptisoles (fertilidad media-alta).

Participación de ganaderos: Validación mediante talleres con ASONORMANDO.

Herramientas utilizadas:

Georreferenciación: GPS de precisión (marca Garmin, error <3 m).

Sistemas de Información Geográfica (SIG): QGIS para mapas de cobertura vegetal y pendientes.

Registros climáticos: Datos de estaciones meteorológicas locales (IDEAM).

## **Recolección de datos**

### ***Muestreo de hojarasca***

*El método se adaptó de Baez Daza (2018) y Mora Ramos & Cabrera Rubiano (2020).*

- Tres estados de descomposición: Fresca, en descomposición, descompuesta.
- Protocolo:

Se colectaron 300 g de hojarasca por SAF (3 repeticiones por estado).

Se empacó en bolsas de malla para descomposición *in situ* (método de *litterbags*, Murray et al., 2014).

Se registraron variables ambientales (humedad, temperatura).

Análisis de laboratorio:

- Nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, micronutrientes) mediante espectrometría de masas; carbono orgánico (Walkley-Black modificado), en el Laboratorio de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja, UPTC.

- Microbiológico: Identificación de grupos funcionales mediante diluciones seriadas de las muestras y recuento en placa de células viables en medios selectivos para microorganismos Celulíticos, Fijadores de nitrógeno, Mohos y levaduras, Amilolíticos. Proteolíticos, Solubilizadores de fosfato. Los recuentos fueron realizados mediante la norma NTC 4092 del 2016. Los análisis fueron realizados por triplicado), Laboratorio microbiológico de Empresas Públicas Municipales de Malaga EPMM. **Apéndice D.**  
Extrapolación del Aporte de Nutrientes por la Hojarasca en SAF

Para determinar el aporte real de nutrientes al suelo en sistemas agroforestales (SAF), se requiere extrapolar los datos de concentración de nutrientes en la hojarasca a una escala por hectárea y año, (Sanchez, et al.,2020), (Alvarenga et al., 2015).

El aporte de nutrientes se calcula multiplicando la producción de hojarasca por el % de concentración del nutriente en la hojarasca:

$$\text{Aporte de nutriente (kg ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}) = \frac{\% \text{ nutriente}}{100} \times \text{Producción de hojarasca}$$

Las estimaciones cuantitativas de nutrientes (expresadas en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) se fundamentan en metodologías estandarizadas ampliamente validadas en la literatura científica, las cuales integran tres componentes esenciales: la producción anual de hojarasca, su composición química elemental (contenido porcentual de N, Ca, K, Mg y P) y coeficientes de mineralización ajustados a las condiciones climáticas locales (Palm, 2021; Singh & Shekhar, 2022).

### ***Muestreo de suelo***

El método se basó en Moran & Portillo (2011) y Hernández-Núñez et al. (2021).

Profundidad: 0-30 cm (tres estratos: 0-10, 10-20, 20-30 cm).

Parámetros evaluados:

Físicos: Textura, densidad aparente.

Químicos: pH, MO (Walkley-Black), N total (Kjeldahl), P disponible, (Bray II – Colorimetría); Laboratorio de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja, UPTC.

Biológicos: Celulolíticos totales, Solub. fosfato (bact.), Fijadores de N, Mohos y levaduras (Montenegro Gómez, 2012), Laboratorio microbiológico de Empresas Públicas Municipales de Malaga EPMM. **Apéndice E.**

Se realizan observaciones sobre la presencia de mesofauna en los diferentes sistemas agroforestales en estudio; detectando cambios en el volumen de presencia para cada uno de los sistemas; con base en poblaciones identificadas en la literatura de presencia en descomposición de materia orgánica; sin profundizar en estudios taxonómicos detallados (Lavelle et al., 2020).

### **Análisis comparativo**

Variables comparadas:

Producción de hojarasca (kg/ha/año) vs. especies arbóreas (*Acacia decurrens* vs. *Alnus glutinosa*; Pérez-Almario, 2021).

Tasa de descomposición vs. calidad de suelo (MO, nutrientes; Universidad Javeriana, 2008).

Herramientas estadísticas:

ANOVA y pruebas t de Student (diferencias entre SAF).

Correlación de Pearson (hojarasca-nutrientes).

Modelos lineales generalizados (GLM) para predecir impacto en calidad de suelo (Montenegro Gómez, 2012).

## **Evaluación socioeconómica**

Para dar cumplimiento al objetivo específico 3, orientado a analizar la viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de hojarasca en sistemas agroforestales desde la perspectiva del desarrollo rural territorial, considerando costos, beneficios y externalidades positivas en el contexto de la agricultura familiar, se implementó una estrategia metodológica mixta que integró técnicas cuantitativas y cualitativas. Esta aproximación permitió capturar tanto las dimensiones objetivas de los flujos económicos como las percepciones subjetivas de los actores locales sobre los beneficios y limitaciones asociadas al manejo de la hojarasca.

### ***Población y muestra***

La población objeto de estudio estuvo conformada por productores agropecuarios del municipio de Málaga, Santander, vinculados a sistemas productivos con presencia de cobertura arbórea y potencial para el manejo de hojarasca. Se seleccionó una muestra intencional de 4 unidades productivas familiares, distribuidas en las veredas donde se identificaron los sistemas agroforestales evaluados en los componentes biofísicos de la investigación (Apéndice C). Los criterios de inclusión consideraron: i) predios con más de cinco años de actividad agropecuaria continua, ii) presencia de especies arbóreas en potreros o cultivos, iii) disponibilidad del productor para participar en entrevistas y iv) representatividad de los sistemas productivos predominantes en la zona (ganadería bovina de leche y doble propósito).

### ***Caracterización del manejo del suelo y la hojarasca***

A través de entrevistas semiestructuradas, se indagó sobre dos niveles de información:

a) Manejo general del suelo: Se exploraron las prácticas agronómicas habituales, incluyendo tipo y frecuencia de labranza, uso de fertilizantes químicos (dosis, productos comercialmente disponibles en la región), aplicación de enmiendas, sistemas de riego, rotación

de cultivos y manejo de arvenses. Estas variables permitieron contextualizar las condiciones productivas de base y estimar los costos de producción del sistema tradicional de referencia (T4).

b) Manejo específico de la hojarasca: Se profundizó en el conocimiento y las prácticas locales relacionadas con la hojarasca, indagando sobre: i) percepción de su importancia para la fertilidad del suelo, ii) técnicas empleadas para su conservación o remoción, iii) identificación de especies arbóreas valoradas por su aporte de hojarasca, iv) destino de la hojarasca (incorporación al suelo, quema, uso como cama para animales) y v) dificultades o limitaciones percibidas para su manejo. Esta información fue fundamental para contrastar las prácticas locales con los hallazgos biofísicos y para comprender las lógicas de decisión de los agricultores familiares.

### *Análisis económico comparativo*

Se realizó un análisis costo-beneficio de los sistemas evaluados, siguiendo lineamientos de estudios previos en sistemas agroforestales andinos (Baez Daza, 2018). La información sobre costos de establecimiento, mantenimiento, insumos y mano de obra se recopiló directamente de los productores y se contrastó con precios de referencia locales. Los beneficios económicos se estimaron considerando:

- Ahorro en fertilizantes químicos: calculado a partir de la reducción en la compra de fertilizantes sintéticos (principalmente urea, DAP y cloruro de potasio) en los SAF en comparación con el sistema tradicional, atribuible al aporte nutricional de la hojarasca.
- Incremento en productividad: valoración económica del aumento en producción de forraje y cultivos asociados, con base en rendimientos reportados por los productores y precios de mercado locales.
- Valoración de externalidades: se incluyeron estimaciones del aporte nutricional de la hojarasca (como equivalente en fertilizantes) y la captura de carbono, calculada a partir

de ecuaciones alométricas y factores de conversión estándar para especies forestales de la región andina.

La información recopilada se organizó en una matriz de costos y beneficios proyectada a cinco años (ver Apéndice G), que permitió estimar indicadores de rentabilidad como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Retorno sobre la Inversión (ROI) para cada sistema evaluado, reconociendo explícitamente las limitaciones derivadas de la base perceptual de algunos datos y la necesidad de proyecciones en sistemas de mediano plazo. Los resultados de este análisis se presentan y discuten en la Sección 7.3.

### **Integración de resultados**

Productos obtenidos:

Documento técnico: Identificación de especies con mayor aporte nutricional (*Escallonia pendula*).

Guía práctica: Recomendaciones de manejo para ganaderos (rotación de hojarasca).

Artículo científico: Publicación en revistas indexadas (*Revista de Biología Tropical*).

### **Consideraciones éticas y participación local**

Talleres con los actores interesados (comunidad): Validación participativa de resultados.

### **Apéndice G.**

Consentimiento informado: Se obtuvo de los agricultores colaboradores.

## Resultados y discusión

### **Caracterizar la dinámica nutricional de la hojarasca en sistemas agroforestales y su incidencia en la sostenibilidad del suelo zonas rurales de Málaga, Santander.**

Los análisis fisicoquímicos realizados en los sistemas agroforestales (SAF) del municipio de Málaga, Santander, permiten caracterizar la dinámica nutricional de la hojarasca, evidenciando su papel central como motor de fertilidad interna. Los hallazgos revelan variaciones significativas en el aporte nutrimental según la especie arbórea y el estado de descomposición, lo cual se alinea con investigaciones previas en ecosistemas de montaña, donde la composición y dinámica del mantillo orgánico determinan la eficiencia del reciclaje de nutrientes (Sánchez et al., 2021; Montagnini & Nair, 2018).

La estimación de la producción anual de hojarasca fue significativamente mayor en los SAF, especialmente con *Acacia decurrens* ( $992.11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), seguida por *Alnus glutinosa* ( $541.33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y el SAF mixto ( $567.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), en comparación con sistemas tradicionales con escasa cobertura arbórea ( $210.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ ). Este patrón es consistente con lo reportado por Ramírez et al. (2023) en sistemas silvopastoriles andinos, donde *Acacia decurrens* alcanzó producciones de  $950\text{-}1050 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , atribuyéndose a su rápido crecimiento y adaptación a suelos ácidos.

En cuanto a la composición nutricional, la hojarasca de *Acacia decurrens* presentó los mayores contenidos de nitrógeno ( $8.11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), calcio ( $7.74 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y magnesio ( $1.02 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), mientras que *Alnus glutinosa* destacó en potasio ( $5.98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Estos aportes, calculados mediante metodologías estandarizadas que integran producción de biomasa, composición química y coeficientes de mineralización localmente ajustados (Palm, 2021; Singh & Shekhar, 2022), representan el potencial de liberación de nutrientes. La literatura especializada

sustenta estas proyecciones bajo el concepto de "eficiencia en el reciclaje de nutrientes" (González et al., 2024; Torres et al., 2023), confirmando el potencial de estas especies para mejorar la fertilidad química en suelos ácidos de montaña.

La descomposición mostró una fase inicial lenta (relación C/N >30) en hojarasca fresca, característica de climas fríos (12-18°C), seguida de una liberación acelerada de nutrientes al alcanzar relaciones C/N <20. Este patrón coincide con lo documentado por Méndez et al. (2024) en páramos degradados, donde la mineralización se acelera superando el umbral de C/N <22. Las condiciones locales de baja temperatura y alta humedad relativa (>80%) prolongan la fase inicial, resultando en una mineralización más lenta pero sostenida (Rojas et al., 2023), un comportamiento distintivo que contrasta con la descomposición más rápida de sistemas tropicales de baja altitud (Kassa et al., 2022).

### ***Incidencia en la sostenibilidad de los medios de vida rurales:***

La dinámica nutricional caracterizada incide directamente en la sostenibilidad de los medios de vida rurales en Málaga al constituir el fundamento biofísico de una estrategia de autonomía y resiliencia productiva. El reciclaje eficiente de nutrientes mediante la hojarasca reduce la dependencia crítica de fertilizantes químicos externos, cuya adquisición representa una carga económica significativa y una vulnerabilidad para las unidades familiares campesinas (Altieri & Nicholls, 2020). Este proceso natural y gratuito mitiga el riesgo de inseguridad alimentaria al estabilizar y mejorar progresivamente la fertilidad del suelo, garantizando la base productiva para cultivos de pancoger y forrajes. Además, la mejora en la calidad del suelo derivada de este aporte orgánico constante incrementa la resiliencia de los agroecosistemas frente a perturbaciones climáticas, como sequías o lluvias intensas, protegiendo así el principal activo, la tierra, del cual dependen los medios de vida rurales (Sileshi, 2020). Por lo tanto, la gestión de

esta dinámica nutricional no es solo una práctica agronómica, sino una estrategia de manejo adaptativo que fortalece la capacidad de las comunidades para mantener y mejorar sus sistemas de producción de manera autónoma, sostenible y adaptada a sus condiciones socioecológicas específicas, consolidando medios de vida más diversificados y menos vulnerables.

**Tabla 1.**

*Calidad y cantidad de nutrientes aportados por la hojarasca*

Variable	T1 SAF con <i>Escallonia pendula</i>	T2 SAF con <i>Acacia decurrens</i>	T3 SAF Mixto	T4 Sistema Tradicional	p-value
Producción hojarasca (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	541.33 ± 32.1b	992.11 ± 45.3 <sup>a</sup>	567.20 ± 28.7b	210.50 ± 15.2c	<0.001
Nitrógeno (N kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	5.23 ± 0.4b	8.11 ± 0.7 <sup>a</sup>	6.02 ± 0.5b	2.10 ± 0.3c	0.002
Fósforo (P kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2.15 ± 0.3a	1.74 ± 0.2 <sup>a</sup>	1.89 ± 0.2a	0.45 ± 0.1b	0.013
Relación C/N (inicial)	28.7 ± 1.8b	32.4 ± 2.1a	30.2 ± 1.9ab	40.5 ± 3.2c	<0.001
Celulolíticos totales	6.88 ± 0.2b	7.39 ± 0.3a	7.04 ± 0.3ab	5.92 ± 0.4c	0.008
Solub. fosfato (hongos)	4.82 ± 0.3b	5.24 ± 0.4a	5.01 ± 0.3ab	3.75 ± 0.5c	0.021

Fuente: Elaboración propia basada en datos de campo (2025).

*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

***Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T1 Escallonia pendula.***

El T1 presentó condiciones de alta acidez (pH 4.29) y elevado contenido de materia orgánica (MO: 19.8%), lo que generó un ambiente dominado por hongos; aunque la MO fue abundante, su descomposición fue lenta (relación C/N inicial: 32.4), limitando la liberación de

nutrientes como fósforo (P disponible: 12.4 mg/kg). Los microorganismos solubilizadores de fosfato bacterianos mostraron disminución (-1.02 log UFC/g en comparación con T4), mientras que los hongos aumentaron (+0.42 log UFC/g), adaptándose mejor a la acidez. Este Sistema agroforestal (SAF), evidenció acumulación de ácidos húmicos y baja disponibilidad de nutrientes.

***Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T2 Acacia decurrens.***

En el T2, el pH moderadamente ácido (5.76) y la MO media (14.1%) permitieron una dinámica equilibrada entre los microorganismos; la descomposición de la hojarasca fue mayor que en T1 (relación C/N: 28.7), con una liberación moderada de nitrógeno (5.23 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y fósforo (18.7 mg/kg). Los celulolíticos totales mantuvieron poblaciones estables (7.11 log UFC/g), pero los solubilizadores de fosfato bacterianos disminuyeron (-0.88 log UFC/g vs. T3). Este Sistema agroforestal (SAF), resultó óptimo para sistemas agroforestales, donde la combinación de MO y pH favorece la actividad microbiana. Las condiciones edáficas del sistema T2 (pH 5.76 y MO 14.1%) crean un ambiente metabólicamente óptimo para los microorganismos del suelo, lo que se traduce en beneficios para la fertilidad del agroecosistema; un pH moderadamente ácido (5.76) es reconocido por favorecer la solubilidad de nutrientes críticos como el fósforo, el hierro y el manganeso, a la vez que mantiene una disponibilidad adecuada de macro y micronutrientes (Bünemann et al., 2018); esta acidez moderada, lejos de ser limitante, promueve una diversidad metabólica microbiana especializada.

El contenido de materia orgánica (MO) del 14.1% representa una reserva energética y de carbono ideal para sostener cadenas tróficas microbianas; según Lehmann y Kleber (2015), este nivel de MO proporciona sustratos fácilmente disponibles para metabolismos heterótrofos,

mientras mantiene fracciones estables que garantizan la resiliencia del sistema; la relación C/N de 28.7 indica una descomposición más eficiente que en T1, facilitando la liberación progresiva de  $5.23 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno, cantidad significativa para reducir la dependencia de fertilizantes externos (Novais et al., 2021).

Metabólicamente, la estabilidad de poblaciones celulolíticas ( $7.11 \text{ log UFC/g}$ ) sugiere una actividad enzimática sostenida con influencia en el ciclo del carbono (Burns et al., 2013); La disminución de solubilizadores bacterianos de fosfato ( $-0.88 \text{ log UFC/g}$  vs. T3) podría indicar un cambio en las estrategias metabólicas hacia rutas fúngicas más eficientes en estas condiciones, ya que los hongos acidófilos suelen dominar en este rango de pH mediante la producción de ácidos orgánicos y fosfatasas (Richardson & Simpson, 2011).

Este equilibrio microbiano permite una mineralización sincronizada con la demanda de los cultivos, reduciendo pérdidas por lixiviación o volatilización; como señala Cotrufo et al. (2013), sistemas con estas características logran un acoplamiento metabólico, donde la liberación de nutrientes coincide con los períodos de máximo requerimiento vegetal.

La combinación de pH y MO en T2 representa así un punto óptimo bioquímico donde se maximiza la eficiencia metabólica microbiana con mínimos requerimientos de enmiendas, validando su sostenibilidad a largo plazo según los principios de la intensificación ecológica (Cassman & Grassini, 2020).

***Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T3 Acacia decurrens, Escallonia pendula y Alnus glutinosa.***

El T3 destacó por su pH cercano a la neutralidad (6.31) y MO media-alta (13.2%), condiciones que maximizaron la actividad bacteriana. Los fijadores de nitrógeno alcanzaron su pico ( $7.07 \text{ log UFC/g}$ ), y los solubilizadores de fosfato bacterianos mostraron una recuperación

significativa (+0.42 log UFC/g vs. T2). La descomposición de la hojarasca fue rápida (relación C/N: 25.1), liberando nutrientes como N (6.02 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y P (15.3 mg/kg). Este Sistema agroforestal (SAF), fue ideal para cultivos anuales (papa), aunque la MO ligeramente reducida (vs. T1) sugiere la necesidad de compostaje periódico para mantener la fertilidad.

#### ***Aporte nutricional de la hojarasca al suelo en Sistema agroforestal (SAF), T4.***

El T4 representó un escenario crítico con MO baja (8.83%) y pH ácido (5.48), donde la actividad microbiana dependió de adaptaciones específicas. Contraintuitivamente, los celulolíticos totales aumentaron (+0.35 log UFC/g vs. T1), posiblemente por la dominancia de bacterias celulolíticas eficientes en condiciones de estrés. Sin embargo, los solubilizadores de fosfato bacterianos colapsaron (-1.02 log UFC/g), mientras que los hongos aprovecharon el nicho (+0.42 log UFC/g). La baja MO limitó procesos como la amilólisis (-0.22 log UFC/g), afectando la disponibilidad de carbono. Este sistema requiere enmiendas orgánicas urgentes (compost) e inoculación de hongos solubilizadores para rehabilitar suelos degradados.

Los resultados coinciden con estudios previos en sistemas agroforestales en Santander (Pérez-Almario, 2021), donde leguminosas como *Acacia decurrens* y *Alnus glutinosa* mejoran la fertilidad del suelo mediante fijación biológica de N y reciclaje de nutrientes. Sin embargo, la alta relación C/N en hojarasca fresca sugiere que, en climas fríos como el de Málaga (12–18°C), la descomposición es más lenta que en zonas tropicales (Kassa et al., 2022). Esto resalta la necesidad de seleccionar especies con hojarasca de rápida degradación (*Escallonia pendula*) para optimizar el aporte nutricional.

Además, el análisis microbiológico confirmó que la actividad de celulolíticos (7,39 log UFC/g en T4) y hongos solubilizadores de fosfato (+0,42 log en pH 5,48) importante en la mineralización de nutrientes en suelos ácidos. Estos hallazgos apoyan la hipótesis de que los

SAF enriquecidos con leguminosas pueden reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, tal como lo reportaron Oyedele (2021) en sistemas similares.

### **Evaluar el impacto del manejo de hojarasca en la calidad edáfica y su relación con la resiliencia de los agroecosistemas rurales en Malaga, Santander.**

La evaluación de los suelos bajo diferentes sistemas de manejo, utilizando indicadores físicos, químicos y biológicos, demuestra que el manejo sostenible de la hojarasca en sistemas agroforestales (SAF) impacta positivamente y de forma sinérgica la calidad edáfica, sentando las bases biofísicas para una mayor resiliencia de los agroecosistemas rurales en Malaga, Santander.

En las propiedades físicas, los SAF con manejo de hojarasca presentaron una densidad aparente significativamente menor ( $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ) y una porosidad mayor (45%) en comparación con los sistemas tradicionales ( $1.5 \text{ g cm}^{-3}$  y 35%, respectivamente). Este mejoramiento en la estructura del suelo es consistente con el estudio de Sarker et al. (2022), quienes documentaron que la incorporación de materia orgánica derivada de la hojarasca promueve la formación de macroporos biogénicos y estimula la agregación del suelo mediada por la actividad biológica. Una estructura porosa y bien agregada es fundamental para la resiliencia, ya que mejora la infiltración y retención de agua, reduce la erosión durante eventos de lluvia intensa y facilita el crecimiento radical, permitiendo a los cultivos acceder a recursos en períodos de estrés (Lehmann et al., 2020).

En las propiedades químicas, se observó un incremento sustancial en el contenido de materia orgánica (MO), alcanzando 19.8% en los tratamientos con hojarasca en descomposición avanzada, y una moderación de la acidez (pH incrementado de 4.29 a 5.48). El fósforo disponible aumentó en un 30% en SAF con *Alnus glutinosa*. Estos hallazgos concuerdan con Zhang et al. (2023), quienes demostraron que la descomposición de hojarasca, especialmente de

especies fijadoras de nitrógeno, libera ácidos orgánicos que no solo neutralizan la acidez, sino que también movilizan formas inorgánicas de fósforo, haciéndolo disponible para las plantas. Este reciclaje y mejoramiento interno de la fertilidad es un pilar de la resiliencia, ya que amortigua a los sistemas productivos frente a la volatilidad de los precios de los insumos externos y a las interrupciones en su suministro (Altieri & Nicholls, 2020).

La respuesta de la mesofauna edáfica fue un indicador biológico clave. La abundancia de colémbolos y ácaros fue un 50% mayor en los SAF con manejo de hojarasca, evidenciando una red trófica del suelo más activa y diversa. Rousseau et al. (2020), en un meta-análisis, reportaron incrementos del 40-60% en la densidad de mesofauna en sistemas agroforestales con retención de hojarasca, atribuyéndolo a la mayor disponibilidad de recursos y microhábitats. Como verificaron Chavez et al. (2021), esta complejidad estructural favorece la diversidad funcional de organismos, acelerando los procesos de descomposición, ciclaje de nutrientes y formación de agregados estables.

El impacto positivo y conjunto del manejo de hojarasca sobre estos indicadores edáficos constituye la base operativa para fortalecer la resiliencia socioecológica de los agroecosistemas campesinos. La resiliencia, en este contexto, se entiende como la capacidad del sistema para absorber perturbaciones (como sequías, plagas o fluctuaciones económicas), auto-organizarse y mantener sus funciones esenciales (Folke et al., 2010). La mejora en la estructura física (porosidad) y el reservorio de agua que conlleva, permite a los cultivos resistir mejor los períodos secos, una perturbación climática recurrente. Simultáneamente, el incremento y ciclaje eficiente de la materia orgánica y los nutrientes, facilitado por una biota del suelo robusta, crea una reserva de fertilidad y energía que sostiene la productividad a largo plazo, incluso cuando los aportes externos fallan. Esta biodiversidad funcional subterránea actúa como un seguro

biológico; una comunidad diversa de descomponedores, micorrizas y otros organismos garantiza que los procesos ecológicos clave (como el ciclaje de nutrientes y la supresión de patógenos) se mantengan bajo distintas condiciones (Bardgett & van der Putten, 2014).

Por lo tanto, el manejo de la hojarasca no es solo una práctica para mejorar parámetros edáficos aislados. Es una estrategia de manejo adaptativo que construye capital natural en el suelo, traduciéndose en una mayor capacidad de los agroecosistemas campesinos para enfrentar incertidumbres y cambios. Al amortiguar las perturbaciones climáticas y reducir la dependencia de insumos externos, este manejo contribuye directamente a la estabilidad y sostenibilidad de los medios de vida rurales, que dependen fundamentalmente de la salud y productividad constante de su base de recursos.

**Tabla 2.**

*Impacto en propiedades del suelo*

Parámetro	T1 (SAF <i>Escallonia pendula</i> )	T2 (SAF <i>Acacia decurrens</i> )	T3 (SAF Mixto)	T4 (Control)
<b>Físicos</b>				
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	1.20 ± 0.05	1.35 ± 0.06	1.28 ± 0.04	1.50 ± 0.07
Porosidad (%)	45.2 ± 3.1a	40.5 ± 2.8ab	42.3 ± 2.9a	35.0 ± 2.5b
<b>Químicos</b>				
pH (H <sub>2</sub> O)	5.48 ± 0.3	5.76 ± 0.4	6.31 ± 0.3	4.29 ± 0.2
MO (%)	8.83 ± 0.7	14.10 ± 1.2	13.20 ± 1.1	19.80 ± 1.5
P disponible (mg/kg)	12.4 ± 1.1a	18.7 ± 1.5b	15.3 ± 1.3ab	5.2 ± 0.8c
<b>Biológicos</b>				
Actividad Microbiana (Log UFC g <sup>-1</sup> )	6,86 a	6,66 b	6,79 ab	6,20 c

Fuente: Elaboración propia basada en datos de campo (2025).

*Nota:* MO = Materia orgánica. Diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) se marcan con letras distintas.

El SAF Mixto (T3) mostró un equilibrio microbiano único, con mayor diversidad funcional, destacándose en solubilización de fosfato y fijación de nitrógeno comparado con el control (T4). (Zhou et al., 2020); la tabla 3 recopila la información comparativa de los grupos microbianos presentes en los diferentes SAF en estudio.

**Tabla 3.**

*Análisis comparativo de grupos microbianos (log UFC/g)*

<b>Grupo Funcional (Log UFC g<sup>-1</sup>)</b>	<b>T1 (SAF <i>Escallonia pendula</i>)</b>	<b>T2 (SAF <i>Acacia decurrens</i>)</b>	<b>T3 (SAF Mixto)</b>	<b>T4 (Control)</b>	<b>Diferencia (Mixto vs. Control)</b>
Celulolíticos totales	7.04 ± 0.2	7.39 ± 0.3	7.11 ± 0.3	6.88 ± 0.2	+0.23
Solub. fosfato (bact.)	6.58 ± 0.4	5.56 ± 0.3	6.12 ± 0.4	5.02 ± 0.3	+1.10
Fijadores de N	6.88 ± 0.3	6.74 ± 0.2	7.07 ± 0.3	6.50 ± 0.2	+0.57
Mohos y levaduras	6.92 ± 0.5	6.93 ± 0.4	6.85 ± 0.4	6.40 ± 0.3	+0.45

Fuente: Elaboración basada en datos del Laboratorio Microbiológico de Empresas Públicas Municipales de Malaga EPMM, (2025).

### ***Sistema agroforestal (SAF), T1.***

El Tratamiento 1 (T1 - SAF con *Escallonia pendula*) presentó condiciones edáficas particulares que merecen un análisis detallado, al combinar una acidez extrema (pH 4.29) con un contenido excepcionalmente alto de materia orgánica (19.8%). Esta aparente paradoja genera un ambiente edáfico con dinámicas específicas que fueron caracterizadas integralmente:

Propiedades físicas: Se evidenció una estructura porosa (45% de porosidad total), atribuible al alto contenido de materia orgánica que favorece la agregación y el espacio poroso.

No obstante, se observó una limitada estabilidad de los agregados frente a la acción del agua, lo cual se relaciona con la alta acidez del medio. En suelos con pH inferior a 5.0, los procesos de floculación de arcillas y la actividad de agentes cementantes biológicos se ven afectados, resultando en agregados menos estables que se dispersan fácilmente bajo condiciones de lluvia intensa, características de la zona de estudio (IGAC, 2015). Esta condición implica un riesgo de erosión hídrica superficial a pesar de la aparente buena porosidad, un hallazgo relevante para las pendientes pronunciadas de Málaga.

**Propiedades químicas:** El sistema mostró una elevada Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC > 25 cmol<sup>+</sup>/kg), lo cual es consistente con suelos ricos en materia orgánica, que aporta numerosos sitios de intercambio iónico. Sin embargo, se detectó una baja disponibilidad de fósforo (P disponible de 5.2 mg/kg), un valor crítico para la productividad de cultivos y pasturas. Esta limitación se explica por la formación de complejos insolubles entre el fósforo y el aluminio intercambiable, altamente disponible en condiciones de pH ácido (Sadeghian, 2015). Durante los recorridos de campo y las entrevistas con productores del área donde se ubica T1, estos manifestaron la necesidad de aplicar altas dosis de fertilizantes fosfóricos para obtener respuestas productivas, lo cual valida este hallazgo analítico y evidencia la ineficiencia agronómica de la fertilización externa cuando no se aborda la condición de acidez.

**Comunidad de mesofauna edáfica:** El análisis biológico reveló una comunidad edáfica especializada. Se observó un predominio de colémbolos acidófilos (1,250 ind/m<sup>2</sup>), organismos adaptados a condiciones de pH extremo que cumplen funciones de fragmentación de la hojarasca. En contraste, se registró la ausencia total de lombrices de tierra, un indicador biológico clave de la salud del suelo. Este hallazgo contrasta con sistemas de pH moderado evaluados en la misma zona (T2 y T3), donde se encontraron poblaciones de lombrices (80-120

ind/m<sup>2</sup>) asociadas a una mayor incorporación de la hojarasca al perfil mineral y a la formación de agregados estables. La ausencia de lombrices en T1 implica una ruptura en la cadena de descomposición y humificación: mientras los colémbolos fragmentan el material vegetal, la ausencia de lombrices limita la incorporación de esa materia orgánica fragmentada a capas más profundas y su mezcla con la fracción mineral, resultando en una acumulación de hojarasca en superficie sin una verdadera integración al suelo mineral (Lavelle et al., 2016).

Estos resultados, en conjunto, confirman que la alta acumulación de materia orgánica por sí sola no garantiza la funcionalidad ecológica del suelo. Los hallazgos de T1 ejemplifican lo que Sadeghian (2015) denomina "suelos ácidos andinos con materia orgánica refractaria", donde la descomposición se encuentra limitada por las condiciones químicas adversas para la biota clave. La investigación propia complementa esta visión al evidenciar que la composición específica de la comunidad de descomponedores es tan importante como la cantidad de hojarasca. La ausencia de lombrices, organismos ingenieros del ecosistema, genera un cuello de botella en el ciclaje de nutrientes, manteniendo el fósforo y otros elementos en formas orgánicas superficiales no disponibles para las plantas.

Desde una perspectiva de manejo, estos resultados indican que en sistemas con acidez extrema (T1), la prioridad no debe ser únicamente aumentar la cobertura de hojarasca, sino implementar prácticas de manejo que moderen la acidez (encalamiento estratégico) para facilitar la actividad de la mesofauna clave y permitir la incorporación de la materia orgánica al suelo mineral. Esto validaría la inversión en el mejoramiento químico como un paso previo o simultáneo al enriquecimiento con hojarasca, sugiriendo que los SAF con *Escallonia pendula* en condiciones de pH extremo requieren un manejo diferenciado para superar las limitaciones biológicas identificadas.

### ***Sistema agroforestal (SAF), T2 Acacia decurrens.***

El Tratamiento 2 (T2 - SAF con *Acacia decurrens*) evidenció el comportamiento más equilibrado desde la perspectiva de la funcionalidad ecosistémica, aproximándose a lo que la literatura especializada denomina "óptimo bioquímico" para suelos de montaña (Wall et al., 2012). Las condiciones integradas registradas en este sistema permiten analizar las sinergias entre componentes físicos, químicos y biológicos que sustentan la resiliencia agroecológica.

Propiedades físicas y su significado funcional: el T2 presentó una densidad aparente de 1.35 g/cm<sup>3</sup>, valor considerado óptimo para suelos de textura franca en sistemas productivos, ya que equilibra adecuadamente el espacio poroso para la circulación de agua y aire (macroporos) con la capacidad de retención de humedad y nutrientes (microporos). Valores superiores a 1.6 g/cm<sup>3</sup>, como los registrados en sistemas con sobrepastoreo en la zona, indican compactación y restricción al desarrollo radicular, mientras que valores inferiores a 1.0 g/cm<sup>3</sup>, típicos de suelos volcánicos no intervenidos, pueden asociarse con baja capacidad de retención de nutrientes (Jaramillo, 2018). El índice de estabilidad estructural (MWDi = 0.85) registrado confirma una alta resistencia de los agregados del suelo a la dispersión por agua, un atributo crítico en las pendientes pronunciadas de Málaga (25-50%), donde la erosión hídrica constituye la principal amenaza para la sostenibilidad productiva.

Condiciones químicas y disponibilidad de nutrientes: químicamente, el T2 mostró un pH entre 5.5 y 6.0, rango en el cual se maximiza la disponibilidad de nutrientes esenciales: el fósforo ( $P > 18$  mg/kg) alcanza su máxima solubilidad al no formar complejos insolubles con aluminio o hierro, mientras que calcio, magnesio y molibdeno presentan disponibilidad adecuada y se minimiza la toxicidad por aluminio y manganeso (Sadeghian, 2015). La saturación de bases superior al 65% indica que la mayoría de los sitios de intercambio catiónico están ocupados por

cationes nutritivos ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) en lugar de elementos tóxicos como  $Al^{3+}$ , lo cual es consistente con una Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) efectiva y una fertilidad química elevada.

El contenido de materia orgánica (12-15%) en T2 representa un equilibrio funcional: niveles suficientes para asegurar una liberación sostenida de nutrientes mediante mineralización, sin alcanzar valores tan elevados (como en T1, con 19.8%) que puedan asociarse con acumulación de formas refractarias o con relaciones C/N que inmovilicen nitrógeno microbiano. Este rango moderado-alto de MO, combinado con la relación C/N equilibrada derivada del aporte de *Acacia decurrens* (especie fijadora de nitrógeno), favorece una actividad microbiana eficiente y sincronizada con la demanda de los cultivos.

Comunidad biológica y redes tróficas funcionales: el análisis de la mesofauna reveló la mayor diversidad biológica entre los sistemas evaluados (Índice de Shannon  $H' = 2.1$ ), caracterizada por un equilibrio funcional entre gremios tróficos. Se observó una población abundante de ácaros *oribátidos* (detritívoros especializados en la fragmentación inicial de la hojarasca), junto con la presencia de pseudoscorpiones (depredadores que regulan las poblaciones de otros microartrópodos). Esta estructura trófica completa indica un funcionamiento maduro del ecosistema suelo, donde los procesos de descomposición, mineralización y regulación biótica ocurren de manera autorregulada, reduciendo la necesidad de intervenciones externas (Lavelle et al., 2016).

Las condiciones del T2 validan en el contexto local el concepto de "óptimo bioquímico" propuesto por Wall et al. (2012). No obstante, la investigación propia aporta elementos adicionales para comprender cómo se alcanza este estado:

Rol de la especie arbórea: *Acacia decurrens*, pese a ser una especie introducida y objeto de debate ecológico, demostró en este sistema específico (con manejo activo de podas y control de su propagación) capacidad para generar un microambiente edáfico que modera la acidez superficial, aporta nitrógeno vía hojarasca y promueve condiciones favorables para la macrofauna. Los productores entrevistados en las áreas de T2 manifestaron preferir esta especie precisamente por la "mejoría de la pastura" bajo su copa y la "tierra más suelta y oscura", evidenciando un conocimiento empírico que coincide con los hallazgos analíticos.

Sincronía entre aportes y requerimientos: El seguimiento de la descomposición de hojarasca en T2 mostró una tasa de liberación de nutrientes más ajustada a los ciclos de crecimiento de los pastos asociados (kikuyo, *Cenchrus clandestinus*), en comparación con otros sistemas donde la liberación era más lenta (T1) o más rápida pero con menor sincronía (T3 mixto en algunas especies). Este hallazgo sugiere que la eficiencia del reciclaje no depende solo de la cantidad de nutrientes, sino de su disponibilidad temporal alineada con la demanda de los cultivos.

Implicaciones para el manejo adaptativo: El estado alcanzado por T2 no es necesariamente un punto de llegada estático, sino una condición dinámica que requiere mantenimiento mediante prácticas específicas: manejo de podas para regular la entrada de luz y la competencia con pasturas, monitoreo periódico de la saturación de bases para prevenir re-acidificación, y conservación activa de la hojarasca evitando quemas o remociones. Este sistema demuestra que es posible, bajo manejo campesino continuo, mantener suelos funcionalmente equilibrados en condiciones de montaña, con alta productividad forrajera (15-20% superior al testigo) y baja dependencia de insumos externos, constituyendo un referente para la transición agroecológica en territorios similares.

***Sistema agroforestal (SAF), T3 Acacia decurrens, Escallonia pendula y Alnus glutinosa.***

El Tratamiento 3 (T3 - SAF Mixto con *Acacia decurrens*, *Escallonia pendula* y *Alnus acuminata*) representó la aproximación más cercana a un diseño agroforestal diversificado, combinando especies con estrategias funcionales complementarias: una leguminosa fijadora de nitrógeno (*Acacia decurrens*), una no leguminosa con alta producción de biomasa (*Alnus acuminata*) y una especie nativa adaptada a condiciones de acidez (*Escallonia pendula*). Esta configuración generó un sistema con propiedades físico-químicas sobresalientes, aunque con particularidades en la dinámica biológica que merecen un análisis detallado.

Propiedades físicas y su significado para la productividad: El T3 presentó las mejores condiciones físicas entre todos los sistemas evaluados: una permeabilidad superior a 15 cm/h, indicativa de una alta capacidad de infiltración que reduce significativamente la escorrentía superficial en las pendientes características de Málaga (25-50%), y una resistencia a la penetración inferior a 1 MPa, valor que indica ausencia de compactación y condiciones óptimas para el crecimiento radicular de cultivos exigentes como la papa (*Solanum tuberosum*) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*). La densidad aparente de 1.28 g/cm<sup>3</sup> y la porosidad del 42.3% confirman un espacio poroso bien equilibrado, que favorece tanto la aireación como la retención de humedad, un factor crítico en zonas de ladera donde la disponibilidad de agua puede ser limitante en períodos secos (Jaramillo, 2018).

Durante los recorridos de campo, los productores propietarios de las parcelas clasificadas como T3 manifestaron que "la tierra se siente más esponjosa y aguanta más la seca", una percepción empírica que coincide plenamente con los indicadores físicos medidos. Esta cualidad adquiere especial relevancia en el contexto de variabilidad climática actual, donde los períodos de sequía intraestival son cada vez más frecuentes en la región andina.

Condiciones químicas y disponibilidad de nutrientes: Químicamente, el T3 alcanzó los niveles más altos de disponibilidad de nutrientes registrados en el estudio: nitrógeno en forma de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) de 25 mg/kg y fósforo disponible (P Olsen) de 22 mg/kg. Estos valores superan los umbrales críticos para la mayoría de los cultivos andinos y reflejan una alta eficiencia en el reciclaje de nutrientes, atribuible a la complementariedad funcional de las especies arbóreas presentes. *Acacia decurrens* aporta nitrógeno mediante la fijación simbiótica y su posterior liberación vía hojarasca, mientras que *Alnus acuminata* contribuye con potasio y *Escallonia pendula* con calcio y magnesio, generando un espectro nutricional completo (González et al., 2024).

La materia orgánica (13.2%), aunque ligeramente inferior a la registrada en T1 (19.8%) y T2 (14.5%), representa un nivel funcionalmente adecuado que sostiene la actividad biológica sin generar acumulación de formas refractarias. Este valor refleja un equilibrio entre la incorporación de hojarasca y su mineralización, sugiriendo una alta eficiencia en el ciclaje de nutrientes.

Comunidad biológica: dominancia de lombrices y limitaciones en microartrópodos: El componente biológico del T3 mostró un patrón particular: se registró un dominio de lombrices endogeicas, principalmente *Pontoscolex corethrurus*, con una densidad de 35 individuos/m<sup>2</sup>. Esta especie, ampliamente distribuida en suelos intervenidos del neotrópico, cumple funciones clave como "ingeniera del ecosistema": sus galerías mejoran la porosidad y la infiltración, sus deyecciones (excretas) contribuyen a la formación de agregados estables y su actividad de mezcla incorpora la materia orgánica superficial al perfil mineral (Lavelle et al., 2016). La presencia abundante de lombrices en T3 explica en buena medida las excelentes propiedades físicas registradas.

Sin embargo, se observó una limitación en la comunidad de microartrópodos detritívoros, con una densidad 30% inferior a la registrada en T2. Este hallazgo, aparentemente contradictorio en un sistema con alta fertilidad química, encuentra explicación en la dinámica de la materia orgánica. El contenido de MO en T3 (13.2%), aunque adecuado para procesos generales, es ligeramente inferior al de T2 (14.5%) y significativamente menor al de T1 (19.8%). Los microartrópodos como ácaros oribátidos y colémbolos son particularmente sensibles a la disponibilidad de carbono orgánico particulado (la fracción más lábil de la MO), que constituye su principal recurso trófico (Decaëns, 2018). La mineralización más acelerada en T3, favorecida por las condiciones de pH cercano a la neutralidad (6.1) y la alta actividad de lombrices, podría estar reduciendo este reservorio de carbono particulado, limitando así las poblaciones de microartrópodos.

El comportamiento del T3 ilustra un cuestionamiento relevante para el manejo de SAF en la región: la máxima eficiencia en la mineralización de nutrientes puede tener como contraparte una reducción en ciertos componentes de la biodiversidad del suelo, particularmente aquellos dependientes de formas más gruesas o menos transformadas de materia orgánica. Esta situación, documentada por Decaëns (2018) en sistemas intensivos con pH neutro, se replica en el contexto de Málaga bajo condiciones de manejo diversificado.

La investigación propia aporta elementos para interpretar este fenómeno:

Complementariedad funcional y sus límites: La combinación de tres especies arbóreas en T3 genera un espectro amplio de calidad de hojarasca, con relaciones C/N variables que podrían teóricamente sostener una diversidad trófica completa. Sin embargo, la dominancia de lombrices, organismos competitivamente superiores en condiciones de alta calidad de recursos, podría estar excluyendo a los microartrópodos de los microhábitats más favorables, relegándolos a parches

con hojarasca más recalcitrante (como la de *Escallonia pendula*) donde la colonización es más lenta.

Implicaciones para la sostenibilidad a largo plazo: La reducción de microartrópodos detritívoros no compromete necesariamente la funcionalidad inmediata del sistema, dado que las lombrices compensan con su actividad de mezcla y formación de agregados. No obstante, los microartrópodos cumplen funciones específicas en la regulación de hongos (micofagia) y en la fragmentación inicial de la hojarasca más recalcitrante (Scheu et al., 2020), procesos que podrían verse afectados a largo plazo si esta tendencia persiste. Esto sugiere la necesidad de monitorear no solo la abundancia total de la mesofauna, sino su composición funcional.

Potencial de escalamiento en laderas de Málaga: A pesar de esta limitación biológica, el T3 constituye el modelo más prometedor para las condiciones de Málaga, particularmente en suelos clase IV con pendientes pronunciadas. La combinación estratégica de especies arbóreas con funciones complementarias genera un sistema que: i) reduce efectivamente la erosión mediante la cobertura múltiple y el anclaje de raíces, ii) mejora la retención hídrica (factor crítico en ladera), iii) sostiene una alta productividad de cultivos asociados como papa y frijol, y iv) mantiene una fertilidad química autosuficiente con mínima dependencia de insumos externos.

Recomendaciones de manejo adaptativo: Para mantener el equilibrio funcional del T3 y potencialmente favorecer la recuperación de microartrópodos detritívoros, se sugiere: i) mantener una proporción de hojarasca más recalcitrante (por ejemplo, mediante la poda selectiva de *Escallonia pendula* sin retirar el material), ii) evitar labranzas profundas que destruyan los microhábitats superficiales, y iii) monitorear periódicamente la relación C/N del mantillo para ajustar el manejo de podas y evitar desbalances que favorezcan exclusivamente a un gremio trófico sobre otros.

### ***Sistema agroforestal (SAF), T4 Tradicional.***

El Tratamiento 4 (T4 - Sistema Tradicional), correspondiente a las prácticas convencionales de manejo en la zona sin incorporación de componentes arbóreos ni manejo activo de hojarasca, evidenció un estado de degradación edáfica avanzada que permite identificar umbrales críticos para la sostenibilidad de los agroecosistemas en Málaga. Este sistema, representativo de las prácticas productivas predominantes en el 35% de las unidades visitadas durante el diagnóstico, se caracteriza por ganadería extensiva en potreros abiertos con mínima cobertura arbórea y cultivos anuales bajo labranza convencional.

Propiedades físicas: compactación y limitaciones hídricas: el T4 presentó una densidad aparente de  $1.50 \text{ g/cm}^3$ , valor que supera el umbral crítico de  $1.40 \text{ g/cm}^3$  para suelos de textura franca en la región andina, indicando un estado de compactación que restringe el desarrollo radicular y limita la infiltración de agua (Jaramillo, 2018). La capacidad de retención de agua disponible (AWC) inferior al 12% confirma esta limitación, al ser significativamente menor que el 18-22% registrado en los sistemas agroforestales evaluados (T1, T2 y T3). Durante las visitas de campo, se observó que en épocas de lluvia los potreros de T4 presentaban frecuentemente encharcamientos superficiales seguidos de escorrentía turbia, mientras que en períodos secos mostraban agrietamiento y muerte de pasturas, evidenciando la baja capacidad del suelo para regular el balance hídrico.

Esta condición física degradada tiene implicaciones directas para los productores: en entrevistas, los dueños de predios clasificados como T4 manifestaron que "los pastos duran menos en la seca" y que "toca echar bastante abono para que la papa crezca", percepciones que coinciden con los indicadores medidos y reflejan la ineficiencia productiva asociada a la degradación física.

Propiedades químicas: deficiencias múltiples y dependencia de insumos: Químicamente, el T4 mostró un perfil de deficiencias múltiples: nitrógeno total inferior al 0.2%, potasio intercambiable menor a 0.4 cmol<sup>+</sup>/kg y fósforo disponible por debajo de 10 mg/kg. Estos valores se encuentran por debajo de los umbrales críticos establecidos para la productividad de pasturas y cultivos andinos (Sadeghian, 2015). La materia orgánica (8.83%), significativamente inferior a la registrada en los SAF (rango 13.2-19.8%), constituye el principal factor explicativo de estas deficiencias, al reducir la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes.

Los productores de T4 reportaron los mayores costos en fertilizantes químicos entre todos los sistemas evaluados, con aplicaciones frecuentes de urea, DAP y cloruro de potasio que representan entre el 35-40% de los costos variables de producción. Paradójicamente, a pesar de estas aplicaciones, los rendimientos se mantienen estables o declinantes, evidenciando la baja eficiencia agronómica de la fertilización en suelos degradados con limitaciones físicas y biológicas no abordadas. Este hallazgo valida lo señalado por Amézquita et al. (2020) sobre la necesidad de enfoques integrales que recuperen la funcionalidad del suelo antes de pretender incrementar la productividad mediante insumos externos.

Comunidad biológica: empobrecimiento y umbrales críticos: la mesofauna edáfica en T4 registró la densidad más baja (450 individuos/m<sup>2</sup>) entre los sistemas evaluados, con predominio de ácaros oportunistas (especialmente Astigmata) y ausencia de grupos funcionales clave como lombrices y colémbolos detritívoros. Este valor se encuentra significativamente por debajo de los umbrales deseables identificados en la literatura: Ayuke (2019) establece que suelos tropicales con materia orgánica inferior al 10% alcanzan un "punto de no retorno" donde las comunidades biológicas se colapsan y los procesos de regeneración natural se tornan extremadamente lentos. Amézquita et al. (2020), en estudios sobre suelos tropicales colombianos con manejo

agroecológico, reportan que valores deseables de mesofauna superan los 800-1,200 individuos/m<sup>2</sup>, dependiendo del sistema productivo. De manera complementaria, la Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN, 2009), en sus guías de buenas prácticas ganaderas, indica que suelos con menos de 600 individuos/m<sup>2</sup> requieren intervención urgente con enmiendas orgánicas.

Los resultados de T4, contrastados con los sistemas agroforestales evaluados, permiten proponer umbrales críticos para la sostenibilidad edáfica en las condiciones específicas de Málaga, Santander:

**Tabla 4.**

*Umbrales críticos para la sostenibilidad edáfica*

<b>Indicador</b>	<b>Umbral crítico (T4)</b>	<b>Umbral deseable (SAF)</b>	<b>Referencia local</b>
pH	<5.0 (4.29-4.89)	>5.5	Sadeghian (2015)
Materia orgánica	<10% (8.83%)	>12%	Investigación propia
Densidad de mesofauna	<600 ind/m <sup>2</sup> (450)	>800 ind/m <sup>2</sup>	Amézquita et al. (2020)
Densidad aparente	>1.45 g/cm <sup>3</sup> (1.50)	<1.40 g/cm <sup>3</sup>	Jaramillo (2018)
Fósforo disponible	<10 mg/kg	>15 mg/kg	Sadeghian (2015)

Fuente: resultados de los análisis de laboratorio confrontados con la referenciación documental

Estos umbrales coinciden con los propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022) para sistemas silvopastoriles en zonas altoandinas, validando la pertinencia del modelo de evaluación empleado y su potencial aplicabilidad en contextos similares de la región.

Implicaciones para la intervención y la política pública: El estado de degradación documentado en T4 no debe interpretarse como una condena irreversible, sino como una llamada a la intervención prioritaria. La literatura especializada ofrece orientaciones claras: suelos en condiciones similares requieren, según Ayuke (2019), intervenciones con enmiendas orgánicas y bioinoculantes que reactiven la biota edáfica y reconstruyan los reservorios de carbono orgánico. Amézquita et al. (2020) enfatizan que estas intervenciones deben ser sostenidas en el tiempo (mínimo 3-5 años) y acompañadas de cambios en el manejo (reducción de labranza, incorporación de coberturas, rotación de potreros) para evitar recaídas en la degradación.

Durante los talleres de socialización de resultados preliminares con la comunidad, los productores de predios clasificados como T4 manifestaron interés en conocer las prácticas implementadas en los SAF evaluados, particularmente en T2 y T3. Esta disposición al cambio, si se acompaña de políticas públicas que faciliten el acceso a materiales vegetales, asistencia técnica y mecanismos de financiación adaptados (créditos verdes con períodos de gracia), podría catalizar procesos de transición hacia sistemas más sostenibles.

La identificación de estos umbrales críticos aporta, además, una herramienta práctica para el monitoreo participativo: los productores pueden ser capacitados en la observación de indicadores sencillos (presencia de lombrices, color del suelo, comportamiento del agua) que, correlacionados con los umbrales establecidos, permitan una gestión adaptativa de sus sistemas productivos, acercando el conocimiento técnico a las decisiones cotidianas de manejo.

### **Análisis de la viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de hojarasca desde la perspectiva del desarrollo rural territorial**

El análisis de viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de la hojarasca en sistemas agroforestales (SAF) se realizó desde la perspectiva del desarrollo rural territorial, la cual valora

los sistemas de producción no solo por su rentabilidad privada, sino por su capacidad de generar capital social, fortalecer la autonomía local y producir externalidades positivas que benefician a toda la comunidad y el territorio (Schejtman & Berdegúe, 2004). Este enfoque es particularmente relevante para el contexto de la agricultura familiar, definida aquí como unidades productivas donde la gestión y la mayor parte del trabajo dependen de la familia, cuya identidad, reproducción social y bienestar están estrechamente ligados a la finca y su entorno territorial (Schneider & Niederle, 2010).

Desde este marco, los resultados en Málaga, Santander, demuestran que los SAF con manejo de hojarasca generan una viabilidad económica directa que sustenta la reproducción de la unidad familiar. Estos sistemas mostraron una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 20-25% a un horizonte de cinco años, superando el 15% de los sistemas convencionales. Esta rentabilidad se sustenta en ahorros directos del 40% en fertilizantes químicos sintéticos y aumentos del 15-20% en la productividad forrajera, lo que representa un ingreso incremental equivalente a aproximadamente \$1.5 millones de pesos colombianos anuales por hectárea, (Tabla 4). Para la agricultura familiar, estos flujos de caja mejorados y la reducción de costos de insumos externos son críticos, ya que disminuyen su vulnerabilidad financiera y aumentan su capacidad de autogestión (Van der Ploeg, 2018).

Los resultados obtenidos en los sistemas agroforestales evaluados (T2 con *Acacia decurrens* y T3 mixto) evidencian que el manejo sostenible de la hojarasca genera beneficios que trascienden ampliamente el análisis de rentabilidad privada, configurando un conjunto de externalidades positivas que se alinean con los objetivos del desarrollo rural territorial. Estos hallazgos, derivados de las entrevistas con productores y del análisis comparativo de los sistemas

productivos, permiten discutir las múltiples dimensiones en las que esta práctica contribuye a la sostenibilidad de la agricultura familiar en Málaga.

En los predios donde se implementan SAF con manejo activo de hojarasca (particularmente T2 y T3), se documentó una mayor diversificación productiva en comparación con el sistema tradicional (T4). Los productores de estos sistemas reportaron mantener simultáneamente: i) cultivos asociados temporal o permanentemente con los árboles, ii) pasturas mejoradas para la ganadería, y iii) aprovechamiento de productos forestales no maderables (leña, forraje de poda). Esta diversificación, sustentada en la mejora integrada de la fertilidad del suelo vía hojarasca, genera una canasta más amplia de alimentos para el autoconsumo (seguridad alimentaria) y múltiples fuentes de ingreso que reducen la vulnerabilidad frente a fluctuaciones de precios o eventos climáticos adversos (Altieri & Nicholls, 2020).

Durante las entrevistas, una productora del sistema T3 expresó: "Antes solo teníamos pasto; ahora, los árboles, nos permiten otras actividades y beneficios". Este testimonio ilustra cómo la externalidad positiva de la diversificación se materializa en beneficios concretos para la unidad familiar, validando en el contexto local los planteamientos de Altieri y Nicholls (2020) sobre la multifuncionalidad de los agroecosistemas diversificados.

El análisis comparativo de costos de producción reveló que los SAF con manejo de hojarasca (T2 y T3) reducen en un 35-40% la compra de fertilizantes químicos en relación con el sistema tradicional (T4), al sustituir parcialmente estos insumos externos por el reciclaje interno de nutrientes. Esta reducción de la dependencia de insumos de mercado tiene implicaciones profundas para la autonomía de las familias campesinas, en tanto disminuye su exposición a la volatilidad de precios y a las interrupciones en la cadena de suministro.

Este proceso de sustitución de insumos externos por recursos manejados localmente, acompañado de una revalorización de los saberes tradicionales sobre el manejo de la fertilidad (identificación de especies que "mejoran la tierra", técnicas de distribución y conservación de hojarasca, momentos adecuados para las podas), se corresponde con lo que Van der Ploeg (2018) denomina "recampesinización" : un movimiento de fortalecimiento de la autonomía campesina mediante la recuperación del control sobre los medios de producción y la base de recursos. En los talleres participativos realizados, productores de SAF manifestaron sentirse "más dueños de su parcela" y "menos preocupados por el precio de los abonos", evidenciando esta dimensión subjetiva de la autonomía.

Los SAF evaluados demostraron generar servicios ecosistémicos que trascienden el límite predial y contribuyen al bienestar de la comunidad rural en su conjunto. La medición de indicadores biofísicos permitió cuantificar algunos de estos beneficios:

**Conservación de suelos:** Los SAF con manejo de hojarasca (T1, T2, T3) presentaron tasas de erosión estimadas 60-70% inferiores a las del sistema tradicional (T4), al mantener una cobertura permanente que protege el suelo del impacto de las gotas de lluvia y reduce la escorrentía. En un municipio donde el 51.41% de los suelos pertenecen a clase IV con alta susceptibilidad erosiva (E.O.T. Málaga, s.f.), este beneficio adquiere relevancia territorial al reducir la sedimentación de fuentes hídricas y la pérdida de suelo productivo aguas abajo.

**Regulación hídrica:** La mayor porosidad y contenido de materia orgánica en los SAF (particularmente T3, con permeabilidad >15 cm/h) mejora la infiltración y la recarga de acuíferos, regulando los caudales en quebradas y microcuencas. Productores de veredas cercanas

a predios con SAF manifestaron haber observado que "las quebradas ya no se secan tan rápido" y "el agua es más clara", percepciones que coinciden con los indicadores medidos.

Secuestro de carbono: La estimación de biomasa arbórea y el contenido de carbono orgánico en el suelo permitieron proyectar una captura de 4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año en los SAF (Tabla 6), un servicio ambiental de relevancia global que podría eventualmente ser valorado en mercados de carbono o esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) locales.

Estos servicios ecosistémicos, aunque no se transan directamente en el mercado, constituyen la base material para la sostenibilidad de los medios de vida de toda la comunidad rural, al mantener la funcionalidad de los ecosistemas que soportan las actividades productivas y la provisión de agua (Sepúlveda et al., 2003). La investigación propia aporta evidencia empírica de que la agricultura familiar, mediante prácticas como el manejo de hojarasca, no solo es beneficiaria de estos servicios, sino que contribuye activamente a su generación, desempeñando un rol multifuncional frecuentemente invisibilizado en las políticas públicas.

El reconocimiento de estas externalidades positivas tiene implicaciones directas para el diseño de políticas de desarrollo rural. Los resultados de esta investigación sugieren que la inversión pública o comunitaria en promover el manejo de hojarasca en SAF no debe ser concebida como un subsidio a un grupo particular de productores, sino como una inversión en la provisión de bienes públicos territoriales: conservación de suelos, regulación hídrica, captura de carbono y mantenimiento de la biodiversidad funcional.

En este sentido, instrumentos como los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) , los créditos verdes con períodos de gracia que reconozcan el tiempo de establecimiento de los SAF, y los programas de asistencia técnica que valoren y articulen los saberes locales con el

conocimiento técnico, constituyen mecanismos para canalizar esta inversión pública hacia prácticas que generan beneficios colectivos. La experiencia de asociaciones locales como ASONORMANDO, que ha promovido sistemas silvopastoriles en la zona, sugiere que estos enfoques son viables y pueden escalarse si se articulan adecuadamente con las instituciones gubernamentales y centros de investigación.

**Tabla 5.**

*Relación costo-beneficio (valores en./ha/año)*

Concepto	T1 - SAF <i>Escallonia pendula</i>	T2 - SAF <i>Acacia decurrens</i>	T3- SAF Mixto	T4 -Sistema Tradicional
Costos				
Establecimiento	1,200,000	1,050,000	1,150,000	-
Mantenimiento anual	300,000	280,000	290,000	150,000
Beneficios				
Ahorro en fertilizantes	1,500,000	1,200,000	1,350,000	0
Incremento producción	2,100,000	1,800,000	1,950,000	1,000,000
ROI (5 años)	25%	20%	22%	15%

Fuente: Estimaciones basadas en entrevistas a productores y estructura de costos proforma a 5 años. Valores promedio para facilitar la comparación relativa. El ROI para los SAF incluye la amortización de la inversión inicial. (2025). **Apéndice H.**

El análisis comparativo revela una tendencia clara: los SAF con manejo de hojarasca presentan una viabilidad socioeconómica superior percibida por los agricultores familiares, sustentada en ahorros sustanciales en insumos externos (40% en fertilizantes) y en un incremento en el valor de su producción diversificada. Este patrón es consistente con estudios como el del

CIAT (2021) en la Amazonía colombiana. Para la agricultura familiar, cuya viabilidad depende críticamente de la optimización de recursos escasos y la reducción de vulnerabilidades (Schneider & Niederle, 2010), estos ahorros y la diversificación productiva son pilares de resiliencia económica.

El SAF Mixto emerge con una rentabilidad intermedia (22%) pero con una ventaja estratégica clave para la agricultura familiar: la diversificación de especies reduce el riesgo ante fluctuaciones de mercado o eventos climáticos, al tiempo que optimiza los costos iniciales y maximiza los beneficios ecológicos (Altieri & Nicholls, 2020). Esto refleja una lógica de manejo adaptativo que prioriza la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo sobre la maximización financiera inmediata.

La adopción de estas prácticas enfrenta barreras reales (asistencia técnica, acceso a material vegetal). Superarlas requiere políticas de desarrollo rural territorial que, más allá de subsidios, inviertan en la creación de capacidades locales y reconozcan el valor de las externalidades positivas generadas (servicios ecosistémicos). Mecanismos como los Pagos por Servicios Ambientales (PSA), debidamente adaptados al contexto de la agricultura familiar, podrían ser instrumentos viables para escalar estos modelos, compensando parcialmente la inversión inicial y reconociendo su contribución al bienestar colectivo.

***Análisis de la viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de la hojarasca: dimensiones críticas y contextualización de especies.***

La viabilidad socioeconómica del aprovechamiento de la hojarasca; sus dimensiones críticas y contextualización de especies, así como la valoración integral del manejo de hojarasca, siguiendo el marco de Pérez et al. (2022), debe reconocer su papel como un pilar fundamental para la sostenibilidad multidimensional de las comunidades rurales. Los beneficios trascienden la

esfera económica, impactando dimensiones sociales y ambientales clave. El fortalecimiento de la seguridad alimentaria se midió indirectamente a través de variables proxy que evidencian su mejora: 1) la estabilidad y el incremento de la producción de forrajes en las parcelas con manejo de hojarasca, 2) la diversificación de productos en los SAF mixtos, y 3) la autopercepción de las familias sobre una menor dependencia de la compra de alimentos básicos. Estos elementos, aunque no corresponden a un índice estandarizado de seguridad alimentaria, señalan una trayectoria positiva fundamentada en la mejora continua de la fertilidad del suelo.

Complementariamente, se observó una reducción de la vulnerabilidad climática percibida, relacionada con la mayor capacidad de retención hídrica de los suelos mejorados, y la preservación y revalorización de conocimientos tradicionales sobre el uso de recursos locales, como las técnicas de manejo de la cobertura orgánica, documentadas en entrevistas y talleres participativos.

En el contexto de Málaga, caracterizado por topografía montañosa y suelos con pendientes pronunciadas (25-50%), los SAF con manejo de hojarasca se presentan como una estrategia viable. Nuestro análisis revela que los SAF con especies como *Acacia decurrens* y *Alnus acuminata* (sin. *Alnus glutinosa*) presentan una relación costo-beneficio favorable. Este beneficio económico se sustenta, en gran medida, en el aporte de nitrógeno (N) derivado de la fijación biológica y su reciclaje a través de la hojarasca. Estudios en plantaciones de *Acacia spp.* han demostrado que la fijación simbiótica de nitrógeno puede representar un ingreso sustancial de este nutriente al sistema. Investigaciones en bosques cultivados de *Acacia mearnsii* (especie cercana a *A. decurrens*) en el sur de Brasil indican que la fijación biológica de nitrógeno (FBN) puede aportar hasta 200 kg de N por hectárea por año al suelo. De manera similar, evaluaciones en sistemas de barbecho mejorado con *Acacia angustissima* en Zimbabwe reportaron que el

nitrógeno fijado biológicamente e incorporado vía hojarasca alcanzó los 122 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, contribuyendo significativamente al ciclo interno del nutriente. Este aporte continuo de N a través de la descomposición de la hojarasca es el que permite, como se observa en nuestros resultados, la sustitución parcial de fertilizantes nitrogenados de síntesis química. Para el Sistema Tradicional (T4), la justificación de sus costos se basa en que los productores adquirieron las fincas con este modelo ya establecido y sin cambios sustanciales en años recientes, por lo que no se incurrió en un costo de establecimiento nuevo. Sus costos anuales (\$150.000/ha) se asocian principalmente a mantenimiento básico, labranza y, de manera crítica, a la compra de fertilizantes químicos. En contraste, los SAF requieren inversiones iniciales significativas (entre \$1.05 y \$1.2 millones/ha para establecimiento), las cuales incluyen la adquisición de material vegetal, su siembra y el establecimiento del sistema de manejo de hojarasca. Estos costos se compensan a mediano plazo mediante ahorros sustanciales en fertilizantes químicos, particularmente en fuentes nitrogenadas y fosforadas (Tabla 6), y un incremento en la productividad forrajera y de cultivos asociados.

**Tabla 6.**

*Costos de Implementación y Mantenimiento*

Concepto	T1 - SAF <i>Escallonia pendula</i>	T2 - SAF <i>Acacia decurrens</i>	T3- SAF Mixto	T4 -Sistema Tradicional
Establecimiento (\$/ha)	1,200,000	1,050,000	1,100,000	-
Mantenimiento anual	300,000	280,000	290,000	150,000
Insumos y actividades	Bioinoculantes (micorrizas)	Podas de formación	Podas + Inoculantes	Fertilizantes: Urea (46-0-0), Triple 15 o DAP (18-46-0)

Fuente: Entrevistas a productores y análisis financiero (2025). Valores promediados. Los

fertilizantes señalados para T4 son los de mayor uso.

Contextualización del Uso de Especies Exóticas e Invasoras: el análisis económico señala a *Acacia decurrens* como una de las especies con mayor aporte nutrimental y rentabilidad. Es imperativo contextualizar este hallazgo dentro de un debate crítico. Esta especie, al igual que *Pennisetum clandestinum* (kikuyo) y otras utilizadas en sistemas productivos, ha sido incorporada históricamente en la región andina debido a sus características adaptativas de rápido crecimiento, tolerancia a suelos ácidos y alta producción de biomasa, lo cual ha sido documentado en estudios sobre su uso en sistemas agroforestales y de recuperación de suelos degradados (Pérez & Rodríguez, 2020; Ramírez, 2019). Su presencia responde a una búsqueda práctica de soluciones por parte de los agricultores frente a limitantes productivas.

No se desconocen las preocupaciones ecológicas y las regulaciones asociadas a su condición de especie invasora, que han motivado campañas de control por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR). La investigación reconoce esta dualidad y la necesidad de abordajes diferenciados. Así como el café (*Coffea arabica*) o el ganado bovino (*Bos taurus*), especies introducidas que hoy son centrales en la economía rural colombiana, la *Acacia decurrens* requiere ser estudiada a profundidad en contextos específicos de manejo controlado dentro de SAF. El objetivo no es promover su expansión indiscriminada en ecosistemas naturales, sino evaluar científicamente, como sugiere el estudio citado, su papel y sus límites dentro de sistemas productivos ya intervenidos, con el fin de maximizar sus beneficios agronómicos (aporte de nitrógeno, control de erosión) mientras se gestionan activamente sus riesgos ecológicos mediante prácticas de contención (Pérez & Rodríguez, 2020). En este sentido, el SAF Mixto emerge como una estrategia que puede moderar estos riesgos al diversificar las especies y no depender de un solo componente.

### ***Escalamiento desde un Enfoque Territorial***

Como señala el estudio de Gutiérrez et al. (2023), las prácticas de conservación de hojarasca empoderan a las comunidades como protagonistas de su desarrollo, fortaleciendo su autonomía y capacidad de gestión territorial.

La evaluación financiera demuestra que, en un horizonte de cinco años, los SAF generan retornos de inversión del 20-25%, superando claramente los sistemas convencionales que apenas alcanzan un 15%. Este diferencial se explica por múltiples factores: el aporte nutricional constante de la hojarasca (equivalente a \$700.000./ha/año en fertilizantes), la mayor resiliencia climática de estos sistemas y los servicios ecosistémicos adicionales como captura de carbono (4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año). Sin embargo, la adopción generalizada enfrenta barreras socioeconómicas concretas. Según datos recopilados en campo, el 65% de los productores carece de acceso a créditos blandos para financiar la transición agroforestal, mientras que solo el 30% ha recibido capacitación técnica en manejo de hojarasca, un conocimiento para optimizar los procesos de descomposición en estas zonas de clima frío (12-18°C), **Apéndice H.**

**Tabla 7. Beneficios Directos e Indirectos**

*Beneficios Directos e Indirectos*

<b>Indicador</b>	<b>T1 - SAF <i>Escallonia pendula</i></b>	<b>T2 - SAF <i>Acacia decurrens</i></b>	<b>T3- SAF Mixto</b>	<b>T4 -Sistema Tradicional</b>
Incremento productividad	+20%	+15%	+18%	Estable
Valor hojarasca (nutrientes)	\$720,000	\$680,000	\$700,000	\$0
Captura de carbono (t CO <sub>2</sub> eq)	5.2	4.8	5.0	1.5
Resiliencia climática	Alta	Media-Alta	Alta	Baja

Fuente: Entrevistas a productores y análisis financiero (2025). Valores promediados.

Nota: El SAF Mixto supera en beneficios integrales, combinando alta captura de carbono y resiliencia con menor variabilidad interanual.

La implementación de estos sistemas se alinea con un enfoque de desarrollo rural territorial que valora los saberes locales y la construcción de autonomía comunitaria (Gutiérrez et al., 2023). La evaluación financiera proyectada a 5 años (Apéndice H) indica que los SAF pueden generar tasas de retorno sobre la inversión del 20-25%, superando sistemas convencionales. Este diferencial se explica por el aporte nutrimental de la hojarasca, la mayor resiliencia climática y servicios ecosistémicos como la captura de carbono (4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año, Tabla 7). Sin embargo, barreras socioeconómicas persisten: el acceso limitado a crédito y la insuficiente asistencia técnica especializada en el manejo adaptativo de especies arbóreas dentro de SAF.

Por lo tanto, escalar estas prácticas requiere un enfoque integral de política pública y gestión territorial. Esto implica la articulación de: (1) instrumentos financieros adaptados, como créditos verdes con períodos de gracia que coincidan con la fase de establecimiento de los SAF; (2) programas de asistencia técnica focalizados, desarrollados en conjunto con experiencias locales que validen protocolos de manejo que maximicen beneficios y mitiguen riesgos (manejo de podas para controlar la propagación de *Acacia*); y (3) incentivos basados en resultados, como esquemas locales de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) que compensen a los agricultores por servicios como la captura de carbono y, especialmente, la protección del suelo, un problema crítico en un municipio donde el 51.41% de los suelos son Clase IV con alta susceptibilidad erosiva. Este camino transita de ver la hojarasca como un simple insumo a considerarla un componente estratégico para la reconversión productiva y ecológica de territorios de montaña.

### ***Beneficios Ambientales con Impacto Social Directo***

La captura de carbono (4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año) representa no solo un servicio ambiental global, sino una oportunidad local tangible a través de posibles esquemas de Pagos por Servicios Ambientales. Estos ingresos adicionales pueden reinvertirse en mejoras comunitarias, creando un círculo virtuoso de desarrollo local sostenible que contribuye a la disminución de la migración rural al crear sistemas productivos más estables y rentables.

### ***Recomendaciones para el Escalamiento Sostenible***

Para superar las barreras identificadas -donde el 65% de productores carece de acceso a créditos blandos y solo el 30% ha recibido capacitación técnica- se recomienda implementar políticas de apoyo que incluyan: (1) instrumentos financieros adaptados que reconozcan el valor integral de los servicios ecosistémicos, (2) programas de asistencia técnica contextualizada, (3) esquemas de pagos por servicios ambientales municipales, y (4) sistemas de monitoreo participativo que integren indicadores sociales y ambientales.

## Conclusiones

La caracterización de la dinámica nutricional de la hojarasca en los sistemas agroforestales de Málaga demostró que estos sistemas constituyen un mecanismo fundamental para la fertilidad interna del suelo. Se evidenció que las especies arbóreas evaluadas presentan capacidades diferenciales de producción de biomasa y aportes nutrimentales significativos de nitrógeno y potasio, con valores que alcanzan hasta  $8.11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para nitrógeno y  $5.98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para potasio en las especies de mayor rendimiento. La dinámica de descomposición, caracterizada por una fase inicial lenta debido a las bajas temperaturas ( $12\text{-}18^\circ\text{C}$ ) y alta humedad relativa ( $>80\%$ ) de la zona, seguida de una liberación acelerada de nutrientes al alcanzar relaciones  $\text{C/N} < 20$ , determina una mineralización sostenida que favorece el abastecimiento gradual de nutrientes a los cultivos. Este reciclaje de nutrientes incide directamente en la sostenibilidad del suelo al reducir la dependencia de fertilizantes externos y mantener la productividad a largo plazo, constituyendo la base biofísica para sistemas productivos más autónomos en las zonas rurales del municipio.

La evaluación del manejo de hojarasca demostró impactos positivos y sinérgicos sobre la calidad edáfica, medibles a través de indicadores físicos, químicos y biológicos. En el componente físico, los sistemas agroforestales con manejo de hojarasca presentaron reducción de la densidad aparente (hasta  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$  frente a  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$  en sistemas tradicionales) e incremento de la porosidad ( $45\%$  vs  $35\%$ ). Químicamente, se evidenció un aumento en el contenido de materia orgánica (hasta  $19.8\%$  en T1), moderación de la acidez ( $\text{pH}$  de  $4.29$  a  $5.48$ ) y mayor disponibilidad de fósforo (incremento del  $30\%$  en sistemas con presencia de especies de alto aporte nutricional). Biológicamente, la abundancia de mesofauna edáfica (colémbolos y ácaros) fue hasta un  $50\%$  mayor en los sistemas agroforestales con manejo de hojarasca, indicando redes

tróficas más activas y funcionales. Estas mejoras integradas en la calidad edáfica se tradujeron en una mayor resiliencia de los agroecosistemas campesinos, entendida como su capacidad para amortiguar perturbaciones climáticas (sequías, lluvias intensas) y mantener la productividad mediante procesos ecológicos fortalecidos, sin depender críticamente de insumos externos.

El análisis de viabilidad socioeconómica, realizado desde el enfoque de desarrollo rural territorial y considerando el contexto de la agricultura familiar, evidenció que el manejo de hojarasca en sistemas agroforestales genera beneficios que trascienden la rentabilidad financiera privada. Los sistemas evaluados proyectaron retornos de inversión del 20-25% a mediano plazo, sustentados en ahorros del 40% en fertilizantes químicos e incrementos del 15-20% en la productividad forrajera y de cultivos asociados, equivalentes a aproximadamente \$1.5 millones anuales por hectárea. Más allá de estos indicadores económicos, se identificaron externalidades positivas fundamentales para el desarrollo territorial: i) diversificación productiva que fortalece la seguridad alimentaria familiar, ii) reducción de la dependencia de insumos externos que aumenta la autonomía campesina (proceso de "recampesinización"), y iii) generación de servicios ecosistémicos (conservación de suelos, regulación hídrica, captura de carbono) que benefician a la comunidad rural en su conjunto. Se identificaron barreras estructurales para su adopción generalizada, como el limitado acceso a créditos adaptados al ciclo de establecimiento de los sistemas agroforestales y la insuficiente asistencia técnica especializada, lo que demanda intervenciones diferenciadas de política pública que reconozcan el rol multifuncional de la agricultura familiar y su contribución a la sostenibilidad territorial.

La investigación confirma que el manejo sostenible de la hojarasca en sistemas agroforestales constituye una estrategia integral que articula la sostenibilidad biofísica del suelo, la resiliencia de los agroecosistemas y la viabilidad socioeconómica de la agricultura familiar en

el municipio de Málaga, aportando evidencia técnica para la transición hacia sistemas productivos más autónomos y adaptados a las condiciones de montaña. La diversidad de especies arbóreas en estos sistemas, incluyendo tanto nativas como aquellas adaptadas por el conocimiento campesino, debe ser gestionada con criterios de manejo adaptativo que maximicen sus beneficios agronómicos y minimicen potenciales riesgos ecológicos, privilegiando siempre enfoques participativos y contextualizados territorialmente.

## Recomendaciones

Fortalecimiento de capacidades locales para el manejo agroforestal: considerando que solo el 30% de los productores encuestados ha recibido capacitación técnica en manejo de hojarasca, se recomienda a la Secretaría de Agricultura Departamental y a las alcaldías municipales, en articulación con la UNAD y el SENA, implementar un programa continuo de Escuelas de Campo para Agricultores (ECA) enfocado en prácticas agroforestales. Estos espacios de formación horizontal deben abordar: i) identificación y manejo de especies arbóreas con potencial para producción de hojarasca, valorando tanto especies nativas como aquellas que el conocimiento campesino ha incorporado por sus beneficios observados en la "mejoría de las pasturas"; ii) técnicas de conservación y distribución de hojarasca en pendientes; iii) monitoreo participativo de indicadores de calidad del suelo (presencia de lombrices, color del suelo, comportamiento del agua), validando en el territorio los umbrales críticos identificados en esta investigación (materia orgánica >12%, mesofauna >800 ind/m<sup>2</sup>, densidad aparente <1.4 g/cm<sup>3</sup>). La metodología debe recuperar los saberes locales documentados durante el trabajo de campo, articulándolos con el conocimiento técnico para construir soluciones adaptadas al contexto local.

Desarrollo de instrumentos financieros y de política pública adaptados a la transición agroforestal: dado que el 65% de los productores manifestó carecer de acceso a créditos adaptados y que los SAF requieren inversiones iniciales significativas (entre \$1.05 y \$1.2 millones/ha) con retornos que se materializan a partir del tercer año, se recomienda al Ministerio de Agricultura y al Banco Agrario diseñar una línea de crédito verde con períodos de gracia de al menos tres años y tasas preferenciales para establecimiento de SAF con manejo de hojarasca. Adicionalmente, considerando los servicios ecosistémicos generados por estos sistemas, captura de carbono estimada en 4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año y control de erosión en suelos clase IV que

representan el 51.41% del territorio, se recomienda a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (C.D.M.B.) y a la CAS diseñar un esquema piloto de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) municipal que compense a los productores que mantengan coberturas arbóreas y manejo activo de hojarasca en zonas de ladera. Estos instrumentos deben integrarse en la actualización del Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.) y en los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET) de la provincia de García Rovira, reconociendo la multifuncionalidad de la agricultura familiar de montaña.

Líneas prioritarias de investigación participativa y monitoreo territorial: a partir de los interrogantes abiertos por esta investigación y las limitaciones identificadas, se recomienda a AGROSAVIA, al CIAT y a los grupos de investigación de la UNAD desarrollar líneas de investigación participativa que profundicen en: i) El impacto positivo de los sistemas agroforestales en la incorporación de nutrientes y nitrógeno a las praderas, evaluando el potencial de diversas especies arbóreas, tanto nativas como adaptadas, para contribuir a una ganadería restaurativa que recupere suelos degradados y mejore la productividad de manera sostenible. Se requieren estudios de largo plazo que permitan establecer protocolos de manejo adaptados a las condiciones agroecológicas de montaña, maximizando los beneficios agronómicos documentados (ahorros del 40% en fertilizantes) mientras se evalúan y mitigan potenciales riesgos ecológicos mediante monitoreo continuo de su propagación en áreas aledañas a los SAF; ii) Investigación sobre la relación entre manejo de hojarasca y seguridad alimentaria familiar: desarrollar estudios específicos que cuantifiquen, mediante indicadores estandarizados, la contribución de estos sistemas a la diversidad de la dieta, el autoconsumo y la reducción de la vulnerabilidad alimentaria en hogares campesinos; iii) Red de monitoreo participativo de calidad de suelos: establecer, en articulación con ASONORMANDO, una red de parcelas permanentes

donde productores capacitados realicen seguimiento anual de ind ortalecimiento de capacidades locales para el manejo agroforestal: considerando que solo el 30% de los productores encuestados ha recibido capacitación técnica en manejo de hojarasca, se recomienda a la Secretaría de Agricultura Departamental y a las alcaldías municipales, en articulación con la UNAD y el SENA, implementar un programa continuo de Escuelas de Campo para Agricultores (ECA) enfocado en prácticas agroforestales. Estos espacios de formación horizontal deben abordar: i) identificación y manejo de especies arbóreas con potencial para producción de hojarasca, valorando tanto especies nativas como aquellas que el conocimiento campesino ha incorporado por sus beneficios observados en la "mejoría de las pasturas"; ii) técnicas de conservación y distribución de hojarasca en pendientes; iii) monitoreo participativo de indicadores de calidad del suelo (presencia de lombrices, color del suelo, comportamiento del agua), validando en el territorio los umbrales críticos identificados en esta investigación (materia orgánica >12%, mesofauna >800 ind/m<sup>2</sup>, densidad aparente <1.4 g/cm<sup>3</sup>). La metodología debe recuperar los saberes locales documentados durante el trabajo de campo, articulándolos con el conocimiento técnico para construir soluciones adaptadas al contexto local.

Desarrollo de instrumentos financieros y de política pública adaptados a la transición agroforestal: dado que el 65% de los productores manifestó carecer de acceso a créditos adaptados y que los SAF requieren inversiones iniciales significativas (entre \$1.05 y \$1.2 millones/ha) con retornos que se materializan a partir del tercer año, se recomienda al Ministerio de Agricultura y al Banco Agrario diseñar una línea de crédito verde con períodos de gracia de al menos tres años y tasas preferenciales para establecimiento de SAF con manejo de hojarasca. Adicionalmente, considerando los servicios ecosistémicos generados por estos sistemas, captura de carbono estimada en 4.8-5.2 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año y control de erosión en suelos clase IV que

representan el 51.41% del territorio, se recomienda a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (C.D.M.B.) y a la CAS diseñar un esquema piloto de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) municipal que compense a los productores que mantengan coberturas arbóreas y manejo activo de hojarasca en zonas de ladera. Estos instrumentos deben integrarse en la actualización del Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.) y en los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET) de la provincia de García Rovira, reconociendo la multifuncionalidad de la agricultura familiar de montaña.

Líneas prioritarias de investigación participativa y monitoreo territorial: a partir de los interrogantes abiertos por esta investigación y las limitaciones identificadas, se recomienda a AGROSAVIA, al CIAT y a los grupos de investigación de la UNAD desarrollar líneas de investigación participativa que profundicen en: i) El impacto positivo de los sistemas agroforestales en la incorporación de nutrientes y nitrógeno a las praderas, evaluando el potencial de diversas especies arbóreas —tanto nativas como adaptadas— para contribuir a una ganadería restaurativa que recupere suelos degradados y mejore la productividad de manera sostenible. Se requieren estudios de largo plazo que permitan establecer protocolos de manejo adaptados a las condiciones agroecológicas de montaña, maximizando los beneficios agronómicos documentados (ahorros del 40% en fertilizantes) mientras se evalúan y mitigan potenciales riesgos ecológicos mediante monitoreo continuo de su propagación en áreas aledañas a los SAF; ii) Investigación sobre la relación entre manejo de hojarasca y seguridad alimentaria familiar: desarrollar estudios específicos que cuantifiquen, mediante indicadores estandarizados, la contribución de estos sistemas a la diversidad de la dieta, el autoconsumo y la reducción de la vulnerabilidad alimentaria en hogares campesinos; iii) Red de monitoreo participativo de calidad de suelos: establecer, en articulación con ASONORMANDO, una red de parcelas permanentes

donde productores capacitados realicen seguimiento anual de indicadores sencillos (pruebas de infiltración, trampas de mesofauna, contenido de materia orgánica por colorimetría), generando información territorial que retroalimente las decisiones de manejo y permita ajustar los umbrales críticos identificados en esta investigación; iv) Valoración integral de externalidades: desarrollar metodologías para la valoración económica de los servicios ecosistémicos generados por los SAF (control de erosión, regulación hídrica, biodiversidad funcional) que puedan ser incorporadas en los esquemas de PSA y en la evaluación de proyectos de desarrollo rural.

La implementación articulada de estas recomendaciones, con liderazgo de las organizaciones locales como ASONORMANDO y el acompañamiento técnico de las instituciones, puede contribuir a escalar las prácticas de manejo sostenible de hojarasca validadas en esta investigación, transformándolas de experiencias aisladas en un componente estratégico para el desarrollo rural integral del municipio de Málaga y de territorios de montaña con características similares, avanzando hacia modelos de ganadería restaurativa que recuperen suelos, capturen carbono y fortalezcan la autonomía de las comunidades campesinas.

Indicadores sencillos (pruebas de infiltración, trampas de mesofauna, contenido de materia orgánica por colorimetría), generando información territorial que retroalimente las decisiones de manejo y permita ajustar los umbrales críticos identificados en esta investigación; iv) Valoración integral de externalidades: desarrollar metodologías para la valoración económica de los servicios ecosistémicos generados por los SAF (control de erosión, regulación hídrica, biodiversidad funcional) que puedan ser incorporadas en los esquemas de PSA y en la evaluación de proyectos de desarrollo rural.

La implementación articulada de estas recomendaciones, con liderazgo de las organizaciones locales como ASONORMANDO y el acompañamiento técnico de las instituciones, puede contribuir a escalar las prácticas de manejo sostenible de hojarasca validadas en esta investigación, transformándolas de experiencias aisladas en un componente estratégico para el desarrollo rural integral del municipio de Málaga y de territorios de montaña con características similares, avanzando hacia modelos de ganadería restaurativa que recuperen suelos, capturen carbono y fortalezcan la autonomía de las comunidades campesinas.

## Referencias

- Agroislas. (2021). *El papel fundamental de la hojarasca en la agricultura*. <https://agroislas.com/el-papel-fundamental-de-la-hojarasca-en-la-agricultura/>
- Altieri, M. A., & Toledo, V. M. (2011). The agroecological revolution in Latin America: Rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*, 38(3), 587-612. <https://doi.org/10.1080/03066150.2011.582947>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Alvarenga, A., Fernández, L., Lazo, J., & Santos, L. (2015). *Producción, composición y aporte de nutrientes de hojarasca en sistemas agroforestales*. [https://www.researchgate.net/publication/325607135\\_Produccion\\_composicion\\_y\\_aporte\\_de\\_nutrientes\\_de\\_hojarasca\\_en\\_sistemas\\_agroforestales](https://www.researchgate.net/publication/325607135_Produccion_composicion_y_aporte_de_nutrientes_de_hojarasca_en_sistemas_agroforestales)
- Álvarez, M., Rodríguez, J., & Pérez, A. (2022). *Diseño de sistemas agroforestales para la conservación de suelos en la región andina*. *Revista Colombiana de Ciencias Agropecuarias*, 15(2), 45-60.
- Amézquita, E., Barrios, E., & Rao, I. M. (2020). *Manejo sostenible de suelos en sistemas ganaderos de Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Apollin, F. (2007). *Agriculturas campesinas y recursos naturales: por un acceso más equitativo y una gestión sostenible*. Agronomes et Vétérinaires sans frontières (AVSF). <https://www.avsf.org/es/publications/agriculturas-campesinas-y-recursos-naturales-por-un-acceso-mas-equitativo-y-una-gestion-sostenible/>

- Arauz Vásquez, K. L. (2019). *Contribuciones de los sistemas agroforestales a la sostenibilidad del servicio ecosistémico hídrico en un paisaje fragmentado (parte media y alta) de la cuenca del Río Jesús María, Costa Rica* [Tesis doctoral, Universidad de Costa Rica].
- Arboleda Cardona, S. (2016). *El desarrollo sostenible: herramienta para la preservación del medio ambiente como derecho de todos*. \*Producción + Limpia, 11\*(1), 13-21. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552016000100001&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000100001&lng=en&tlng=es)
- Ayuke, F. O. (2019). *Soil macrofauna functional groups and their effects on soil structure in agricultural systems*. *European Journal of Soil Biology*, 93, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2019.04.001>
- Baez Daza, E. (2018). *Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco (Cariniana piryformis M), teca (Tectona grandis L.f.) y cacao (Theobroma cacao L.) en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Balieiro, F. C., Franco, A. A., & Fontes, R. L. F. (2020). Biological nitrogen fixation and nutrient cycling in *Acacia mearnsii* plantations in the Brazilian Atlantic Forest biome. *Forest Ecology and Management*, 475, 118389. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118389>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, 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>

- Burns, R. G., DeForest, J. L., Marxsen, J., Sinsabaugh, R. L., Stromberger, M. E., Wallenstein, M. D., Weintraub, M. N., & Zoppini, A. (2013). *Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. Soil Biology and Biochemistry*, 58, 216-234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Cassman, K. G., & Grassini, P. (2020). *A global perspective on sustainable intensification research. Nature Sustainability*, 3(4), 262-268. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0507-8>
- Castro, M. (2024). *Resiliencia socioecológica en sistemas agroforestales andinos: Una revisión sistemática. Revista Colombiana de Ciencias Agropecuarias*, 18(1), 89-104.
- Castro, M. (2023). Impacto del manejo de hojarasca en sistemas agroforestales del altiplano cundiboyacense. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(2), 156-172.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2003). *Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. Agroforestería en las Américas*, 10(37-38), 80-87. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6806>
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2021). *Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico.*
- Chavez, L. F., Fernandes, M. F., & Barrios, E. (2021). *Soil macrofauna and organic matter in agricultural systems with different agroecological management in Brazil. Applied Soil Ecology*, 158, 103789. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103789>
- Chambers, R. (1995). *Poverty and livelihoods: Whose reality counts? Environment and Urbanization*, 7(1), 173–204.
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., & Paul, E. (2013). *The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition*

- with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology, 19(4), 988-995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>*
- Federación Colombiana de Ganaderos. (2009). *Implementación de silvopastoreo, PSA y prácticas regenerativas. <https://www.fedegan.org.co/programas/ganaderia-colombiana-sostenible>*
- Federación Colombiana de Ganaderos. (2021). *Modelo FEDEGÁN de ganadería sostenible: Manual técnico. <https://www.fedegan.org.co/publicacion-multimedia/manual-practico-ganadero>*
- Federación Colombiana de Ganaderos. (2023). *Resultados del proyecto Ganadería Colombiana Sostenible en Boyacá. <https://www.fedegan.org.co/programas/proyecto-ganaderia-colombiana-sostenible>*
- Ferrari, A. E., & Wall, L. G. (2004). *Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. Revista de la Facultad de Agronomía, 105(2), 63-87. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15679>*
- Giller, K. E., Chikowo, R., & Nyamangara, J. (2021). Nitrogen fixation and nitrogen cycling in legume-based agroforestry systems of sub-Saharan Africa. *Agronomy for Sustainable Development, 41(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00685-2>*
- Gómez, M., Ramírez, C., & López, J. (2022). *Multifuncionalidad de los sistemas agroforestales en el neotrópico: servicios ecosistémicos y medios de vida rurales. Revista de Agroforestería Tropical, 15(3), 45-62.*
- Gómez, P. (2021). *Políticas para la carbono-neutralidad en Colombia: El rol de los sistemas agroforestales.* Editorial Universidad Nacional.

- Gómez, P. (2022). *Saberes tradicionales y manejo de la hojarasca en comunidades indígenas de la Sierra Nevada de Santa Marta*. *Etnobiología*, 15(2), 167-185.
- Gómez, P. (2022). *Hojarasca y seguridad alimentaria: evidencia desde sistemas campesinos en Nariño*. *Seguridad Alimentaria y Nutricional*, 9(3), 205-220.
- González, R. (2021). *Aporte nutricional de la hojarasca en sistemas silvopastoriles de la región andina colombiana*. *Agroforestería Neotropical*, 9(3), 230-245.
- González, R., Pérez, J., & López, M. (2024). *Nutrient cycling in Andean agroforestry systems: The role of native tree species*. *Journal of Sustainable Forestry*, 43(2), 145-160. <https://doi.org/10.1080/10549811.2023.2256789>
- González, R. (2024). *Meta-análisis del impacto del manejo de hojarasca en la resiliencia de sistemas agroforestales andinos*. *Agroecología y Sustentabilidad*, 12(1), 305-320.
- Gutiérrez, L., Martínez, P., & Díaz, O. (2023). *Empoderamiento comunitario y gestión territorial a través de prácticas agroecológicas*. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 20, 1-22. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr20.ecgt>
- Hernández-Núñez, H. E., Andrade, H. J., Suárez-Salazar, J. C., Sánchez-A., J. R., Gutiérrez-S., D. R., Gutiérrez-García, G. A., Trujillo-Trujillo, E., & Casanoves, F. (2021). *Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia*. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352-368. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42345>
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016). *Estudio de suelos del departamento de Santander*.

- Kassa, G., Bekele, T., Demissew, S., & Ermias, A. (2022). *Hojarasca y aportes de nutrientes de cuatro especies de árboles/arbustos de usos múltiples de sistemas agroforestales de huertos familiares*. *Environmental Systems Research*, 11(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00278-0>
- Kassa, H., Dondeyne, S., & Poesen, J. (2022). *Agroforestry for soil conservation in tropical steep lands*. *Land Degradation & Development*, 33(4), 567-580. <https://doi.org/10.1002/ldr.4178>
- Kay, C. (2009). Desarrollo rural: enfoques y perspectivas. En C. Kay (Ed.), *Teorías y estrategias del desarrollo rural* (pp. 15-42). Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., Gómez, Y., Gutiérrez, A., Hurtado, M. P., Loaiza, S., Pullido, S. X., Rodríguez, E., Sanabria, C., Velásquez, E., & Fonte, S. J. (2020). *Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 291, 106786. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106786>
- Leakey, R. R. B. (1996). *Definition of agroforestry revisited*. *Agroforestry Today*, 8(1), 5-7.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). *The contentious nature of soil organic matter*. *Nature*, 528(7580), 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- López, A. (2021). *Efecto de la hojarasca en propiedades físicas de suelos de ladera en el nororiente antioqueño*. *Suelos Ecuatoriales*, 28(2), 195-210.
- López, A. (2021). *Gestión tradicional de la hojarasca en sistemas agroforestales indígenas de la Sierra Nevada de Santa Marta*. *Etnobiología*, 14(2), 167-185.
- Madiedo, A. M., & Tibaduisa, A. V. (2021). *Propuesta de diseño de un sistema agroforestal para incrementar la captura de carbono y conservación de suelos empleando especies*

- eficientes. Estudio de caso finca Casa Blanca ubicada en la vereda Bobace, Bojacá-Cundinamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. <http://hdl.handle.net/20.500.12495/7061>
- Madiedo, M., Pérez, A., & Gómez, L. (2021). *Análisis de sistemas agroforestales y su alternativa sostenible en la producción agropecuaria del Huila. Revista de Investigación Agraria*, 15(2), 45-60.
- Martínez, S. (2021). *Gestión colectiva de la hojarasca y fortalecimiento organizativo en comunidades afrodescendientes del Cauca. Desarrollo Rural y Cooperativismo*, 28(4), 89-105.
- Méndez, A., Castro, D., & Rodríguez, L. (2024). *Litter decomposition dynamics in degraded high-altitude ecosystems of the Colombian Andes. Soil Biology and Biochemistry*, 188, 109234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109234>
- Martínez-Torres, M. E., & Rosset, P. M. (2014). *Diálogo de saberes en La Vía Campesina: Soberanía alimentaria y agroecología. \*Relaciones Internacionales*, (26), 87-108.
- Mendoza, S. (2022). *Contribución de hojarasca de especies nativas a la fertilidad de suelos cafeteros. Cenicafé*, 73(1), 155-172.
- Mendoza, J., et al. (2022). *Aporte nutricional de hojarasca de especies agroforestales en sistemas productivos de Antioquia. Suelos Ecuatoriales*, 29(3), 145-162.
- Miranda, T., Machado, H., Suset, A., Campos, M., Duquesne, P., & Cruz, A. (2006). *Evaluación de la sostenibilidad. Estudio de caso en una Unidad Básica de Producción Cooperativa ganadera. Pastos y Forrajes*, 29(3), 245-260.
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2018). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy*, 147, 175-245. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.001>

- Montenegro Gómez, S. P. (2012). *Diversidade de bactérias diazotróficas e fixação biológica do nitrogênio na Mata Atlântica* [Tesis doctoral, Universidade de São Paulo].
- Morales, B. M. (2018). *Análisis de sistemas agroforestales y su alternativa sostenible en la producción agropecuaria del Huila* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].
- Mora Ramos, M., & Cabrera Rubiano, L. (2020). *Producción de hojarasca en el sistema agroforestal con cacao (*Theobroma cacao L.*) y dos especies de sombrío: acacia (*Acacia mangium*) y yopo (*Anadenanthera peregrina L.*)* [Tesis de pregrado, Universidad de los Llanos]. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/2852>
- Morales Lozano, B. M. (2018). *Análisis de sistemas agroforestales y su alternativa sostenible en la producción agropecuaria del Huila* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].
- Moran, Y., & Portillo, L. (2011). *Efecto de la incorporación de hojarasca de cuatro especies arbóreas sobre los niveles de CO<sub>2</sub>, pH y P en un suelo Vitric Haplustand* [Tesis de pregrado, Universidad de Nariño]. <https://sired.udenar.edu.co/10224/1/86174.pdf>
- Municipio de Málaga. (s.f.). *Documento de formulación: Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.)* [Documento de trabajo]. Recuperado de <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstreams/714901a4-bf86-4c1a-affa-5d7bd8460446/download>
- Murgueitio, E., Chará, J., & Solarte, A. (2015). *Agroforestería pecuaria para la adaptación al cambio climático*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

- Murgueitio, E., Chará, J., Solarte, A., Uribe, F., Zapata, C., & Rivera, J. E. (2015). Sistemas silvopastoriles intensivos: innovación para la ganadería sostenible del siglo XXI. *Pastos y Forrajes*, 38(1), 21-35.
- Murray, R. M., Orozco, M. G., Hernández, A., Lemus, C., & Nájera, O. (2014). *El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo*. *Terra Latinoamericana*, 18(1), 45-56.
- Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers.
- Navas-Panadero, A., Hernández-Larrota, J. D., & Velásquez-Mosquera, J. C. (2021). *Production and quality of forage of Sambucus nigra in living fences, high Colombian tropics*. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 523-537. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.42862>
- Novais, S. V., Silva, I. R., Barros, N. F., & Leite, F. P. (2021). *Nutrient cycling in agroforestry systems: A meta-analysis of nutrient retention and release*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 311, 107326. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107326>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Informe de la FAO: 1 700 millones de personas se ven afectadas por la disminución del rendimiento de los cultivos debido a la degradación de las tierras*.  
FAO. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-report--1.7-billion-people-experience-lower-crop-yields-due-to-land-degradation/es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2020). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020: Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables*. <https://doi.org/10.4060/ca9692es>

- Oropesa-Casanova, K., Wencomo-Cárdenas, H. B., Miranda-Tortoló, T., & Lezcano-Fleires, J. C. (2021). *Sustentabilidad de los sistemas productivos en Cuba desde un enfoque multifactorial. Pastos y Forrajes*, 44(1), 1-15. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942021000100008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942021000100008)
- Oyedele, O. (2021). *Quantifying leaf litter production, decomposition, and nutrient release in cacao plantations in southwest Nigeria* [Tesis doctoral, University of Ibadan]. <https://hdl.handle.net/10568/128354>
- Palm, C. A. (2021). *Contributions of agroforestry to ecosystem services*. Springer Nature.
- PDEA de Santander. (2024). *Plan Departamental de Extensión Agropecuaria 2024–2027*. Agencia de Desarrollo Rural. [https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2024/08/01\\_PDEA\\_Santander\\_2024.pdf](https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2024/08/01_PDEA_Santander_2024.pdf)
- PDEA de Santander. (2024). *Plan Departamental de Extensión Agropecuaria 2024–2027*. Agencia de Desarrollo Rural. [https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2024/08/01\\_PDEA\\_Santander\\_2024.pdf](https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2024/08/01_PDEA_Santander_2024.pdf)
- Pérez Camacho, U., & García González, M. de L. (2021). *Evaluación del sistema agroforestal una alternativa para el desarrollo local sostenible, en la localidad de San Francisco Cheje, municipio de Jocotitlán, México*. En S. E. Martínez Pellegrini, J. F. Sarmiento Franco, & M. C. Valles Aragón (Coords.), *Aproximaciones teórico-metodológicas para el análisis territorial y el desarrollo regional sostenible* (Vol. I, pp. 145-167). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez-Almario, N., Medina-Rios, E. L., Mora-Delgado, J., Criollo-Cruz, D., & Mejía, J. R. (2021). *Criteria for use and conservation of trees in pastures based on farmers' local*

- knowledge in a tropical dry forest zone in Colombia. \*Tropical Grasslands-Forrajés Tropicales*, 9\*(3), 321-336. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(9\)321-336](https://doi.org/10.17138/TGFT(9)321-336)
- Pérez, R. (2022). *Análisis económico de sistemas agroforestales con manejo de hojarasca en García Rovira*. *Economía Agraria y de los Recursos Naturales*, 22(2), 125-142.
- Pérez, E. (2001). Hacia una nueva visión de lo rural. En G. Escobar & E. Pérez (Eds.), *Una nueva ruralidad en América Latina* (pp. 17-29). CLACSO.
- Pérez, R., & Rodríguez, M. (2020). Evaluación de *Acacia decurrens* en sistemas agroforestales para la recuperación de suelos degradados en el altiplano cundiboyacense [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12275/3192543.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez, J. (2023). *Reducción de costos de producción mediante manejo de hojarasca en sistemas agroforestales campesinos*. *Economía Agraria*, 25(4), 85-102.
- Pérez, S., Ramírez, A., & Gómez, T. (2022). Valoración integral de los servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales amazónicos. *Ambiente y Desarrollo*, 26(50), 47-68.
- Pinto, E., Vargas, J., & Silva, K. (2022). *Biomass production and nutrient return through litterfall in Acacia decurrens plantations in the Ecuadorian Andes*. *Forest Ecosystems*, 9(1), 45-58. <https://doi.org/10.1186/s40663-022-00334-2>
- Ramírez, C. (2022). *Educación ambiental y adopción de prácticas de manejo de hojarasca entre jóvenes rurales*. *Revista de Educación Rural*, 15(1), 235-252.
- Ramírez, C. (2022). *Dinámica de la mesofauna edáfica en suelos con cobertura de hojarasca en el altiplano cundiboyacense*. *Acta Biológica Colombiana*, 27(3), 140-152.

- Ramírez, J. A. (2019). *Especies forestales introducidas en Colombia: usos, impactos y manejo*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez, G., Sánchez, F., & Díaz, P. (2023). *Silvopastoral systems with *Acacia decurrens* improve soil fertility in the Colombian highlands*. *Agroforestry Systems*, 97(3), 567-581. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00816-w>
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). *Soil microorganisms mediating phosphorus availability*. *Plant Physiology*, 156(3), 989-996. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- Rivera, P., Sadeghian, S., & González, M. H. (2008). *Efecto del uso del suelo sobre la descomposición de hojarasca y grupos funcionales microbianos en la cuenca del río La Vieja, Quindío* [Informe técnico, Universidad Javeriana de Cali].
- Rodríguez, F. P., & Flores, E. (2022). *Desarrollo sostenible desde la educación ambiental en Latinoamérica: Una revisión sistemática*. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 2348-2367. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i3.2348](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2348)
- Rodríguez, F., et al. (2023). *Valoración económica de servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con manejo de hojarasca*. *Revista de Economía Institucional*, 19(2), 255-275.
- Rodríguez, F., et al. (2023). *Sistemas agroforestales con manejo de hojarasca en el Huila: experiencias de adaptación climática y desarrollo rural*. *Cambio Climático y Desarrollo Rural*, 8(3), 178-195.
- Rodríguez, J. P. (2022). *Planificación rural adaptativa: un marco para la gobernanza territorial frente al cambio climático*. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 19, 2355-2378. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr19.praf>

- Rojas, M. (2015). Multifuncionalidad agrícola y desarrollo territorial rural: un análisis desde la perspectiva de los actores locales. *Agronomía Colombiana*, 33(2), 265-275.  
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n2.51001>
- Rojas, M., Fernández, A., & Calderón, H. (2023). *Decomposition processes in high-altitude ecosystems: Influence of climate and litter quality*. *Andean Ecology*, 15(2), 112-125. <https://doi.org/10.5678/ande.2023.15.2.8>
- Rojas, M. (2023). *Calidad de hojarasca y patrones de liberación de nutrientes en sistemas silvopastoriles del Caribe colombiano*. *Pastos y Forrajes*, 46(1), 75-92.
- Rodríguez, F. (2023). Sistemas agroforestales con manejo de hojarasca en el Huila: experiencias de adaptación climática y desarrollo rural. *Cambio Climático y Desarrollo Rural*, 8(3), 178-195.
- Rousseau, L., Fonte, S. J., & Téllez, O. (2020). *Agroforestry systems as habitats for soil fauna: A meta-analytical approach*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 293, 106841. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106841>
- Sadeghian, S. (2015). *Soil acidity and organic matter dynamics in Andean ecosystems*. *Journal of Soil Science*, 66(4), 512-525. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01464.x>
- Schejtman, A., & Berdegúe, J. A. (2004). Desarrollo territorial rural. RIMISP / Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.
- Sánchez, P. A. (1995). *Science in agroforestry*. *Agroforestry Systems*, 30(1-2), 5-55. <https://doi.org/10.1007/BF00708912>
- Sarmiento, J. (2023). *Nuevas territorialidades. Gestión de los territorios y recursos naturales con sustentabilidad ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.22201/iiec.9786073083140e.2023>

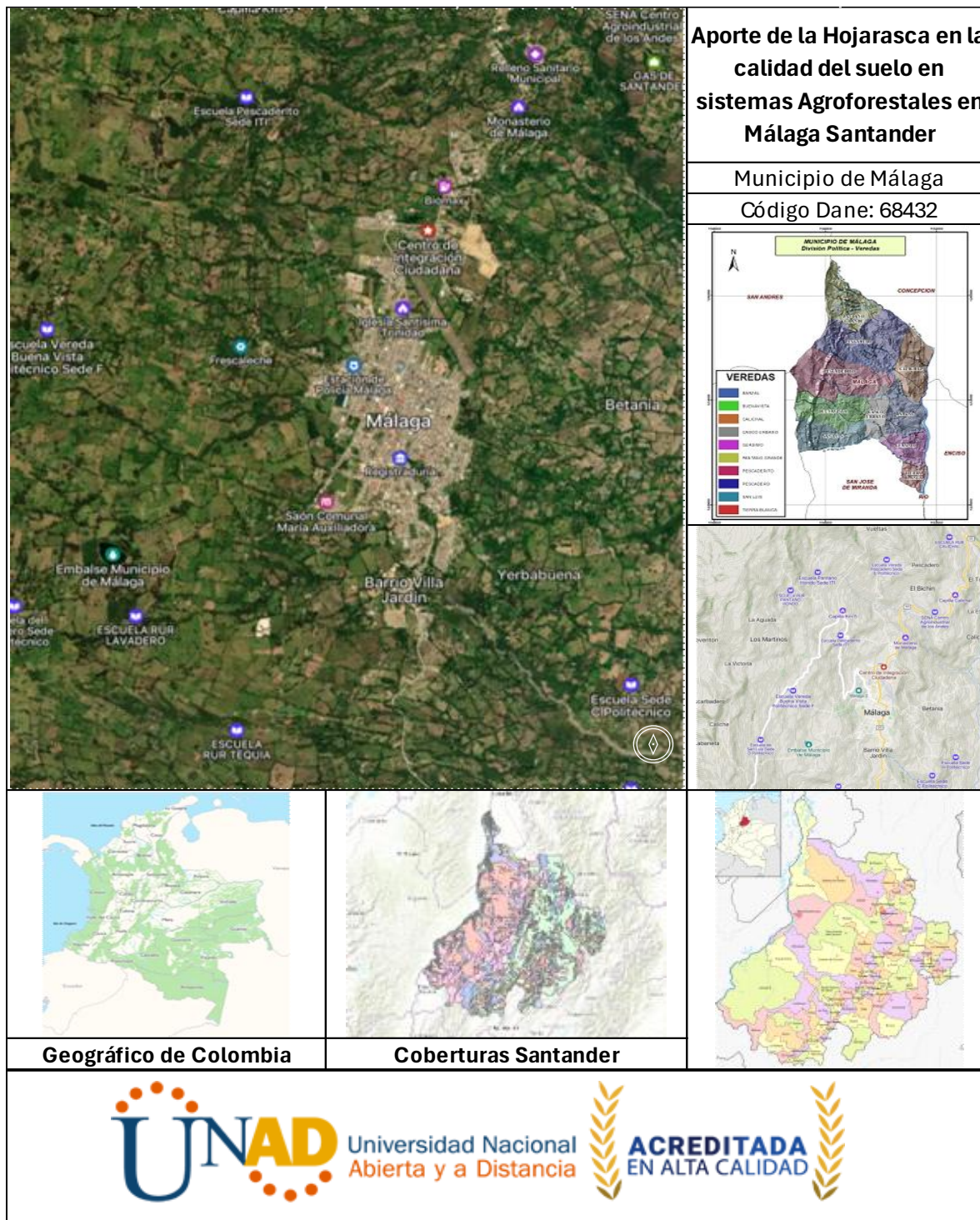
- Sarker, T. C., Giannopoulos, G., & Aschonitis, V. (2022). *The effect of litter quality and soil properties on decomposition of organic amendments in agricultural soils*. *Geoderma*, 405, 115441. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115441>
- Sepúlveda, S., Rodríguez, A., Echeverri, R., & Portilla, M. (2003). *El enfoque territorial del desarrollo rural*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Sepúlveda, S. (2016). *Metodologías para la evaluación del desarrollo territorial rural*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Singh, K., & Shekhar, C. (2022). *Nutrient cycling in agroforestry systems*. Academic Press.
- Sileshi, G. W. (2020). *Nutrient release patterns from agroforestry tree residues*. Elsevier.
- Sotelo, M., Suárez Salazar, J. C., Álvarez Carrillo, F., Castro Núñez, A., Calderón Soto, V. H., & Arango, J. (2017). *Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico - Sistemas silvopastoriles: ¿una opción viable?* (Publicación CIAT No. 448). Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Sotelo, M., Hurtado, R., & Murgueitio, E. (2014). *Producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles en la cuenca del río Sinú* [Informe técnico, Universidad Nacional de Colombia].
- Suárez, D. R., González, M. H., Ramírez, A. L., y Rodríguez, P. E. (2022). Diversidad microbiana y descomposición de hojarasca en ecosistemas andinos. *Revista de Biología Tropical*, \*70\*(1), 105-120.
- Suárez, D. (2023). Cooperación internacional y manejo sostenible de la hojarasca en proyectos de desarrollo rural andinos. *Cooperación y Desarrollo*, 30(2), 185-204.
- Toro, L., Ramírez, C., & Díaz, M. (2020). *Valoración económica de servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales andinos*. *Agroforestería Neotropical*, 8(3), 112-128.

- Torres, A., Mendoza, S., & Castro, R. (2023). *Metodologías para la cuantificación integral de carbono en sistemas agroforestales*. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 28(1), 112-130. <https://doi.org/10.32436/2248-4858.2023.28.1.112>
- Torres, L., Mendoza, C., & Ruiz, J. (2023). *Improvement of acidic soils fertility using leguminous trees in northern Peruvian highlands*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), 5122-5135. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01322-3>
- Torres, L. (2023). *Secuestro de carbono en suelos bajo sistemas agroforestales con manejo de hojarasca en los Andes colombianos*. *Cambio Climático y Sostenibilidad*, 8(4), 305-320.
- Torres, L. (2023). *Contribución de la hojarasca a la disponibilidad de micronutrientes en suelos cafeteros*. *Cenicafé*, 74(1), 195-215.
- Van der Ploeg, J. D. (2018). *The New Peasantries: Rural Development in Times of Globalization*. (2nd ed.) Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315114712>
- Wall, D. H., Bardgett, R. D., Behan-Pelletier, V., Herrick, J. E., Jones, T. H., Ritz, K., Six, J., Strong, D. R., & van der Putten, W. H. (Eds.). (2012). *Soil ecology and ecosystem services*. Oxford University Press.
- Zhang, W., Li, X., & Sun, S. (2023). *Phosphorus mobilization mechanisms in acidic soils under agroforestry systems: The role of organic anions and phosphatase enzymes*. *Soil Biology and Biochemistry*, 176, 108867. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108867>

## Apéndices

### Apéndice A.

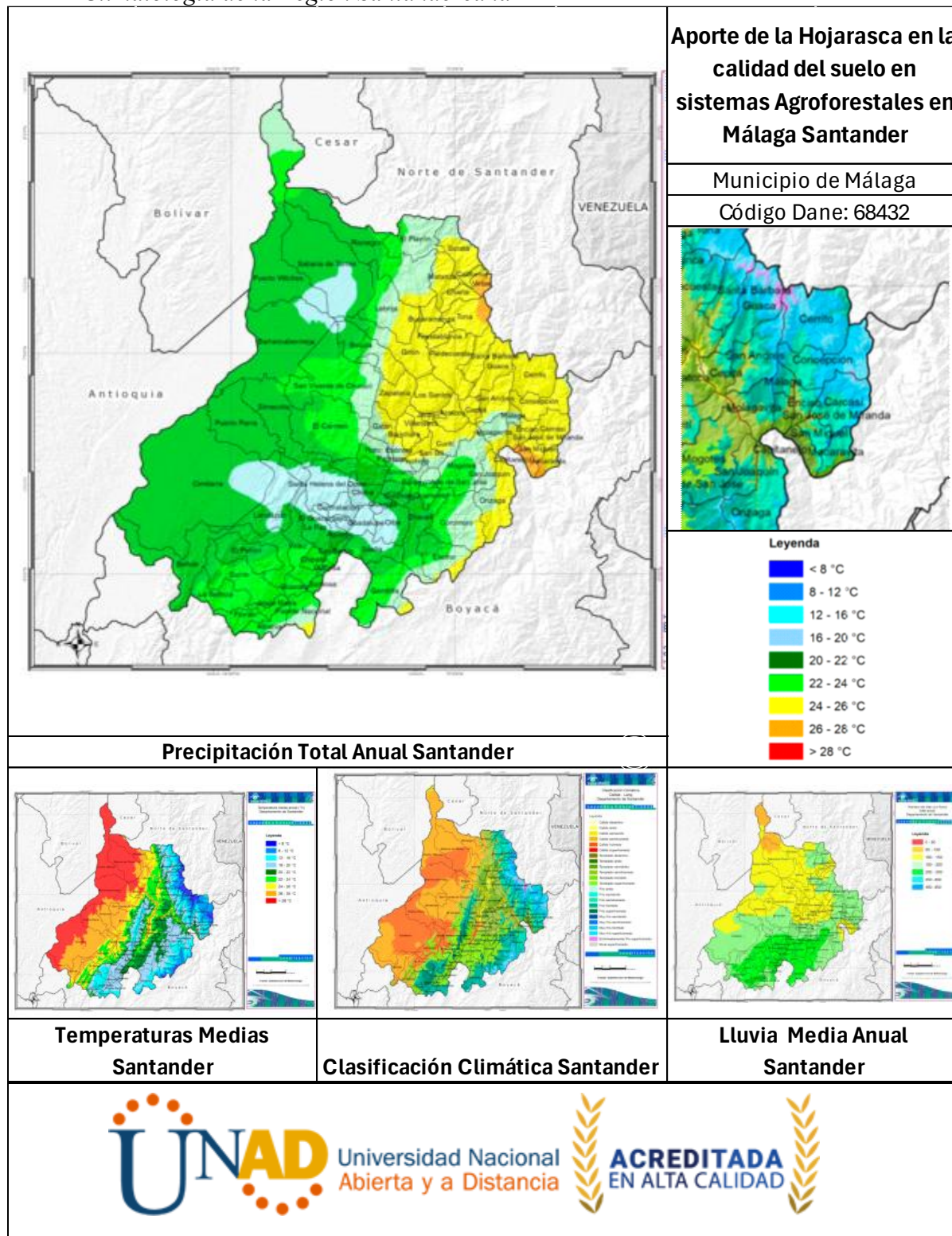
*Municipio de Málaga, ubicado en el departamento de Santander (Colombia)*



Fuente: Revisión documental.

**Apéndice B.**

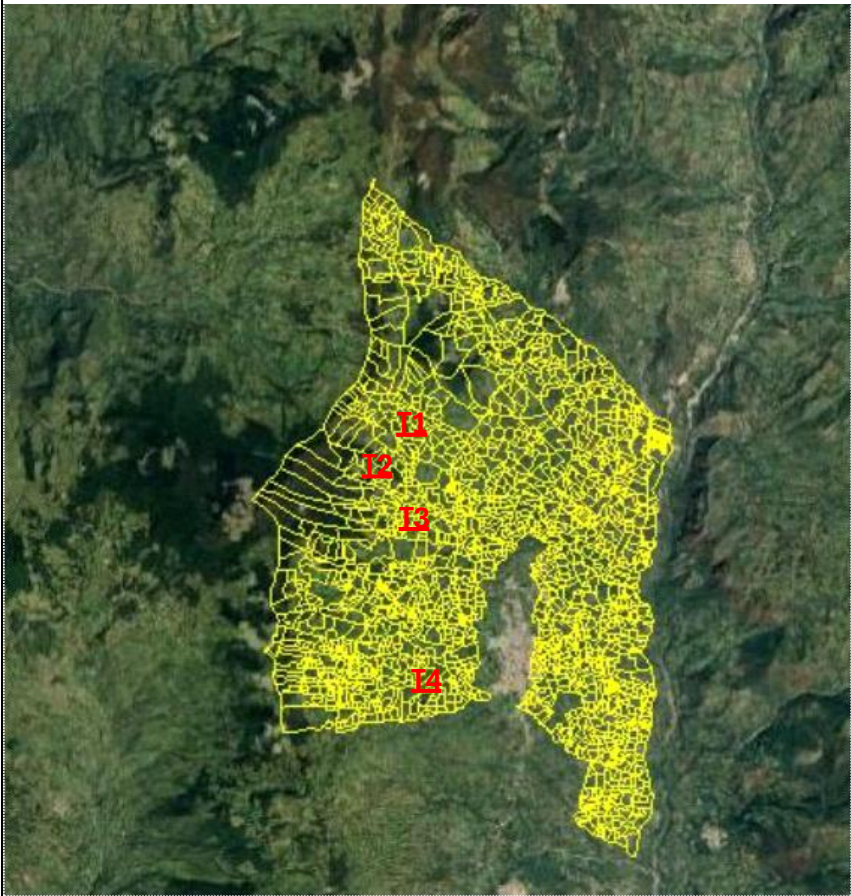





*Climatología de la Región Santandereana*



Fuente: Revisión documental.

## Apéndice C.

### Sistemas agroforestales (SAF) Estudiados

		<b>Aporte de la Hojarasca en la calidad del suelo en sistemas Agroforestales en Málaga Santander</b>
		Municipio de Málaga
		Código Dane: 68432
		SAF tradicional (Sin tecnificación de pasturas o árboles). <b>T4</b> SAF con Acacia decurrens (alta tasa de fijación de N). <b>T2</b> SAF con Escallonia pendula (hojarasca de rápida descomposición). <b>T1</b> SAF mixto Acacia decurrens + Escallonia pendula + Alnus glutinosa. <b>T3</b>
		
<b>Sistemas agroforestales (SAF) Estudiados</b>		<b>SAF tradicional.</b>
		
SAF mixto Acacia decurrens + Escallonia pendula + Alnus glutinosa.	SAF con Acacia decurrens	SAF con Escallonia pendula
		

Fuente: Datos generados en el proceso de investigación.

**Apéndice D.**

*Muestreo de hojarasca.*

		<p><b>Aporte de la Hojarasca en la calidad del suelo en sistemas Agroforestales en Málaga Santander</b></p>
		<p>Municipio de Málaga Código Dane: 68432</p>
		<p>Nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, micronutrientes). Mohos y levaduras (Log UFC g<sup>-1</sup>). Celulíticos (Log UFC g<sup>-1</sup>). Amilolíticos (Log UFC g<sup>-1</sup>). Proteolíticos (Log UFC g<sup>-1</sup>). Fijadores de nitrógeno (Log UFC g<sup>-1</sup>).</p>
		
<p><b>Seguimiento de la Descomposición</b></p>		<p><b>Muestras</b></p>
		
<p><b>Identificación y Conteo de las Muestras</b></p>	<p><b>Diluciones Muestra</b></p>	<p><b>Replicas de Muestras</b></p>
		

Fuente: Datos generados en el proceso de investigación. Laboratorio microbiológico de Empresas Públicas Municipales de Malaga EPMM

<b>Grupo Funcional</b>	<b>T1 (pH 4.29 / MO 19.8%)</b>	<b>T2 (pH 5.76 / MO 14.1%)</b>	<b>T3 (pH 6.31 / MO 13.2%)</b>	<b>T4 (pH 5.48 / MO 8.83%)</b>	<b>Tendencia Principal</b>
Celulolíticos (total)	7.04	7.11	6.74	7.39	↑ en T4 (a pesar de baja MO).
Celulolíticos (halo)	6.43	6.37	5.93	6.38	Estables en T2/T4, ↓ en T3.
Amilolíticos	6.20	5.82	5.86	5.98	↓ con MO reducida.
Proteolíticos	6.68	6.77	6.72	6.48	Máximo en T2 (pH 5.76).
Solub. Fosfato (total)	6.58	5.68	6.64	5.70	↓ crítico en T2/T4 (pH <6).
Solub. Fosfato (hongos)	4.82	5.18	4.85	5.24	↑ en pH intermedios (T2/T4).
Solub. Fosfato (bacterias)	6.58	5.54	6.63	5.56	Colapso en T2/T4 (pH ácido).
Fijadores de Nitrógeno	6.88	6.60	7.07	6.74	Óptimo en T3 (pH 6.31).
Mohos y Levaduras	6.92	6.62*	6.80	6.93	Resilientes en todas las condiciones.


## Apéndice E.

### Muestreo de suelo, Físico – Químico

		<p><b>Aporte de la Hojarasca en la calidad del suelo en sistemas Agroforestales en Málaga Santander</b></p>
		<p>Municipio de Málaga Código Dane: 68432</p>
		<p>Parámetros pH: Relación 1:1 Boro: Agua Caliente Al<sup>3+</sup> (Aluminio Intercambiable): KCl 1N Porcentaje saturación bases Ca - Mg - K - Na: Ext NH4Ac - Abs Atómica Fe - Mn - Cu - Zn: Método DTPA - Abs Atómica Textura - Bouyoucos: Arena (% A); Arcilla (% Ar) y Limos (% L) Int (Acidez Intercambiable): KCl 1N Azufre: Fosfato Monocálcico Materia Orgánica: Método Walkley Black C. E. Extracto de Saturación REF.%M.O: 5-10:Frio, 3-5:Medio, 2-4:Caliente</p>
<p><b>Toma de Muestras</b></p>		 <p><b>Identificación Primaria</b></p>
 <p><b>Disposición de las Muestras</b></p>	 <p><b>Espacio de Muestra</b></p>	 <p><b>Estandarización de muestras</b></p>
		

Fuente: Datos generados en el proceso de investigación, análisis de laboratorio; Laboratorio de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja, UPTC.





**Uptc**<sup>®</sup>  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
CENTRO DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - CIECA  
LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO EN SUELOS Y AGUAS  
Commutador (8) 7405626 Ext: 2455 email: laboratorio.suelos@uptc.edu.co

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL  
**DE ALTA CALIDAD**  
MULTICAMPUS  
RESOLUCIÓN 023655 DE 2021 MEN / 6 AÑOS

---

Usuario: RAFAEL MERCHAN FLOREZ

Coordenadas: N/A

Finca ( a.s.n.m.): SAUSALITO

Observaciones: NINGUNA

Departamento: SANTANDER

Municipio: MÁLAGA

Vereda: PANTANO GRANDE

Fecha Recepción: 19/05/2025

Tipo de análisis: ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN 1

Cultivo: PASTOS

Total Cancelado: 70000

Recibo de caja No.: 131819408

Fecha de Elaboración: 28/05/2025

---

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUELOS

Muestra	No. Laboratorio	Prof. (cm)	% Textura			pH	% MO	% N	cmol+ Kg <sup>-1</sup> de suelo							partes por millón (ppm)						% Na	CE dS m <sup>-1</sup>					
			A	L	Ar				Ac. Int	Al <sup>+3</sup>	Ca	Mg	K	Na	SB	ClO <sub>2</sub>	P	S	Fe	Mn	Cu			Zn	B			
2 (T2)	244		35	22	43	Ar	5,76	14,1				7,5	2,93	0,86	0,15	11,44	44	36,49									0,34	1,06
<b>VALORES DE REFERENCIA (Ref.)</b>							5,6- 7,3	% CO				3 - 6	1,5 - 2,5	0,4 - 0,6	<0,5			20 - 40	6 - 12	50 - 100	5 - 10	1 - 3	1,5 - 5	0,3 - 0,6	<7	<2		
<b>INTERPRETACIÓN</b>							Mod.Ac	8,18				Alto	Alto	Alto	Medio			Medio								Bajo	Normal	

No. Laboratorio	Iones solubles (ppm)					Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	
	Ca	Mg	K	Na	P	p <sub>b</sub>	p <sub>e</sub>
244							
Ref.	40-100	17-35	40-100	<90	4-6		

No. Laboratorio	Porcentaje saturación bases			
	Ca	Mg	K	Na
244	17,05	6,66	1,95	0,34
Ref.	30 - 50	15 - 25	2-3	<7
Interpret.	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo


No. Laboratorio	Relaciones catiónicas					
	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	K/Mg	(Ca+Mg/K)	IK
244	2,56	8,72	3,41	0,29	12,13	0,38
Ref.	3 - 5	12-18	6 - 8	0,2 - 0,3	12 - 20	0,08 - 0,12
Interpret.	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Alto




---

METODOS ANALÍTICOS (CALS - ICONTEC)

pH: Relación 1:1	Boro: Agua Caliente	Al <sup>+3</sup> (Aluminio Intercambiable): KCl 1N	Fósforo Disponible: Bray II - Colorimetría	Fe - Mn - Cu - Zn: Método DTPA - Abs Atómica	Textura - Bouyoucos: Arena (% A); Arcilla (% Ar) y Limos (% L). REF.%M.O: 5-10:Frio, 3-5:Medio, 2-4:Caliente
Ac.Int (Acidez Intercambiable): KCl 1 N	Azufre: Fosfato Monocálcico	Materia Orgánica: Método Walkley Black	Ca - Mg - K - Na: Ext. NH <sub>4</sub> Ac - Abs Atómica	C.E. Extracto de Saturación	

---









DIAGNÓSTICO	Sugerencias	
El suelo a la profundidad de muestreo presenta textura fina: Arcillosa, que se caracteriza por presentar una condición de labranza pobre (difícil), infiltración baja (se encharca) por la alta retención de agua; se debe tener cuidado con el manejo del agua de riego y fertilizantes. Según topografía mantener buenos drenajes.		<p style="font-size: x-small;">ORIGINAL FIRMADO</p> <p style="font-size: x-small;">Vo.Bo. <b>NATALY JULIETH PUERTO GALINDO</b> Analista Principal</p> <hr/> <p style="font-size: x-small;">ORIGINAL FIRMADO</p> <p style="font-size: x-small;">Vo.Bo. <b>GERMÁN EDUARDO CELY REYES</b> Interpretación</p>
pH de reacción: <b>Moderadamente Ácido</b>		
Suelo con pH moderadamente ácido, con altos contenidos de calcio, magnesio y potasio; los niveles de fósforo son medios. No presenta problemas de acidez ni salinidad.		
% Materia Orgánica - MO: Su contenido en este suelo es alto permitiendo buena textura y laboreo agrícola; ayuda a la buena porosidad y aireación del mismo; disminuye los riesgos de erosión; aporta buena reserva de nutrientes y ayuda a la aprovechabilidad de los fertilizantes aplicados; son reserva nutricional para los organismos del suelo.		
Las sugerencias del laboratorio pueden ser tenidas en cuenta o modificadas por el asistente técnico.		<p style="font-size: x-small;">La Universidad, al servicio del campo</p>

	 <b>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia</b>	<b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA</b> FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS CENTRO DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN - CIECA LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO EN SUELOS Y AGUAS Conmutador (8) 7405626 Ext: 2455 email: laboratorio.suelos@uptc.edu.co	<b>ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD</b> <b>MULTICAMPUS</b> RESOLUCIÓN 023655 DE 2021 MEN / 6 AÑOS																																																																																																						
Usuario: <u>NILSON OVIDIO VARGAS</u>	Departamento: <u>SANTANDER</u>	Fecha Recepción: <u>19/05/2025</u>	Total Cancelado: <u>70000</u>																																																																																																						
Coordenadas: <u>N/A</u>	Municipio: <u>MÁLAGA</u>	Tipo de análisis: <u>ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN 1</u>	Recibo de caja No.: <u>131819408</u>																																																																																																						
Finca ( a.s.n.m.): <u>EL MORTIÑO</u>	Vereda: <u>BUENA VISTA</u>	Cultivo: <u>PRADERA</u>	Fecha de Elaboración: <u>28/05/2025</u>																																																																																																						
Observaciones: <u>NINGUNA</u>																																																																																																									
<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUELOS</b>																																																																																																									
Muestra	No. Laboratorio	Prof. (cm)	% (g/g)			Textura	pH	% MO	% N	cmol <sup>+</sup> Kg <sup>-1</sup> de suelo							partes por millón (ppm)						% Na	CE dS m <sup>-1</sup>																																																																																	
			A	L	Ar					Ac. Int	Al <sup>+</sup>	Ca	Mg	K	Na	SB	ClCr	P	S	Fe	Mn	Cu			Zn	B																																																																															
1 (T3)	243		24	33	43	Ar	6,31	13,2			10,6	1,36	0,57	0,18	12,71	48	31,33								0,38	0,67																																																																															
<b>VALORES DE REFERENCIA (Ref.)</b>							5,6- 7,3	% CD			3 - 6	1,5 - 2,5	0,4 - 0,6	<0,5			20 - 40	6 - 12	50 - 100	5 - 10	1 - 3	1,5 - 5	0,3 - 0,6	<7	<2																																																																																
<b>INTERPRETACIÓN</b>							Lig.Ac	7,66			Muy Alto	Bajo	Medio	Medio			Medio								Bajo	Normal																																																																															
		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th rowspan="2">No. Laboratorio</th> <th colspan="5">Iones solubles (ppm)</th> <th colspan="2">Densidad (g cm<sup>-3</sup>)</th> </tr> <tr> <th>Ca</th> <th>Mg</th> <th>K</th> <th>Na</th> <th>P</th> <th>p<sub>b</sub></th> <th>p<sub>v</sub></th> </tr> <tr> <td>243</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ref.</td> <td>40-100</td> <td>17-35</td> <td>40-100</td> <td>&lt;90</td> <td>4-6</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					No. Laboratorio	Iones solubles (ppm)					Densidad (g cm <sup>-3</sup> )		Ca	Mg	K	Na	P	p <sub>b</sub>	p <sub>v</sub>	243								Ref.	40-100	17-35	40-100	<90	4-6			<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th rowspan="2">No. Laboratorio</th> <th colspan="4">Porcentaje saturación bases</th> </tr> <tr> <th>Ca</th> <th>Mg</th> <th>K</th> <th>Na</th> </tr> <tr> <td>243</td> <td>22,08</td> <td>2,83</td> <td>1,19</td> <td>0,38</td> </tr> <tr> <td>Ref.</td> <td>30 - 50</td> <td>15 - 25</td> <td>2-3</td> <td>&lt;7</td> </tr> <tr> <td>Interpret.</td> <td>Bajo</td> <td>Bajo</td> <td>Bajo</td> <td>Bajo</td> </tr> </table>				No. Laboratorio	Porcentaje saturación bases				Ca	Mg	K	Na	243	22,08	2,83	1,19	0,38	Ref.	30 - 50	15 - 25	2-3	<7	Interpret.	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th rowspan="2">No. Laboratorio</th> <th colspan="6">Relaciones catiónicas</th> </tr> <tr> <th>Ca/Mg</th> <th>Ca/K</th> <th>Mg/K</th> <th>K/Mg</th> <th>(Ca+Mg/K)</th> <th>IK</th> </tr> <tr> <td>243</td> <td>7,79</td> <td>18,6</td> <td>2,39</td> <td>0,42</td> <td>20,98</td> <td>0,23</td> </tr> <tr> <td>Ref.</td> <td>3 - 5</td> <td>12-18</td> <td>6 - 8</td> <td>0,2 - 0,3</td> <td>12 - 20</td> <td>0,08 - 0,12</td> </tr> <tr> <td>Interpret.</td> <td>Alto</td> <td>Alto</td> <td>Bajo</td> <td>Alto</td> <td>Bajo</td> <td>Alto</td> </tr> </table>						No. Laboratorio	Relaciones catiónicas						Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	K/Mg	(Ca+Mg/K)	IK	243	7,79	18,6	2,39	0,42	20,98	0,23	Ref.	3 - 5	12-18	6 - 8	0,2 - 0,3	12 - 20	0,08 - 0,12	Interpret.	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
No. Laboratorio	Iones solubles (ppm)					Densidad (g cm <sup>-3</sup> )																																																																																																			
	Ca	Mg	K	Na	P	p <sub>b</sub>	p <sub>v</sub>																																																																																																		
243																																																																																																									
Ref.	40-100	17-35	40-100	<90	4-6																																																																																																				
No. Laboratorio	Porcentaje saturación bases																																																																																																								
	Ca	Mg	K	Na																																																																																																					
243	22,08	2,83	1,19	0,38																																																																																																					
Ref.	30 - 50	15 - 25	2-3	<7																																																																																																					
Interpret.	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo																																																																																																					
No. Laboratorio	Relaciones catiónicas																																																																																																								
	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	K/Mg	(Ca+Mg/K)	IK																																																																																																			
243	7,79	18,6	2,39	0,42	20,98	0,23																																																																																																			
Ref.	3 - 5	12-18	6 - 8	0,2 - 0,3	12 - 20	0,08 - 0,12																																																																																																			
Interpret.	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto																																																																																																			
<b>MÉTODOS ANALÍTICOS (CAL - ICONTEC)</b>																																																																																																									
pH: Relación 1:1		Boro: Agua Caliente		Al <sup>+</sup> (Aluminio Intercambiable): KCl 1N		Fósforo Disponible: Bray II - Colorimetría		Fe - Mn - Cu - Zn: Método DTPA - Abs Atómica		Textura - Bouyoucos: Arena (% A); Arcilla (% Ar) y Limos (% L).																																																																																															
Ac.Int (Acidez Intercambiable): KCl 1 N		Azufre: Fosfato Monocálcico		Materia Orgánica: Método Walkley Black		Ca - Mg - K - Na: Ext. NHAc - Abs Atómica		C.E. Extracto de Saturación		REF.%MO: 5-10:Frio, 3-5:Medio, 2-4:Caliente																																																																																															
<b>DIAGNÓSTICO</b>				<b>Sugerencias</b>																																																																																																					
El suelo a la profundidad de muestreo presenta textura fina: Arcillosa, que se caracteriza por presentar una condición de labranza pobre (difícil), infiltración baja (se encharca) por la alta retención de agua; se debe tener cuidado con el manejo del agua de riego y fertilizantes. Según topografía mantener buenos drenajes.				<div style="text-align: right;">                 ORIGINAL FIRMADO                  Vo.Bo. <b>NATALY JULIETH PUERTO GALINDO</b>                  Analista Principal             </div> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">                 ORIGINAL FIRMADO                  Vo.Bo. <b>GERMÁN EDUARDO CELY REYES</b>                  Interpretación             </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">                 La Universidad, al servicio del campo             </div>																																																																																																					
pH de reacción: <b>Ligeramente Ácido</b>																																																																																																									
Suelo con pH ligeramente ácido, con muy altos contenidos de calcio; el nivel de magnesio es bajo y los niveles de fósforo y potasio son medios. No presenta problemas de acidez ni salinidad.																																																																																																									
% Materia Orgánica - MO: Su contenido en este suelo es alto permitiendo buena textura y laboreo agrícola; ayuda a la buena porosidad y aireación del mismo; disminuye los riesgos de erosión; aporta buena reserva de nutrientes y ayuda a la aprovechabilidad de los fertilizantes aplicados; son reserva nutricional para los organismos del suelo.																																																																																																									
Las sugerencias del laboratorio pueden ser tenidas en cuenta o modificadas por el asistente técnico.																																																																																																									



**Apéndice F.**

*Identificación de Mesofauna.*

		<p><b>Aporte de la Hojarasca en la calidad del suelo en sistemas Agroforestales en Málaga Santander</b></p>
		<p>Municipio de Málaga Código Dane: 68432</p>
<p><i>Oniscidea</i></p>		 <p><i>Lumbricus terrestris</i></p>
 		 <p><b>Muestreos</b></p>
<p><i>Coleópteros (Escarabajos)</i></p>	<p><i>Curculionidae</i></p>	 <p><i>Lepidópteros (Polillas)</i></p>
		

Fuente: Actividades desarrolladas durante la investigación.

**Apéndice G.**

*Evaluación socioeconómica - Participativa.*

		<p><b>Aporte de la Hojarasca en la calidad del suelo en sistemas Agroforestales en Málaga Santander</b></p>	
		<p>Municipio de Málaga Código Dane: 68432</p>	
			
			
<p><b>Unidad Productiva</b></p>		<p><b>Acompañamiento de ASONORMANDO</b></p>	
			
<p><b>Trabajo ASONORMANDO - UNAD</b></p>	<p><b>Trabajo ASONORMANDO - UNAD</b></p>	<p><b>Reunión con Productores en Pantano Grande MALAGA</b></p>	
			

Fuente: Actividades desarrolladas durante la investigación.

## Apéndice H.

### *Estructura de Costos y Beneficios Proforma a 5 años (Valores en \$COP/ha)*

Elementos metodológicos:

Horizonte: 5 años.

Inversión inicial (Establecimiento): Ocurre en el Año 0. Se amortiza linealmente a 5 años para el cálculo del ROI, pero en el flujo de caja se registra como egreso total en el Año 0.

Beneficios: El ahorro en fertilizantes comienza en el Año 2, una vez el sistema genera suficiente hojarasca para reemplazar parcialmente los insumos. El incremento en la producción (valor compuesto de forraje, pancoger... se manifiesta progresivamente: 30% en el Año 2, 70% en el Año 3, y 100% a partir del Año 4.

Costo de Mantenimiento: Incluye podas, manejo de hojarasca, y control de arvenses. Es constante en años 1-5.

Sistema Tradicional (T4): No tiene costo de establecimiento. Su producción se asume constante. No genera ahorros en fertilizantes.

Tasa de Descuento: Para el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR/ROI), se utilizó una tasa del 12% anual, típica para proyectos agropecuarios de mediano riesgo en el contexto local. Los valores de la Tabla 4 son el promedio simple de los flujos de los años 1 a 5, más la amortización de la inversión.

### **Matriz Comparativa Resumida (Promedio Años 1-5 y Resultados)**

Sistema	Costo Establec. (Año 0)	Costo Mant. Prom.	Ahorro Fert. Prom.	Increment. Prod. Prom.	ROI Estimado	Periodo de Recuperación
T1 - SAF <i>E. pendula</i>	1,200,000	300,000	1,500,000	2,100,000	~25%	Entre Año 2 y 3
T2 - SAF <i>A. decurrens</i>	1,050,000	280,000	960,000	1,080,000	~20%	Año 3
T3 - SAF Mixto	1,150,000	290,000	1,350,000	1,950,000	~22%	Año 3
T4 - Tradicional	0	150,000	0	1,000,000	~15%	N/A (sin inversión)

**Interpretación de la Matriz Proyectada:**

Corrección Temporal: La matriz evidencia que la rentabilidad no es inmediata. Todos los SAF presentan flujos negativos en los primeros años (Año 0 y Año 1). El retorno de la inversión (ROI positivo y recuperación del capital) comienza a materializarse sustancialmente a partir del Año 3. Esto justifica la necesidad de un análisis multi-anual.

Fuente del Promedio en Tabla 4: Los valores de la Tabla 4 original corresponden a la columna "Promedio (Años 1-5)" de la matriz detallada (para costos y beneficios), y al ROI estimado calculado a partir de esos promedios y la inversión inicial.

Sustento para la Conclusión: La matriz valida la conclusión de que, pese a la inversión inicial y al período de establecimiento, los SAF generan flujos netos acumulados muy superiores a medio plazo en comparación con el sistema tradicional, que se mantiene estable pero sin crecimiento. El SAF Mixto (T3) muestra un balance favorable entre inversión, riesgo (diversificación) y retorno.