

Evaluación integral de un sistema silvopastoril con Abarco (Cariniana pyriformis)

Comprehensive evaluation of a silvopastoral system with Abarco (Cariniana pyriformis)

Cristian G. Palencia-Blanco¹   Gildardo E. Palencia Calderón²  Luis E. Palencia Calderón¹ 

¹Instituto Universitario de la Paz – UNIPAZ, Grupo de Investigación en Innovación, Desarrollo Tecnológico y Competitividad en Sistemas de Producción Agroindustrial. Barrancabermeja, Santander, Colombia.

²Finca El Quinal del Tesoro, El Carmen de Chucurí, Santander, Colombia.

Resumen

Introducción: Los sistemas silvopastoriles (SSP) representan una estrategia clave para restaurar suelos degradados y mejorar la sostenibilidad de la ganadería tropical. En el Magdalena Medio colombiano, el uso de especies forestales nativas ofrece una oportunidad para integrar producción y conservación. En este contexto, se evaluó un SSP que incorpora a Cariniana pyriformis (Abarco) como componente forestal principal.

Objetivos: Analizar el desempeño de un sistema silvopastoril con Cariniana pyriformis en suelos degradados del Magdalena Medio colombiano, considerando indicadores de crecimiento forestal, producción forrajera y recuperación de la calidad del suelo.

Materiales y Métodos: El sistema incluyó gramíneas (Brachiaria humidicola y Brachiaria decumbens) y arbustos forrajeros (Morus alba L., Trichanthera gigantea, Gliricidia sepium), organizados en un diseño funcional y manejados bajo principios agroecológicos. Se evaluó el crecimiento del abarco durante 40 meses, así como la producción forrajera y diversos indicadores edáficos (pH, materia orgánica, fósforo disponible, macrofauna edáfica y actividad microbiológica).

Resultados: El abarco alcanzó un promedio de 6.36 m de altura total y 12.19 cm de DAP, con una tasa de crecimiento diametral de 0.31 cm/mes, lo que permite proyectar su aprovechamiento maderable a los 12 años. Mostró buena arquitectura de fuste y generó hojarasca con altos contenidos de N, P, K, Ca y Mg, favoreciendo el reciclaje de nutrientes. Las gramíneas produjeron hasta 14,960 kg FV/ha/año, mientras que los arbustos forrajeros superaron los 13 kg FV/arbusto/año, con alta aceptación por parte del ganado. Se observaron mejoras en la fertilidad del suelo, con aumentos en pH, materia orgánica y fósforo disponible, además de una mayor densidad de macrofauna y actividad microbiológica.

Conclusiones: El sistema silvopastoril evaluado generó beneficios productivos y ecológicos, incluyendo generación de biomasa, recuperación funcional del suelo y provisión de sombra, lo que reduce el estrés térmico en el ganado y favorece la biodiversidad. Este modelo, conocido como "Praderas de Felicidad", demuestra el potencial de los SSP con especies nativas para transformar la ganadería tropical hacia prácticas más resilientes, sostenibles y multifuncionales.

Palabras clave: Sistemas silvopastoriles, Especies nativas, Biomasa forrajera, Ganadería sostenible, Cariniana pyriformis.

Abstract

Introduction: Silvopastoral systems (SPS) are a key strategy for restoring degraded soils and enhancing the sustainability of tropical livestock systems. In Colombia's Magdalena Medio region, the use of native forest species offers an opportunity to integrate production and conservation. In this context, an SPS incorporating Cariniana pyriformis (Abarco) as the main forest component was evaluated.

Objectives: To assess the performance of a silvopastoral system with Cariniana pyriformis on degraded soils in the Magdalena Medio region of Colombia, focusing on forest growth, forage production, and soil quality recovery.

Materials and Methods: The system included grasses (Brachiaria humidicola and Brachiaria decumbens) and forage shrubs (Morus alba L., Trichanthera gigantea, Gliricidia sepium), arranged in a functional design and managed under agroecological principles. Growth of Abarco trees was monitored over 40 months, along with forage production and several soil quality indicators (pH, organic matter, available phosphorus, soil macrofauna, and microbial activity).

Results: Abarco trees reached an average height of 6.36 m and a diameter at breast height (DBH) of 12.19 cm, with a mean diameter growth rate of 0.31 cm/month, allowing for timber harvesting projections at 12 years. The species showed good stem architecture and produced leaf litter rich in N, P, K, Ca, and Mg, contributing to nutrient recycling. Grasses yielded up to 14,960 kg fresh matter/hayyear, and forage shrubs exceeded 13 kg fresh matter/shrubyear, with high palatability for livestock. Notable improvements in soil fertility were recorded, including increases in pH, organic matter, and available phosphorus, as well as enhanced soil macrofauna density and microbial activity.

Conclusions: The evaluated silvopastoral system provided both productive and ecological benefits, including biomass generation, functional soil restoration, and shade provision, which reduced animal heat stress and promoted biodiversity. This approach, known as the "Praderas de Felicidad" model, demonstrates the potential of SPS with native species as a viable strategy for transforming tropical livestock systems into more resilient, sustainable, and multifunctional systems.

Keywords: Silvopastoral systems, Native species, Forage biomass, Sustainable livestock, Cariniana pyriformis.

¿Cómo citar?

Palencia-Blanco CG, Palencia-Calderón GE, Palencia-Calderón LE. Evaluación integral de un sistema silvopastoril con Abarco (Cariniana pyriformis). Ingeniería y Competitividad, 2025 27;(2):e-20814501

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i2.14501>

Recibido: 25-10-24

Evaluado: 27-02-25

Aceptado: 20-05-25

Online: 11-06-25

Correspondencia

cristian.palencia@unipaz.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

La ganadería tradicional ha sido uno de los principales impulsores de la degradación del suelo en el trópico colombiano, lo que pone de relieve la necesidad de estrategias de producción más sostenibles. Una de las alternativas más prometedoras es la implementación de sistemas silvopastoriles (SSP), en particular aquellos que integran especies arbóreas nativas con valor maderable y ecológico. Por esta razón, el estudio se centró en evaluar exhaustivamente el comportamiento del abarco (*Cariniana pyriformis*) dentro de un SSP establecido en suelos degradados de la región del Magdalena Medio, analizando su crecimiento forestal, su contribución a la producción de forrajes y sus efectos sobre la calidad del suelo y la biodiversidad edáfica. El objetivo fue generar evidencia técnica que sustente la inclusión de especies nativas en sistemas ganaderos multifuncionales, contribuyendo a la restauración ecológica y la sostenibilidad productiva.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

Los árboles de abarco alcanzaron, en promedio, 6,36 m de altura y 12,19 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) después de 40 meses, con una tasa de crecimiento de 0,31 cm/mes, lo que permite proyectar la cosecha de madera a los 12 años. La especie presentó una arquitectura de fuste favorable y aportó entre 4,4 y 7,6 t/ha-año de biomasa (hojarasca), con altos contenidos de nitrógeno, potasio y calcio, lo que favoreció el reciclaje de nutrientes. Las gramíneas *Brachiaria humidicola* y *B. decumbens* alcanzaron rendimientos de 14.080 y 14.960 kg de forraje fresco/ha-año, respectivamente, mientras que los arbustos forrajeros superaron los 13 kg de forraje fresco/arbusto-año. Además, se registraron mejoras en la fertilidad del suelo, incluyendo aumentos del pH, la materia orgánica y el fósforo disponible, junto con un aumento en la densidad de la macrofauna del suelo (de 11 a 95 individuos/m²) y la actividad microbiológica.

¿Qué aportan estos hallazgos?

La investigación demuestra que los sistemas silvopastoriles con abarco (*Cariniana pyriformis*) son una alternativa viable para transformar los sistemas ganaderos tropicales al integrar la producción de madera nativa, el suministro de forraje y la recuperación ecológica del suelo. Los resultados destacan mejoras significativas en la calidad del suelo y la biodiversidad, a la vez que garantizan una base forrajera diversa y resiliente. Este enfoque, alineado con el modelo "Pastos Felices", ofrece oportunidades para diversificar los ingresos de los agricultores, mejorar el bienestar animal y apoyar la restauración productiva de tierras degradadas, posicionándose como una estrategia sostenible y replicable para sistemas ganaderos en contextos tropicales similares.



Introducción

La expansión de la ganadería tradicional ha sido uno de los principales factores de degradación ambiental en Colombia, debido al uso inadecuado del suelo, el sobrepastoreo, la deforestación y la pérdida de biodiversidad. Actualmente, cerca de 34.4 millones de hectáreas están dedicadas a esta actividad, aunque solo 15 millones presentan condiciones agroecológicas adecuadas, lo que evidencia una presión insostenible sobre los ecosistemas (1). Este escenario exige la transición hacia modelos de producción más sostenibles, que permitan conservar los recursos naturales, mitigar el cambio climático y mantener la productividad ganadera (2,3). Frente a esta problemática los sistemas silvopastoriles (SSP) se presentan como una alternativa integral que combina árboles, arbustos y pasturas en arreglos funcionales que aportan beneficios económicos, ecológicos y sociales (4,5). Diversos estudios han demostrado que los SSP pueden mejorar la calidad del suelo, incrementar la disponibilidad de forraje, regular el microclima, aumentar la biodiversidad del suelo y generar productos maderables o alimenticios, todo bajo un esquema de ganadería sostenible (6–8).

Una de las limitantes para la implementación masiva de estos sistemas en Colombia es el desconocimiento sobre el comportamiento de especies arbóreas nativas en condiciones de uso pecuario (9). Entre las especies con gran potencial se encuentra el abarco (*Cariniana pyriformis*), un árbol tropical de alto valor maderable, que además posee características funcionales clave como el aporte de biomasa, la mejora de la fertilidad del suelo y la capacidad de generar ingresos mediante su aprovechamiento forestal (3,10). Sin embargo, su incorporación en sistemas silvopastoriles ha sido escasamente evaluada, a pesar de que podría constituir una estrategia eficaz para promover sistemas productivos multifuncionales orientados a la restauración ecológica y la sostenibilidad ganadera.

Por este motivo, en esta investigación se propuso realizar una evaluación integral de un sistema silvopastoril establecido una especie maderable nativa como el abarco en suelos degradados del Magdalena Medio colombiano. Se abordaron tres componentes principales: el crecimiento forestal y hojarasca de *C. pyriformis*, la producción de biomasa forrajera (gramíneas y arbustos), y la biodiversidad edáfica como indicador de salud del suelo. La información generada busca aportar evidencia técnica sobre el potencial de esta especie para consolidar sistemas silvopastoriles multifuncionales, resilientes y sostenibles en zonas de ganadería tropical.

Metodología

Localización del estudio y diseño del sistema

El estudio se desarrolló en la finca El Quinal del Tesoro (FQT) localizada en la vereda Campo 27 del municipio El Carmen de Chucurí, Santander, Colombia (06°47'8.2"N; 73°36'7.5"W), a una altitud de 306 m s. n. m. El clima corresponde a una zona cálida-húmeda, con una temperatura promedio anual de 26.6 °C, humedad relativa del 81 % y una precipitación acumulada de 2,196 mm por año. El sistema silvopastoril fue establecido en un terreno previamente degradado, mediante la introducción de la especie forestal *Cariniana pyriformis* (abarco), en combinación con gramíneas forrajeras (*Brachiaria humidicola* y *Brachiaria decumbens*) y arbustos multipropósito (*Trichanthera gigantea*, *Morus alba* L. y *Gliricidia sepium*). El diseño espacial consistió en barreras de árboles en

surcos triples, dispuestos a una distancia de $4 \times 4 \times 4 \times 26$ m, con una densidad de plantación de 320 árboles por hectárea. En dos de los espacios de 26 m entre barreras forestales se establecieron gramíneas *Brachiaria humidicola* y *Brachiaria decumbens*, utilizando 3 kg de semilla por espacio, con una tasa de germinación aproximada del 70 %. En el tercer espacio de 26 m se establecieron arbustos forrajeros en 16 surcos distribuidos de la siguiente manera: cinco surcos de *Gliricidia sepium* (matarratón), seis surcos de *Morus alba* (morera) y cinco surcos de *Trichanthera gigantea* (aro), con densidades de siembra estimadas en 340, 408 y 340 arbustos respectivamente.

Manejo agronómico del sistema silvopastoril

Durante la instalación del sistema se aplicaron prácticas agronómicas orientadas a mejorar las condiciones del suelo y favorecer el establecimiento de las especies vegetales. En cada hoyo de siembra de los árboles y arbustos se incorporaron 150 g de cal dolomítica y 1 kg de materia orgánica compostada. El control de malezas se realizó mediante seis plateos anuales alrededor de los árboles, cuatro limpiezas mecánicas con desbrozadora y dos aplicaciones de herbicida en franjas. Adicionalmente, se llevaron a cabo podas de formación en los árboles de abarco a partir del tercer año, eliminando bifurcaciones y ramas inferiores, sin exceder el 40 % de la copa.

Evaluación del crecimiento forestal del abarco

El crecimiento de los árboles de abarco (*Cariniana pyriformis*) fue evaluado mediante mediciones de altura total (h) y diámetro a la altura del pecho (DAP) durante un periodo de 40 meses. Las mediciones se realizaron semestralmente a partir del establecimiento del sistema, utilizando una vara graduada para la altura y un calibrador metálico (vernier) para el DAP (11). Se tomaron tres repeticiones por árbol, seleccionados aleatoriamente dentro de la parcela. A partir de estos datos se calculó la tasa absoluta de crecimiento (TAC) en altura y diámetro, expresada en centímetros por mes. Esta tasa permitió proyectar el tiempo estimado para alcanzar el DAP mínimo comercial de 40 cm. Adicionalmente, se implementaron podas de formación a partir del tercer año con el fin de inducir el desarrollo de un eje recto y único por árbol, removiendo bifurcaciones apicales o ramas competidoras.

Caracterización de la hojarasca

Para caracterizar la cantidad y el aporte nutricional de la hojarasca (biomasa) por ha, se realizó la recolección a los 24 y 42 meses de instalación del ensayo. La toma de muestras se realizó cada seis meses. La muestra de hojarasca se recolectó, se seleccionó, se pesó y se almacenó en bolsas de papel debidamente identificadas. Luego se secaron en un horno secador ACEQ a 70°C durante 72 horas y se cuantificó el contenido de nitrógeno total (N), fósforo total (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), azufre (S), hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) y boro (B). Posteriormente, se calculó la biomasa por hectárea en cada semestre y acumulación por año.

Estimación de Biomasa Forrajera

El aforo de las gramíneas se realizó mediante corte en 1 m² utilizando un marco cuadrado lanzado seis veces por pastura en transectos en zigzag. El forraje verde (FV) fue cortado a 5 cm del suelo y pesado en balanza de campo. La producción se expresó en kg de FV/ha, aplicando un factor de corrección del 20 % por pisoteo. Para los arbustos, se seleccionaron aleatoriamente seis individuos

por especie a los 42 meses de edad. Se cortaron completamente, separando hojas y tallos tiernos, los cuales fueron pesados por separado. Los valores se expresaron en kg FV/arbusto*año.

Análisis químico del suelo

Se tomaron muestras compuestas de suelo a una profundidad de 0–20 cm en dos momentos: al inicio del establecimiento del sistema (año 1) y después de cuatro años de desarrollo. Para cada muestreo, se combinaron submuestras tomadas en zigzag por parcela, formando una muestra compuesta por tratamiento. Las muestras fueron secadas al aire, tamizadas (malla de 2 mm) y enviadas al laboratorio para su análisis fisicoquímico. Se determinaron las siguientes variables: pH en agua (1:2.5), aluminio intercambiable (Al^{3+}), contenido de materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo disponible, potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), utilizando métodos estándar del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006).

Evaluación de la biodiversidad edáfica

La macrofauna edáfica fue evaluada utilizando bloques de suelo de 25 × 25 × 30 cm, siguiendo la metodología de Silva-Olaya et al., (7). La fracción superficial (10 cm) fue analizada con trampas Berlese para identificar microinvertebrados, mientras que el volumen restante fue explorado manualmente para recolectar macroinvertebrados, clasificados hasta orden taxonómico contabilizando su densidad como individuo por metro cuadrado (ind/m²)(12).

Con respecto a la microbiología del suelo se tomaron muestras compuestas de suelo a 10 cm de profundidad, combinando tres submuestras por punto de muestreo. Se emplearon medios de cultivo específicos para la cuantificación de bacterias mesófilas aerobias, hongos filamentosos y actinomicetos. El método de recuento por dilución en placa permitió expresar los resultados en unidades formadoras de colonias por gramo de suelo (UFC/g). El análisis se llevó a cabo al inicio del sistema y a los 4 años, permitiendo evaluar el efecto del SSP sobre la actividad biológica del suelo (10,13,14).

Resultados y discusión

Crecimiento forestal del abarco y producción de hojarasca

En la figura 1 se observan los resultados de crecimiento forestal en términos de altura y diámetro a la altura del pecho (h y DAP) del abarco. A los 40 meses de establecido el sistema silvopastoril los árboles de abarco alcanzaron una altura promedio de 6.36 m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 12.19 cm. Estos valores muestran un comportamiento favorable en condiciones de suelos degradados, considerando que la especie presenta un crecimiento lento en sus primeras etapas.

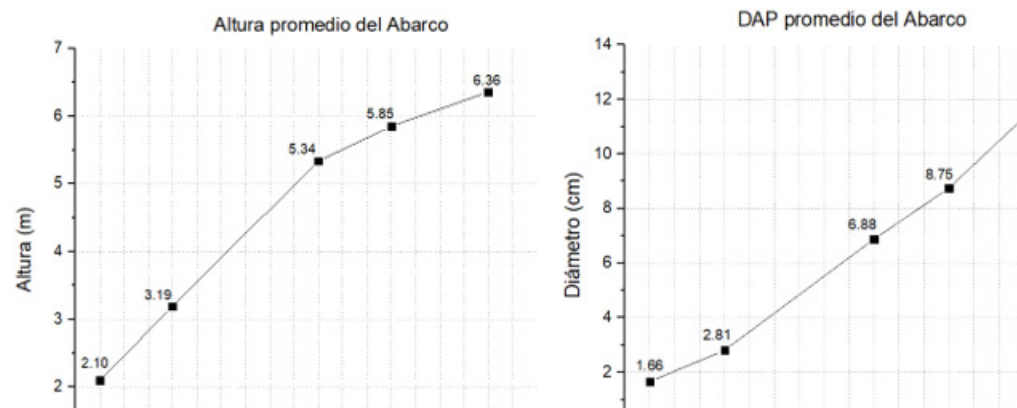


Figura 1. Altura y diámetro promedio de los maderables del Abarco en el SPF. Fuente: Autores

La formación de un eje único recto se logró en más del 80 % de los individuos evaluados, como resultado de las podas de formación implementadas a partir del tercer año. Este patrón de arquitectura aérea es deseable desde el punto de vista silvícola, ya que optimiza el volumen maderable y reduce defectos de fuste, atributos clave para la valorización futura de la especie como madera comercial fina (15). En la figura 2 se muestra la tasa absoluta de crecimiento en altura y diámetro, la cual en promedio fue de 14.75 cm/mes y 0.31 cm/mes respectivamente, con densidades de siembra en surcos triples. Estos incrementos permiten proyectar que el abarco alcanzaría el diámetro mínimo de cosecha (40 cm DAP) en un periodo aproximado de 12 años, considerando un crecimiento anual estimado de 3.72 cm. Además, se observa que el mayor desarrollo en altura ocurre durante los primeros 26 meses, tras lo cual se desacelera, mientras que el diámetro mantiene una tendencia de crecimiento sostenido, lo cual es característico de especies maderables de crecimiento intermedio adaptadas a condiciones limitantes. (16).

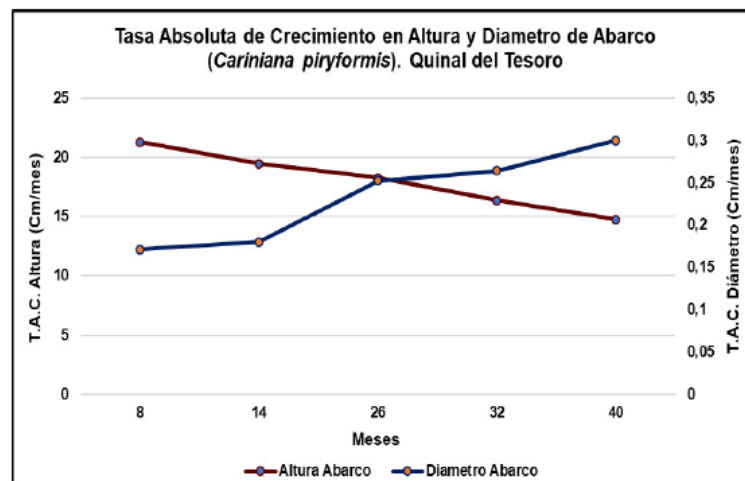


Figura 2. Tasa absoluta de crecimiento en altura y DAP del Abarco en el SPF. Fuente: Autores

Por otra parte, en la figura 3 se observa la producción de biomasa en el sistema de Praderas de Felicidad. Se observó que 320 maderables de abarco generaron un aporte significativo de biomasa que osciló entre el primer y segundo muestreo con valores entre 4.4 a 7.6 ton/ha*año de biomasa (hojarasca). La diferencia radica en la edad del sistema; la primera se tomó a los 24 meses de sembrado y la segunda a los 42 meses de edad. La cantidad total de biomasa que aporta al suelo se

incrementó conforme aumentó la edad del sistema, debido al mayor volumen de la planta a medida que la edad aumenta (17). Se ha observado que el abarco es un forestal que posee habilidad para producir biomasa en suelos con condiciones de bajo nutrientes, proporcionando elementos minerales que anualmente se estarían depositando sobre el suelo producto de la caída natural para formar la capa de mantillo, seguido del proceso de descomposición y consecuentemente la liberación lenta de nutrientes (13,17).

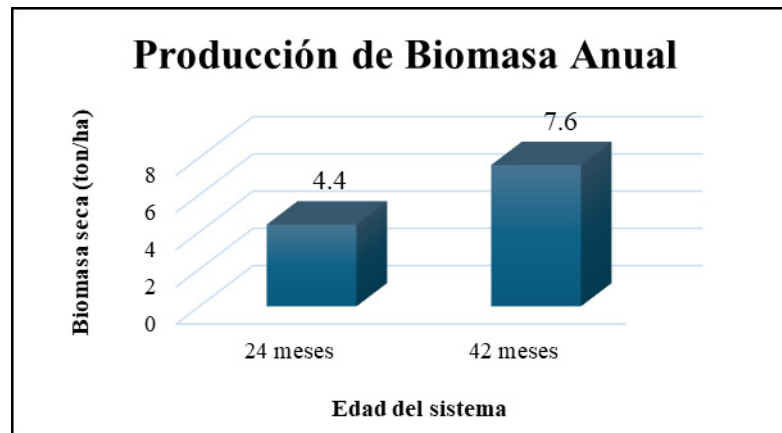


Figura 3. Producción de biomasa en el sistema Praderas de Felicidad, Año 2015 y 2017. Fuente: Autores

Además, su mineralización y su disponibilidad para ser nuevamente absorbidos por el sistema constituyendo el reciclaje de nutrientes. Otro factor importante es la densidad de la plantación el cual también juega un papel importante en la cantidad de biomasa que se deposita en el suelo. En síntesis, a mayor densidad de abarco, mayor es la cantidad de producción de biomasa (18,19). La hojarasca juega un papel importante al proveer cobertura al suelo modificando el ambiente edáfico, conforme se descompone y se convierte en fuente importante de materia orgánica activando el ciclo biogeoquímico (7,17). A nivel funcional, se observó una cobertura significativa de hojarasca bajo el dosel de los árboles a los cuatro años de edad, lo que indica una dinámica activa de aporte de residuos orgánicos. El análisis químico de la hojarasca reveló contenidos de nutrientes esenciales como nitrógeno (13.3 g/kg), fósforo (1.1 g/kg), potasio (9.2 g/kg), calcio (19.7 g/kg) y magnesio (4.5 g/kg). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para especies forestales con alta capacidad de reciclaje de nutrientes (9), y sugieren que el abarco puede contribuir de manera significativa a la mejora de la fertilidad del suelo a través del retorno de biomasa foliar. Estos resultados respaldan el uso del abarco como especie estructural en sistemas silvopastoriles multifuncionales, no solo por su potencial maderable nativo, sino por su papel como facilitador de procesos de restauración ecológica, como el aporte de sombra, la retención de humedad, y la restitución de nutrientes al suelo a través de la hojarasca (3,9).

Aporte de nutrientes por biomasa del abarco

La biomasa vegetal representa la principal reserva de nutrientes de las Praderas de Felicidad. Por ello, para comprender el proceso de ciclaje de nutrientes es necesario conocer la biomasa del ecosistema por unidad de área (10). La cantidad de nutrimentos provenientes de la biomasa que retorna al suelo está directamente relacionada con la cantidad de residuos que caen, y la concentración de nutrimentos en los mismos, los cuales varían con la edad y la especie (20).

De acuerdo con los resultados preliminares, se observa en la tabla 1 que el mayor aporte en kg de nutrimento/tonelada biomasa*ha*año fue de 15.54 de N, seguido de 8.35 de Ca y 6.62 de K. Respecto a los micronutrientes que tuvieron mayor presencia en la hojarasca fueron 1.4 kg/ton*ha*año de Fe y 0.6 kg/ton*ha*año de Zn.

Tabla 1. Aporte de nutrientes en kg por tonelada de biomasa por hectárea al año (kg/ton*ha*año)

Elemento	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	B
kg/ton*ha*año	15.54±0.65	2.28±0.12	6.62±0.70	8.35±1.23	1.98±0.15	3.96±0.42	1.4±0.36	0.6±0.09	0.2±0.01

Fuente: Autores

La caída constante de hojas, semillas, ramas y la mortalidad de las raíces (especialmente las finas) constituyen un aporte constante de materia orgánica y nutrientes al suelo, los cuales después de ser descompuestos y mineralizados pueden ser aprovechados por las pasturas. Asimismo, el tipo de tejido determina la cantidad de nutrientes a aportar, debido a que la concentración de elementos minerales es más rica en las hojas, luego en las ramas, tallos y raíces (6,7,13). Para hacer que el sistema funcione mejor y el reciclaje de nutrientes sea eficiente se necesita conocer bien cada uno de los elementos (especies) que los integren; es decir, se debe saber cuáles especies se deben combinar, debido a que se necesitan en el mismo espacio plantas que tengan diversos valores nutritivos en las hojas y distintas tasas de descomposición (rápida, mediana y lenta) para asegurar el equilibrio nutricional, un flujo constante de nutrientes y evitar las pérdidas. El manejo de gramíneas, acompañadas con árboles, permite que una fracción representativa de nutrientes, que se extrae de la solución del suelo, retorne a ella mediante la deposición de follaje y de residuos del pastoreo o por las podas en la superficie del suelo. Esta mayor deposición de M.O contribuye a transformar las características físicas del suelo, principalmente su estructura (3,7,21). En la figura 4 se observa parte de los diseños establecidos en el sistema de Praderas de Felicidad.



Figura 4. Paisajes de las Praderas de Felicidad en el Quinal del Tesoro. Fuente: Autores

Producción de biomasa forrajera

En la Tabla 2 se muestra la producción de biomasa obtenida por separado en hojas y en tallos tiernos de cada arbusto forrajero. Se encontró una disponibilidad por arbusto en hojas de

Trichanthera gigantea (aro) de 7.6 kg FV/año, *Morus alba* L. (morera) de 8.1 kg FV/año y *Gliricidia sepium* (matarratón) de 6.7 kg FV/año. La producción de tallos también fue significativa, con valores de 5.9 kg FV/año para aro y morera, y 5.1 kg FV/año para matarratón. Aunque este estudio no evaluó directamente el consumo, se observó una mayor preferencia del ganado por la morera, dato que coincide con lo reportado por Vargas y Estrada (22), quienes encontraron mayor consumo en follaje de morera, seguido por matarratón y, en menor proporción, por el follaje de aro.

Tabla 2. Producción de forraje verde (FV) por arbustos forrajeros

No. Muestra/ arbusto	Aro (<i>Trichanthera gigantea</i>)		Morera (<i>Morus alba</i> L)		Matarratón (<i>Gliricidia sepium</i>)	
	Hojas (kg)	Tallos (kg)	Hojas (kg)	Tallos (kg)	Hojas (kg)	Tallos (kg)
1	2.2	1.8	2.5	1.7	1.8	1.3
2	1.9	1.5	2.2	1.4	1.6	1.2
3	1.7	1.4	1.9	1.3	1.4	1
4	1.8	1.4	1.9	1.4	1.7	1.2
5	2	1.5	1.8	1.4	1.7	1.4
6	1.8	1.3	1.8	1.5	1.9	1.5
Promedio kg/ arbusto	1.9±0.18	1.5±0.17	2.0±0.28	1.5±0.14	1.7±0.17	1.3±0.18
Promedio kg/año	7.6±0.72	5.9±0.69	8.1±1.10	5.8±0.55	6.7±0.69	5.1±0.70

Fuente: Autores

De acuerdo con los valores presentados en la tabla 2 el mayor rendimiento de biomasa forrajera comestible (hojas + tallos tiernos) se obtuvo en la especie Morera con una disponibilidad total por arbusto de 13.9 kg de FV/año, seguido del Aro con 13.5 kg de FV/año y por último el Matarratón que alcanzó una producción promedio por arbusto de 11.8 kg de FV/año. Varios estudios (16,22,23) mencionan que estas especies arbustivas poseen un elevado potencial forrajero en hojas y ramas tiernas y que, por sus cualidades nutricionales y su palatabilidad, pueden constituir buenos suplementos de la base alimentaria en un SSP, mejorar la dieta del ganado en pastoreo y aportar un volumen de forraje en períodos de escasez. Este estudio demostró que las especies forrajeras se adaptaron a las condiciones agroclimáticas, pero además toleraron el régimen de manejo agronómico a que fueron sometidas. El mayor uso forrajero podría quizás estar asociado a características específicas relacionadas con su producción de biomasa o palatabilidad por parte de los animales (22). El nuevo enfoque es promover árboles forrajeros en mezclas o de distintos follajes arbóreos, debido a que se han tenido resultados positivos que han demostrado que el consumo de arbustos mezclados era más alto que aquel de las especies individuales.

En cuanto a la base herbácea del sistema, los pastos *B. humidicola* y *B. decumbens* mostraron una producción promedio de 1.76 kg/m² y 1.87 kg/m² respectivamente, como se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Producción de pasto verde (kg/m²*corte) en pasturas del SPF

No. Muestra	Pastos	
	Humidícola (kg/m ²)	Decumbes (kg/m ²)
1	1.55	1.65
2	1.71	1.85
3	1.66	1.70
4	1.94	2.01
5	1.80	1.75
6	1.88	2.23
Promedio	1.76±0.15	1.87±0.22

Fuente: Autores

Extrapolando estos valores a una hectárea y considerando un factor de corrección del 20 % por pérdidas por pisoteo, se estimaron rendimientos anuales de 14,080 kg FV/ha para *B. humidicola* y 14,960 kg FV/ha para *B. decumbens*. Estos resultados reflejan una buena adaptación de ambas especies a las condiciones edáficas del sitio y consolidan su papel como base forrajera eficiente en el sistema. La diferencia de producción entre ambas especies fue del 8 %, siendo *B. decumbens* la de mayor rendimiento. Este comportamiento puede atribuirse a su reconocida capacidad de adaptación a suelos ácidos, de baja fertilidad y textura franco-arenosa, condiciones predominantes en el área de estudio. Los valores obtenidos se encuentran dentro de rangos reportados para sistemas silvopastoriles en suelos de fertilidad media (24,25) y superan los rendimientos típicos de potreros degradados sin cobertura arbórea, lo que sugiere un efecto positivo del sistema sobre la cobertura vegetal, el microclima y la eficiencia en el reciclaje de nutrientes. La interacción entre gramíneas, arbustos y árboles dentro del sistema permitió garantizar una disponibilidad sostenida de biomasa comestible, incluso bajo condiciones de limitación edáfica, favoreciendo la integración de distintas fuentes forrajeras de forma complementaria.

Calidad del suelo y biodiversidad edáfica

El establecimiento del sistema silvopastoril con *Cariniana pyriformis* en suelos degradados del Magdalena Medio generó mejoras notables en las propiedades fisicoquímicas del suelo tras cuatro años de implementación. En la tabla 4 se muestra la comparación de los 2 análisis de suelo en diferentes tiempos.

Tabla 4. Caracterización química del suelo realizada en el 2013 y 2017 en el SPF, finca el Quinal del Tesoro.

No. De muestreo	pH	Al meq/100 g	% Materia Orgánica	P (mg/kg)	cmol/kg				
					K	Ca	Mg	Na	CIC
Muestra 2013	4.5	4.6	2.0	2.10	0.09	1.35	0.26	0.05	3.70
Muestra 2017	4.8	0.5	3.0	4.05	0.13	1.28	0.31	0.05	3.28

Fuente: Autores



El pH aumentó de 4.5 a 4.8, reflejando una disminución de la acidez, mientras que el contenido de aluminio intercambiable se redujo significativamente de 4.6 a 0.5 meq/100 g, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las especies establecidas (26). La materia orgánica incrementó del 2.0 % al 3.0 %, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se elevó de 8.5 a 14.4 meq/100 g, evidenciando una mayor capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes (27). Asimismo, se observó un aumento en los niveles de fósforo (de 5.6 a 12.2 mg/kg), potasio (de 0.23 a 0.45 cmol/kg), calcio (de 0.35 a 2.65 cmol/kg) y magnesio (de 0.22 a 1.52 cmol/kg) (20,28). Estos cambios pueden atribuirse al efecto combinado del retorno de biomasa por hojarasca del abarco, la cobertura vegetal permanente y la reducción de la escorrentía y la erosión. Este tipo de mejora ha sido documentado en sistemas silvopastoriles por diversos autores, quienes destacan el papel de los árboles en el reciclaje de nutrientes y en la estabilización de condiciones edáficas (3,25).

La recuperación química del suelo fue acompañada por una respuesta positiva en la biodiversidad edáfica como se muestra en la figura 5.

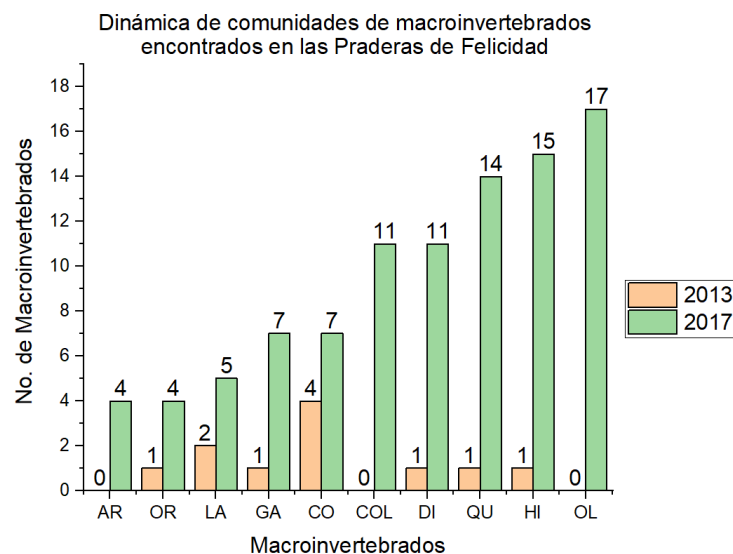


Figura 5. Número de macroinvertebrados encontrados en el suelo de las Praderas de Felicidad. Año 2013 – 2017. AR: Arácnidos; OR: Ortópteros; LA: Larvas; GA: Gasterópodos; CO: Coleópteros; COL: Colémbolos; DI: Diplópodos; QU: Quilópodos; HI: Himenópteros; OL: Oligoquetos. Fuente: Autores

La densidad de macrofauna aumentó de 11 a 95 individuos/m² entre el primer y cuarto año, destacándose la *Oligochaeta* (Lombrices), *Hymenoptera* (Hormigas, Avispas), *Chilapoda* (Cienpies), *Diplopoda* (Milpies) y *Collembola*, grupos funcionales indicativos de suelos activos y saludables (7,29). La presencia abundante de lombrices sugiere una mejora en la estructura del suelo, aireación, y procesos de mineralización de materia orgánica. Este incremento en macroinvertebrados se relaciona con el incremento de la cobertura vegetal, el depósito de hojarasca y la ausencia de disturbios mecánicos intensivos (10,12).

Con respecto a los análisis microbiológicos, éstos mostraron un aumento en la actividad biológica del suelo. En la tabla 5 se muestran los dos resultados de los recuentos microbiológicos obtenidos de hongos, bacterias y actinomicetos antes y después del establecimiento del SPF.

Tabla 5. Contenido de microorganismos en UFC/g de suelo antes y después del establecimiento de SPF.

Microorganismo	Concentración UFC/g de Suelo	
	Muestra antes del SPF	Muestra después del SPF
Hongos	4.36 x 10 ⁴	5.1 x 10 ⁴
Bacterias	1.3 x 10 ⁷	4 x 10 ⁷
Actinomicetos	2.25 x 10 ⁴	3.6 x 10 ⁴

Fuente: Autores

Las bacterias mesófilas aerobias pasaron de 1.3×10^7 a 4.0×10^7 UFC/g, los actinomicetos de 2.25×10^4 a 3.6×10^4 UFC/g, y los hongos filamentosos de 6.1×10^4 a 8.2×10^4 UFC/g. Estos resultados indican una activación del metabolismo edáfico y una mejora en las condiciones para la descomposición de materia orgánica y el ciclado de nutrientes. El aumento en microorganismos benéficos está estrechamente asociado al aporte continuo de residuos vegetales, la sombra del dosel y las mejores condiciones microclimáticas del suelo (10,13,30). Los resultados evidencian que el sistema silvopastoril con abarco propició la recuperación parcial del suelo tanto en términos de fertilidad como de diversidad biológica. Esta sinergia entre componentes bióticos y abióticos contribuye a la prestación de servicios ecosistémicos esenciales como la formación y conservación del suelo, el reciclaje de nutrientes y la regulación de procesos biogeoquímicos, consolidando al sistema como una estrategia eficaz de restauración productiva de suelos ganaderos tropicales.

Conclusiones

El sistema silvopastoril con *Cariniana pyriformis* establecido en suelos degradados del Magdalena Medio demostró ser una estrategia efectiva para integrar restauración ecológica y producción ganadera sostenible. El abarco mostró buen desempeño en crecimiento y arquitectura forestal, con potencial maderable a mediano plazo y aportes significativos de hojarasca rica en nutrientes. La base forrajera, compuesta por gramíneas adaptadas y arbustos multipropósito, garantizó una oferta estable de biomasa comestible, incluso bajo condiciones de alta acidez y baja fertilidad. Este diseño diversificado favoreció la resiliencia alimentaria y mejoró el confort animal, reduciendo el estrés térmico mediante sombra.

Además, se evidenciaron mejoras sustanciales en la calidad del suelo: aumento del pH, materia orgánica y nutrientes disponibles, junto con un incremento en la macrofauna y la actividad microbiológica. Estos cambios refuerzan el rol del sistema como proveedor de servicios ecosistémicos clave, como la regulación del suelo y la biodiversidad edáfica.

Este modelo, alineado con el enfoque de “Praderas de Felicidad”, permite generar ingresos a partir de madera, forraje y otros productos, al tiempo que contribuye a la conservación del hábitat y a la transformación de la ganadería tropical hacia esquemas más resilientes, multifuncionales y ambientalmente responsables.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Cristian Giovanni Palencia Blanco Gildardo Efraín Palencia Calderón. Curación de datos: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Análisis formal: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón. Financiamiento: Luis Enrique Palencia Calderón, Gildardo Efraín Palencia Calderón. Investigación: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Metodología: Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón, Cristian Giovanni Palencia Blanco. Dirección de Proyecto: Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Recursos: Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Software: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón. Supervisión: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Validación: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Redacción - borrador original - Elaboración: Cristian Giovanni Palencia Blanco, Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Cristian Giovanni Palencia Blanco. Gildardo Efraín Palencia Calderón, Luis Enrique Palencia Calderón.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

References

1. Federación Colombiana de Ganaderos - FEDEGAN. Acción de mitigación nacionalmente apropiada NAMA. De la ganadería bovina sostenible en Colombia. 2021;150. <https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2021/10/Reporte-NAMA-Bovina-de-Colombia.pdf>
2. Sánchez-Romero R, Balvanera P, Castillo A, Mora F, García-Barrios LE, González-Esquivel CE. Management strategies, silvopastoral practices and socioecological drivers in traditional livestock systems in tropical dry forests: An integrated analysis. For Ecol Manage. 2021;479:118506. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118506>
3. Murgueitio E, Calle Z, Uribe F, Calle A, Solorio B. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. For Ecol Manage. 2011;261(10):1654-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>
4. Varela E, Olaizola AM, Blasco I, Capdevila C, Lecegui A, Casasús I, et al. Unravelling opportunities, synergies, and barriers for enhancing silvopastoralism in the Mediterranean. Land use policy. 2022;118:106140. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106140>
5. Schinato F, Munka MC, Olmos VM, Bussoni AT. Microclimate, forage production and carbon storage in a eucalypt-based silvopastoral system. Agric Ecosyst Environ. 2023;344:108290. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108290>
6. Nahed-Toral J, Valdivieso-Pérez A, Aguilar-Jiménez R, Cámara-Cordova J, Grande-Cano D. Silvopastoral systems with traditional management in southeastern Mexico: A prototype of livestock agroforestry for cleaner production. J Clean Prod. 2013;57:266-79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.020>
7. Silva-Olaya AM, Olaya-Montes A, Polanía-Hincapié KL, Cherubin MR, Duran-Bautista EH, Ortiz-Morea FA. Silvopastoral systems enhance soil health in the amazon region. Sustainability. 2022;14:1-19. <https://doi.org/10.3390/su14010320>



8. Rivera J, Chará J, Barahona R. Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Trop Subtrop Agroecosystems*. 2016;19:237-51. <https://doi.org/10.56369/tsaes.2178>
9. Apan-Salcedo GW, Jiménez-Ferrer G, Nahed-Toral J, Pérez-Luna E, Piñeiro-Vázquez T. Massification of Silvopastoral Systems: a Long and Winding Road. *Trop Subtrop Agroecosystems*. 2021;24(103):1-17. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3524>
10. Roncallo B, Murillo J, Bonilla R, Barros J. Evolution of soil properties in agroforestry arrangement based on red Ceiba (*Pachira quinata* (Jacq.) W.S. Alverson). *Rev Corpoica - Cienc y Tecnol Agropecu*. 2012;13(2):167-78. https://doi.org/10.21930/rcta.vol13_num2_art:252
11. Barbosa GF, Marques Filho WC, Ensinas SC, Flávio DC, Lima IM de O, Silva MFG, et al. Silvicultural performance of eucalyptus and animal behavior in a silvopastoral system. *Biosci J*. 2019;35(4):1179-87. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n4a2019-42110>
12. Teutscherová N, Vázquez E, Sotelo M, Villegas D, Velásquez N, Baquero D, et al. Intensive short-duration rotational grazing is associated with improved soil quality within one year after establishment in Colombia. *Appl Soil Ecol*. 2021;159:103835. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103835>
13. Medina CA, Escobar I, Corrales Alvarez JD, Navas Panadero A, Tenjo AI, Borrás Sandoval LM. Efecto de practicas agroecologicos sobre las características del suelo de lecheria especializada del Tropico alto colombiano. *Livest Res Rural Dev*. 2020;32(5):68-84. <https://surl.li/ujtrpa>
14. Alexander M. Introducción a la microbiología del suelo. In: AGT. 1994. p. 491.
15. de Aguiar Júnior AL, de Oliveira Neto SN, Müller MD, Soares CPB, Pena RF, Calsavara LHF. Eucalypt modeling as a function of spatial arrangement in agrosilvopastoral systems. *Agrofor Syst*. 2023;97(4):495-508. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00805-7>
16. Gomez-Castro H, Pinto-Ruiz R, Guevara-Hernandez F, Gonzalez-Reyna A. Estimations of aerial biomass and sequestered carbon in *Gliricidia sepium* (lam.) and *Leucaena leucocephala* (jacq.) and its application in silvopastoral systems. *Infor Tec Econ Agrar*. 2010;106(4):256-70. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20113077366>
17. Giweta M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: A review. *J Ecol Environ*. 2020;44(1):1-9. <https://doi.org/10.1186/s41610-020-0151-2>
18. López-Vigo O, Sánchez-Santana T, Iglesias-Gómez M, Lamela-López L, Soca-Pérez M, Arece-García J, et al. Silvopastoral systems as alternative for sustainable animal production in the current context of tropical livestock production. *Pastos y Forrajes*. 2017;40(2):83-95. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173323275>
19. Buitrago-Guillen ME, Ospina-Daza LA, Narváez-Solarte W. Silvopastoral systems: An alternative in the mitigation and adaptation of bovine production to climate change. *Bol Cient del Cent Museos*. 2018;22(1):31-42. <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.2>
20. Almeida LL de S, Frazão LA, Lessa TAM, Fernandes LA, Veloso ÁL de C, Lana AMQ, et al. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Res*. 2021;205:104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>
21. Polanía-Hincapié KL, Olaya-Montes A, Cherubin MR, Herrera-Valencia W, Ortiz-Morea FA, Silva-Olaya AM. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*. 2021;386:114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>



22. Vargas-sánchez JE, Estrada-álvarez J. Evaluación de la producción y la calidad nutricional de cinco especies forrajeras (arbustivas y arbóreas) para corte en condiciones de bosque seco tropical. *Rev Vet Y Zootec*. 2011;5(2):55-67. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/4457>
23. Sánchez-Romero R, Mora-Ardila F, Val-Arreola D, González-Esquivel CE. Estimation of the forage potential of trees in silvopastoral systems of a dry tropical forest in Jalisco, Mexico. *Agrofor Syst*. 2022;96(1):129-45. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00704-9>
24. Gonzalez Quintero R, García EH, Florez F, Burkart S, Arango J. A case study on enhancing dairy cattle sustainability: The impact of silvopastoral systems and improved pastures on milk carbon footprint and farm economics in Cauca department, Colombia. *Agrofor Syst*. 2024;98(8):3001-18. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01070-y>
25. Sandoval DF, Florez JF, Enciso Valencia KJ, Sotelo Cabrera ME, Stefan B. Economic-environmental assessment of silvo-pastoral systems in Colombia: An ecosystem service perspective. *Heliyon*. 2023;9(8):e19082. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19082>
26. Soons MB, Hefting MM, Dorland E, Lamers LPM, Versteeg C, Bobbink R. Nitrogen effects on plant species richness in herbaceous communities are more widespread and stronger than those of phosphorus. *Biol Conserv*. 2017;212:390-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.006>
27. Ågren GI, Wetterstedt JÅM, Billberger MFK. Nutrient limitation on terrestrial plant growth - modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. *New Phytol*. 2012;194(4):953-60. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04116.x>
28. Arrobas M, Conceição N, Pereira E, Martins S, Raimundo S, Brito C, et al. Dolomitic limestone was more effective than calcitic limestone in increasing soil pH in an untilld olive orchard. *Soil Use Manag*. 2023;39(4):1437-52. <https://doi.org/10.1111/sum.12948>
29. Gálvez-Cerón A, Reina-López A, Meneses-Estrada E. Cuantificación de macrofauna edáfica en un sistema silvopastoril y uno convencional en bosque seco. *Rev Invest Pecu*. 2016;4(2):13-25. <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/revip/article/view/2564>
30. Sathya A, Vijayabharathi RB, Gopalakrishnan S. Soil Microbes: The Invisible Managers of Soil Fertility. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*. 2016;2:1-16. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_1