

Implementación de un Sistema Silvopastoril y su Efecto en la Salud del suelo, Producción de Biomasa y Calidad Nutricional de Forrajes en un Bosque Seco Tropical

Edward Geovanny Aponte Cárdenas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Zootecnista

Director

Julián Mauricio Botero Londoño

PhD., Zootecnista

Codirector

Elsa Judith Macías Bermúdez

MSc., Ingeniera Geóloga

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Zootecnia

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico el éxito de este proyecto a mi nonita Leonilde y a mi tía Nubia, quienes en vida me motivaron, aconsejaron y me apoyaron en mi carrera y aunque ya no están físicamente conmigo, sus enseñanzas nunca se apagan, sus legados de valores y principios quedaron en mi alma marcados.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por bendecir mi vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, por ser mi fortaleza en los momentos de dificultad y debilidad, gracias a Dios he logrado culminar mi carrera.

Gracias a mi familia, mi madre, mi hermana y mi abuelo por ser los promotores de mis sueños y quienes con su amor, compañía, paciencia y esfuerzo me han permitido cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcarme ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades, confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado, gracias por el apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por estar conmigo en todo momento. Gracias familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento me acompañan y motivan en todos mis sueños, metas y me inspiran para no darme por vencido, por eso hoy tengo el fruto de todos mis esfuerzos.

Agradezco a la universidad por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de formarme y avanzar en mi carrera profesional, a los Directivos y Docentes por su trabajo, por su gestión y apoyo, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender, gracias por transmitirme sus conocimientos a lo largo de la preparación en mi carrera.

A la familia Murillo Estupiñán por permitirme realizar este significativo proyecto, por creer en mí, por sus aportes para mantenerme equilibrado siempre, a pesar de los obstáculos, porque siempre hubo unión y por brindarme lo más valioso para mí, su amistad incondicional y por llenarme de motivación para que esto pudiera ser posible y compartir momentos agradables.

A mi director y codirectora del proyecto, quienes, con su experiencia, conocimientos, motivación y consejos, me guiaron y orientaron en este proyecto y forman parte de este objetivo alcanzado.

A mis amigos y compañeros que en el andar por la vida nos hemos ido encontrando porque cada de ustedes han aportado y motivado mis sueños y esperanzas de construir el logro obtenido hoy.

A todas las personas que estuvieron apoyándome e hicieron que el proyecto se realizara con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos, a todos, gracias por ser partícipes de este proceso que se ve reflejado en la culminación de mi paso por la Universidad.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1.Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2.Marco Teórico.....	14
2.1 Degradación ecosistémica.....	14
2.2 Compactación del Suelo:	14
2.3 Erosión del suelo.....	15
2.4 Sistemas silvopastoriles:	16
2.5 Forrajes:	17
2.5.1 Leucaena leucocephala	17
2.5.2 Panicum maximum CV Mombasa.....	18
2.5.3 Pasto Guinea	19
2.6 Captura de carbono	20
2.7 Gases de efecto invernadero (GEI).....	20
2.8 Actividad microbológica del suelo	20
2.9 Ganadería sostenible en Colombia.....	21
3.Metodología.....	22
3.1 Localización:.....	22
3.2 Diseño Experimental:.....	22
3.3 Proceso de siembra	23

3.4 Pastoreo.....	24
3.5 Medición de variables:.....	24
3.5.1 Temperatura y humedad:	24
3.5.2 Producción de biomasa:	24
3.5.3 Medición de gases de efecto invernadero:	25
3.6 Fase de laboratorio:.....	25
3.6.1 Análisis químico del suelo:.....	25
3.6.2 Calidad nutricional de forrajes:.....	26
3.6.2 Captura de Carbono:	26
3.7 Análisis estadístico.....	26
4.Resultados	27
4.1 Temperatura y Humedad relativa.....	27
4.1.1. Temperatura y humedad de sistema silvopastoril.....	27
4.2 Biomasa.....	28
4.2.1 Biomasa por m ² y hectárea/año en Materia Fresca y Materia seca.....	28
4.3 Captura de carbono en el sistema.....	29
4.4 Contenido de nutrientes en los pastos.....	30
4.4 Análisis de suelo	31
4.5 Producción gases efecto invernadero.....	32
5.Discusión	33
6.Conclusiones	43
7.Recomendaciones	44
Referencias Bibliografía	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Temperatura (°C) afuera y adentro del SST en las horas de la mañana y la tarde.....	27
Tabla 2. Biomasa por metro cuadrado y hectárea/año en materia fresca y materia seca.....	29
Tabla 3. Captura de carbono del Sistema.....	29
Tabla 4. Contenido de proteína, energía y cenizas en los forrajes	30
Tabla 5. Análisis de suelo antes y después del establecimiento del sistema silvopastoril.....	31

Lista de Ilustraciones

	Pág
Ilustración 1. <i>Diagrama de la producción de gases de efecto invernadero en el sistema silvopastoril vs el suelo desnudo.....</i>	32
Ilustración 2. <i>Concentración de CO2 en el sistema silvopastoril vs suelo desnudo</i>	33

Resumen

Título: Implementación de un Sistema Silvopastoril y su Efecto en la Salud del suelo, Producción de Biomasa y Calidad Nutricional de Forrajes en un Bosque Seco Tropical*

Autor: Edward Geovanny Aponte Cárdenas**

Palabras Clave: Degradación ecosistémica, producción sostenible, *Leucaena leucocephala*.

Descripción: Las prácticas ganaderas convencionales generan diversos problemas asociados con la degradación de los ecosistemas, la erosión de los suelos, la deforestación de los bosques y la poca rentabilidad de los productores. Los sistemas silvopastoriles se han convertido en alternativas sostenibles para mitigar los efectos negativos que puede causar la ganadería sobre las praderas y mejorar la productividad de los animales, ofreciéndoles condiciones adecuadas para su confort, por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de un sistema silvopastoril sobre la salud del suelo, producción de biomasa y calidad nutricional de los forrajes, en un bosque seco tropical del municipio de Capitanejo Santander, para ello, se seleccionó una parcela donde se sembró *Leucaena leucocephala*, Mombasa y Guinea, allí pastoreó una vaca y su ternera. Se comparó el SSP con un lote sembrado en Guinea adyacente al proyecto. Los resultados arrojan una disminución de 3°C y 3% de temperatura y humedad relativa respectivamente; estadísticamente los resultados en las demás variables fueron superiores en el sistema silvopastoril con respecto a la pradera convencional, sin embargo, se encontró que las emisiones de GEI fueron superiores en el SSP, atribuyéndose esto a la intensa actividad microbiana del suelo. Se concluye que los sistemas silvopastoriles son una alternativa ideal para mejorar las condiciones del entorno, incrementar la calidad del suelo y mejorar los parámetros nutricionales de los forrajes.

* Trabajo de Grado

** Instituto de Proyección Regional y a Distancia IPRED. Facultad de Zootecnia. Director: Julián Mauricio Botero Londoño. PhD en Ciencias agrarias con énfasis en manejo de suelos y aguas. Codirector: Elsa Judith Macías. MSc., Ingeniera Geóloga.

Abstract

Title: Implementation of a Silvopastoral System and its Effect on Soil Health, Biomass Production and Forage Nutritional Quality in a Tropical Dry Forest. *

Author(s): Edward Geovanny Aponte Cárdenas **

Key Words: Ecosystem degradation, sustainable production, *Leucaena leucocephala*

Description: Conventional livestock practices generate various problems associated with ecosystem degradation, soil erosion, forest deforestation and low profitability for producers. Silvopastoral systems have become sustainable alternatives to mitigate the negative effects that livestock farming can cause on pastures and improve animal productivity, offering adequate conditions for their comfort, therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of a silvopastoral system on soil health, biomass production and nutritional quality of forages in a tropical dry forest in the municipality of Capitanejo Santander, for this purpose, a plot was selected where *Leucaena leucocephala*, Mombasa and Guinea were planted, where a cow and her calf grazed. The SSP was compared with a plot planted in Guinea adjacent to the project. The results show a decrease of 3°C and 3% in temperature and relative humidity, respectively; statistically, the results for the other variables were higher in the silvopastoral system than in the conventional pasture; however, it was found that GHG emissions were higher in the SSP, attributing this to the intense microbial activity of the soil. It is concluded that silvopastoral systems are an ideal alternative to improve environmental conditions, increase soil quality and improve forage nutritional parameters.

* Degree Work

** Institute of Regional projection and Distance Education IPRED. animal science program. Director: Mauricio Botero Londoño. PhD in agricultural sciences with emphasis on soil and water management. codirector: Elsa Judith Macias. MSc., Geological Engineer.

Introducción

La degradación ecosistémica y la sequía son los factores críticos que más atentan contra la integridad de las zonas de bosque seco tropical, que representan alrededor del 42% de los ecosistemas tropicales del mundo (Murphy & Lugo, 1986, citado por Dupin et al., 2018). Se estima que el 50% - 75% de las franjas de bosque seco tropical se encuentran en América Central y del Sur, siendo México, Bolivia y Brasil los países predominantes (Portillo et al., 2010, citado por Stan & Sánchez, 2019).

Colombia por su parte, cuenta con una extensa área de bosques secos tropicales que van desde San Andrés y Providencia, Guajira, Córdoba, valle de los ríos Cauca y Sucio (Antioquia, Cauca y Valle), valle del río Magdalena (Cesar, Cundinamarca, Huila, Tolima, Norte de Santander) y el cañón del río Chicamocha (Boyacá y Santander) (Hernández & Sánchez, 1990, citado por Alcázar et al 2021). Sin embargo, el 90% de la cobertura de estas zonas, ha sido transformada por actividades antrópicas para el establecimiento de producciones agrícolas, ganaderas, urbanización (García et al 2014, citado por González et al 2018). La deforestación ha sido una técnica convencional que se ha empleado para transformar áreas nativas en praderas con el fin de producir sistemas ganaderos extensivos y agrícolas que en gran mayoría se consolidaron al manejo de monocultivos, quienes han tenido durante mucho tiempo un impacto negativo en la salud y el bienestar del suelo (Bussoni et al., 2021). Estas prácticas agrícolas han socavado la salud y la integridad del suelo, reduciendo la biodiversidad, agotando los nutrientes del suelo y aumentando la vulnerabilidad a plagas y enfermedades; por lo tanto la implantación sistemas silvopastoriles se considera como una alternativa favorable, donde la integración de árboles,

ganado y cultivos en el mismo terreno, mejoran la fertilidad del suelo, aumentan la biodiversidad y proporcionan una fuente de ingresos más sostenible a los agricultores (Hanisch et al., 2019) .

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de un sistema silvopastoril sobre la salud del suelo, producción de biomasa, calidad nutricional de los forrajes y condiciones de desarrollo en un bosque seco tropical del municipio de Capitanejo Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar el efecto de la implementación de un sistema silvopastoril sobre la salud del suelo, en el municipio de Capitanejo Santander.

Examinar el efecto de la implementación de un sistema silvopastoril sobre las condiciones ambientales de desarrollo de los forrajes, en el municipio de Capitanejo Santander.

Determinar la producción de biomasa y calidad nutricional de forrajes de un sistema silvopastoril, en el municipio de Capitanejo Santander.

2. Marco Teórico

2.1 Degradación ecosistémica

El termino referido a la degradación de los ecosistemas, es ampliamente debatido ya que, abarca diversos campos como estructura, función, servicio y/o resiliencia de los ecosistemas. Las definiciones que se acercan a la estructura y función de estos se asocian principalmente con la pérdida de biodiversidad, mientras que las que se relacionan con los servicios que estos prestan se centran con la disminución o alteración de beneficios para los seres humanos; por otro lado, las que se relacionan con la resiliencia hacen referencia a degradación que pone de relieve los cambios en los vínculos clave y la integridad del ecosistema a lo largo del tiempo (Cannicci et al., 2021). Por lo tanto, se entiende como degradación ecosistémica a la pérdida de diversidad, estructura, función y/o resiliencia, más allá de los límites de la variación natural dentro de un sistema dado debido a factores antropogénicos o a la influencia de las actividades antropogénicas sobre los factores naturales (Yando et al., 2021).

2.1.1 Degradación del Suelo:

Es un fenómeno físico que altera la estructura del suelo, limita la infiltración de agua y aire y reduce la penetración de las raíces en el suelo. Esta tiene diversos efectos sobre sus propiedades físicas, como la densidad, la resistencia y la porosidad los cuales pueden ser cuantificados utilizando parámetros de laboratorio. (Shah et al., 2017) La compactación del suelo puede alterar la movilidad de los elementos mayores y menores afectando los ciclos del nitrógeno y del carbono, lo que puede aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la compactación severa del suelo tiene consecuencias negativas en las plantas, como deformación de las raíces, retraso en el crecimiento de los brotes, germinación tardía, baja tasa de germinación y alta tasa de

mortalidad. También se ha observado que la compactación del suelo reduce la biodiversidad al disminuir la biomasa microbiana, la actividad enzimática, la fauna y la flora del suelo. Actualmente, existen métodos para predecir los efectos de la compactación del suelo, pero estos modelos tienen limitaciones y no consideran la existencia de trayectorias preferenciales de propagación de tensiones y localización de la deformación (Nawas et al., 2013).

La compactación del suelo es la reducción del volumen de una masa específica de suelo debido a las fuerzas externas que actúan sobre él. En condiciones naturales (sin intervención humana), pueden encontrarse distintos niveles de compactación del suelo, que se explican por las condiciones que se dieron durante la formación y desarrollo de la Tierra. Sin embargo, en condiciones de agricultura intensiva, este fenómeno aumenta rápidamente y causa graves problemas en el desarrollo de los cultivos. Una de las causas de este problema es el uso de herramientas agrícolas en el suelo, así como el pisoteo de los animales, entre otros factores. (Reddy, 2016).

2.3 Erosión del suelo

La erosión del suelo se refiere al desgaste de la capa superficial de un suelo debido al agua y el viento. Es un proceso que puede ocurrir lento o aceleradamente, causando la pérdida de vegetación y del suelo superficial. Además, existen otros problemas como la compactación del suelo, la deficiencia de materia orgánica, la pérdida de estructura, drenajes insuficientes, la salinización pueden acelerar la erosión. Estas condiciones son consecuencia tanto de factores naturales como de la actividad humana, como la labranza, el pastoreo y la tala de árboles, además de los incendios forestales que dañan la vegetación superficial tienen el mismo efecto de acelerar la erosión. Por lo tanto, es importante tomar medidas para prevenir y controlar la erosión del suelo,

ya que puede tener graves consecuencias para la agricultura y el medio ambiente (Borrelli et al., 2021).

La erosión del suelo es un proceso natural en el que las rocas y el suelo se desprenden de la superficie terrestre y se trasladan a otro lugar, debido principalmente a los efectos del agua y el viento. Este fenómeno es responsable de las transformaciones del paisaje, que pueden producirse gradualmente a lo largo de miles de años o acelerarse por actividades humanas como la minería o la agricultura. (Mukherjee, 2022).

2.4 Sistemas silvopastoriles:

Los sistemas silvopastoriles se definen como la relación de árboles, pasturas y animales, en este caso ganado bovino, cuyas interacciones biológicas y ambientales brindan beneficios relacionados con el desarrollo en el suelo y la optimización la producción animal. La implementación de estos sistemas aporta a la conservación de la biodiversidad a través del uso racional de los recursos naturales, fomentando técnicas sostenibles, rentables y económicas (Arciniegas & Flórez, 2018). Plantas como la *Leucaena* se utilizan de manera frecuente en estos sistemas debido a su elevada densidad de plantación, de aproximadamente 5.000 arbustos por hectárea. Se trata de un sistema complejo en el que el suelo, la topografía, las especies arbóreas y las especies forrajeras interactúan para influir en la producción primaria neta y los servicios ecosistémicos. (Zeppetello et al., 2022).

Los sistemas silvopastoriles crean un microclima ideal para el confort de los animales y sus procesos productivos y fisiológicos. La presencia de plantas forrajeras y arbustos proporciona sombra y protección a los animales, al tiempo que controla las corrientes de aire. Estos sistemas mejoran la calidad de la alimentación animal, garantizando un suministro de alimentos durante

todo el año. Además, las leguminosas de estos sistemas fijan el nitrógeno, reduciendo la necesidad de fertilizantes nitrogenados y abaratando los costos de producción. (Polania et al., 2021)

2.5 Forrajes:

2.5.1 *Leucaena leucocephala*

2.5.1.1 Descripción: Arbusto o árbol de 2 a 6 m de altura con ramas pubescentes cuando jóvenes y que se tornan glabras con la edad. Las estípulas, triangulares, son diminutas y caducas. Las hojas son bipinnadas, paripinnadas y opositipinnadas; con glándulas traslucidas y luego negruzcas en la base de los raquis secundarios y los folíolos no tienen la vena principal en posición media, pero desplazada hacia arriba; dichos folíolos están implantados en la cara superior de dicho raquis secundario, lo que facilita su cierre los unos contra los otros en ausencia de luz.

Flores agrupadas, capítulos axiales, generalmente solitarios o por pares y con brácteas pubescentes caducas; tienen pedúnculos de longitud variable y terminados por un receptáculo globular prácticamente esférico; dichos capítulos miden unos 2-3 cm de diámetro, con las flores de color blanco algo amarillento y que se tornan al rosa asalmonado cuando empiezan a marchitarse; estas últimas tienen cáliz pentámero de unos 3 mm y los pétalos de más o menos 5 mm y exteriormente pubescentes. Hay 10 estambres, algo pubescentes, de unos 7 mm de largo, y el pistilo prácticamente igual de largo. El fruto es una legumbre recta, aplanada, coriácea, de color marrón y base cónica. Tiene un tallo pubescente de unos 3 cm con un pico, y mide 10-20 cm de largo por 1,5-4 cm de ancho. Se abre por las dos costuras longitudinales. Las semillas, en número de 6-25, están dispuestas horizontalmente y son de color marrón oscuro, brillantes, estrechamente ovoides y aplanadas. Tienen una fina y clara "línea de fisura" ovalada en la cubierta exterior, que es típica en la subfamilia *Mimosoideae*. Las semillas tienen un funículo largo y algo retorcido y miden 6-9 por 3-4,5 cm.

2.5.1.2 Distribución Natural: Es originario de México dónde se encuentra sobre todo en los estados del sur, (Guerrero, Morelos, Colima, Oaxaca y Chiapas), pero ha sido introducido desde Centroamérica al resto del mundo.

Se encuentra en diferentes ecosistemas, desde las tierras bajas costeras hasta bosques tropicales caducifolios y perennifolios. En ambientes secos o húmedos; y en diferentes tipos de suelos, excepto los ácidos y demasiado compactos.

2.5.1.3 Taxonomía:

Dominio *Eukaryota*

Reino *Plantae*

Filo *Magnoliophyta*

Clase *Magnoliopsida (= Dicotyledoneae)*

Orden *Fabales*

Familia *Mimosaceae*

Género *Leucaena*

Especie *leucocephala*

2.5.2 *Panicum maximum CV Mombasa*

2.5.2.1 Origen: Planta nativa del África Tropical y Subtropical, ampliamente cultivada en América del Sur, al Oeste de la India, al Sur y Este de Asia.

2.5.2.2 Descripción: El pasto guinea Mombasa es una gramínea tropical perenne, de características muy similares a la especie Tanzania, tanto en calidad nutricional, como en producción de forraje.

Entre sus principales ventajas están, la tolerancia a la sequía, al encharcamiento temporal; alta calidad nutricional; excelente palatabilidad y digestibilidad.

2.5.2.3 Morfología: El pasto guinea mombasa, posee con raíces profundas, que se ensanchan en la parte de arriba de la planta formando un corto rizoma. Las hojas de este pasto son largas y anchas, distribuidas en los tallos, presentando una alta relación de hoja/tallo y al igual que una elevada tasa de rebrote. La altura de la planta depende mucho de la variedad, yendo desde 0,80 metros hasta más de 2,00 metros.

El período de floración y producción de semilla se prolonga por un largo tiempo, dando origen a una maduración irregular en la panícula. Estas pequeñas semillas están recubiertas de glumas (cubierta floral), las cuales son lisas y vellosas; existen cerca de dos millones por kilogramo. (Hernández et al., 2018).

2.5.3 Pasto Guinea

Este pasto es originario de África, es una gramínea perenne que posee hojas alargadas, su crecimiento es en macollas y puede llegar a una altura de hasta tres metros; este pasto se caracteriza por presentar una elevada tasa de rebrote, y su alta relación hoja-tallo hace que pueda complementar de gran manera con leguminosas en periodos de descanso de 40 días. Es aconsejable que su primer pastoreo se realice posterior a los 30 días de establecido o en la etapa de prefloración en donde, en correctos manejos se puede tener hasta tres UG/ha (unidades gran ganado por hectárea) (Bravo et al., 2013)

Taxonomía:

Reino: *Plantae*

Orden: *Cyperales*

Familia: *Poaceae*

Tribu: *Paniceae*

Género: *Panicum*

Especie: *P. maximum*

2.6 Captura de carbono

La captura de carbono es un proceso esencial en el desarrollo de las plantas donde estas absorben dióxido de carbono atmosférico durante su proceso de crecimiento; por medio de las estomas (poros que se encuentran en las hojas) para intercambiar gases en la atmosfera, y regulan la temperatura y el agua que han absorbido anteriormente. Posteriormente en la fotosíntesis la planta capta CO² atmosférico para luego ser transformado y almacenado en sus estructuras (raíces, hojas, ramas) y de esta manera aumentar su biomasa, mientras que otra parte es fijada en el suelo por descomposición de la materia orgánica (Duval & Cámara, 2021; Buitrago et al., 2018).

2.7 Gases de efecto invernadero (GEI)

Se conoce como efecto invernadero a la interacción de la energía solar con los gases de como el dióxido de carbono, el metano, el óxido y gases fluorados en la atmósfera terrestre de la tierra. La capacidad que tienen estos gases para capturar el calor es lo que se conoce como efecto invernadero; estos gases están formados por una estructura química que les permite atrapar el calor atmosférico y lo transfieren al planeta. Los gases de efecto invernadero están formados por tres o más átomos que atrapan el calor y lo transfieren a la superficie terrestre, lo que paulatinamente conduce a un aumento en la temperatura global, procesos similares a lo ocurrido en los invernaderos razón por la cual se les deriva su nombre (Kweku et al., 2018)

2.8 Condiciones ecosistémicas asociadas a la actividad microbológica del suelo.

Se define como los procesos microbiológicos que se reflejan en la actividad microbiana del suelo, y son indicativo del potencial y la calidad de este, ya que las plantas dependen de los microorganismos del suelo para mineralizar los nutrientes orgánicos esenciales para sus procesos fisiológicos como el crecimiento y desarrollo. De igual manera, estos microorganismos del suelo

convierten en materia orgánica toda la hojarasca y los residuos vegetales, estableciendo una reserva directa de carbono y nitrógeno a partir de la descomposición de organismos vivos y muertos, acción que se considera como un factor determinante para la eficiencia del uso de nutrientes en los sistemas naturales. (Chen et al., 2003)

2.9 Ganadería sostenible en Colombia

Las políticas sectoriales en Colombia se han esforzado por construir el desarrollo del país en torno a la sostenibilidad, especialmente en lo concerniente al sector agropecuario. Al ser el segundo país más biodiverso del mundo y tener unas de las riquezas hídricas más invaluables, todos los escenarios internacionales están interesados en la consecución de planes que favorezcan la conservación y la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible (Bravo Parra, A.M. (2021). Se han reconocido las actividades ganaderas como uno de los principales oficios pecuarios que se realizan en todo el territorio, así como una de las principales fuentes de ingreso en la economía rural, sin embargo, los modelos tradicionales en muchas ocasiones no compatibles con el entorno la han convertido en muchas ocasiones en modelos poco productivos y competitivos, responsable de diversos conflictos ambientales asociados a la contaminación de acuíferos, degradación de suelo, emisiones de gases efecto invernadero y causantes de procesos de contaminación (Ruden Et al., 2020). En este contexto, el país ha venido sentando bases para hacer de este sector productivo, uno de los principales que enmarque los ODS, impulsando el establecimiento de modelos productivos como sistemas agroforestales, sistemas agrosilvopastoriles, sistemas silvopastoriles, ganaderías ecológicas, rehabilitación de zonas degradadas, entre muchos otros que puede incrementar la productividad y rentabilidad de los sistemas ganaderos, a la vez que se incrementa los servicios ecosistémicos. (Palacios et al., 2019).

3. Metodología

3.1 Localización:

El proyecto se realizó en el municipio de Capitanejo Santander, vereda Quebrada de Vera, finca El Porvenir, predio que se encuentra a 1090 m.s.n.m, cuyas coordenadas SON $9^{\circ}34'22,55''$ N; $72^{\circ}43'29,63''$ O.

Ilustración 1.

Ubicación del sistema silvopastoril dentro de la finca El porvenir, municipio de capitanejo Santander. Fuente: Google maps.



3.2 Diseño Experimental:

Para el proyecto se implementó un diseño completamente al azar con tres tratamientos y 4 réplicas por tratamiento.

Los tratamientos experimentales fueron:

- Sistema Silvopastoril con Mombasa, Guinea y Leucaena.
- Sistema de pastoreo tradicional.
- Suelo sin cobertura vegetal.

3.3 Proceso de siembra

El proyecto se inició en un lote con unas dimensiones de 1600 m², con un suelo desprotegido de vegetación.

Para llevar a cabo la instauración del sistema silvopastoril en el lote de trabajo se comenzó con la siembra de las semillas de *Leucaena* con una distancia entre surcos de 2 metros y con una distancia entre plantas de 1 metro, diariamente se regaron las semillas para mantener la humedad adecuada y que fuera exitosa la germinación.

Transcurridos 6 días de la siembra se presentó un porcentaje de germinación de 86%, a los 10 días se obtuvo un porcentaje de germinación de 92%, seguidamente se realizó una resiembra para obtener la cantidad total de 800 plántulas; las plántulas se regaron día de por medio. A los 90 días de edad y con una altura en promedio de 2 metros, se realizó el primer corte de las plantas de leucaena homogeneizando la altura a 1,60 metros y posteriormente se llevó a cabo la siembra de los pastos *Panicum maximum* y *Panicum maximum CV* (Guinea y Mombasa). Semanalmente se llevó un control de arvenses.

Para la siembra de pastos en el lote de trabajo se empleó 1 Kilogramo de Guinea y 1 Kilogramo de Mombasa; la técnica de siembra que se empleó fue al boleó. La frecuencia de riego continuó día de por medio.

Las leucaenas después de ser podadas, rebrotaron vigorosamente al punto que se tornaron frondosas hacia los costados.

3.4 Pastoreo

El pastoreo se llevó a cabo cuando las leucaenas estaban con abundante biomasa y el pasto cumplía 60 días de haber sido sembrado teniendo ya una altura en promedio de 1.80 metros.

La técnica fue de pastoreo rotacional de manera en que solo se descoparon los pastos y la leucaena durante 5 días, para lo cual se contó con una vaca y su ternera. El sistema se estandarizó en cuanto al tiempo de recuperación de las plantas, siendo óptimo a los 35 días del primer pastoreo para realizar un segundo pastoreo.

3.5 Medición de variables:

El sistema se evaluó cuantitativamente de acuerdo con la medición de variables para determinar su eficiencia, además de los parámetros ambientales para el desarrollo de los forrajes:

3.5.1 Temperatura y humedad:

Para llevar a cabo las mediciones de temperatura y humedad se establecieron horas específicas en horarios de 9:30 am, 12:30pm, 3:30 pm. Empleando un termohigrómetro se obtuvieron las lecturas de temperatura y humedad fuera del lote de trabajo, en un punto específico y dentro del lote de trabajo en 6 puntos al azar.

Las unidades de medición de temperatura son en grados Centígrados (°C) y las mediciones de humedad en porcentaje (%).

3.5.2 Producción de biomasa:

Para cuantificar la producción de biomasa de las gramíneas, se recolectaron muestras de un metro cuadrado, las cuales fueron pesadas, deshidratadas y llevadas al laboratorio para determinar contenidos de materia seca. Con los datos recolectados se estimó la producción de biomasa en base fresca y base seca y se calculó la capacidad de carga. Para cuantificar la

producción de biomasa en la *leucaena* se cortaron y pesaron 4 plantas a un metro de altura, las cuales se trasladaron al laboratorio para determinar la producción de biomasa.

De igual manera se realizó el cálculo para determinar las unidades gran ganado (UGG) para ello, se suma el promedio de la biomasa por hectárea/ año en materia seca de los forrajes establecidos en el sistema silvopastoril y se dividió en la constante 4380 (12% del consumo de una unidad gran ganado por día)

3.5.3 Medición de gases de efecto invernadero:

La medición de gases efecto invernadero se llevó a cabo en la fase inicial del proyecto con el suelo desnudo y en la fase final del proyecto con vegetación, para obtener dichos resultados se instalaron cámaras de vidrio con jeringas de succión, las muestras se tomaron en diferentes puntos al azar dentro del lote de trabajo y con tiempos determinados (0, 20 y 40 minutos), posteriormente se trasladaron al laboratorio de reconversión ganadera de la Universidad Industrial de Santander para ser analizadas y cuantificadas en un cromatógrafo de gases.

3.6 Fase de laboratorio:

3.6.1 Análisis químico del suelo:

Para llevar a cabo los análisis de suelo se tomaron muestras al azar al inicio del proyecto con el suelo desnudo y en la fase posterior al pastoreo se recolectaron nuevamente muestras al azar, para evidenciar el efecto de la implementación del sistema sobre las características del suelo. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de reconversión ganadera de la Universidad Industrial de Santander donde fueron analizadas y cuantificadas mediante los siguientes protocolos: pH (pH con H₂O), conductividad eléctrica (C.E) (medición con pH-metro), materia orgánica (M.O) (calcinación y cuantificación gravimétrica), fósforo disponible (P) (Bray II-modificado, espectrofotometría ultravioleta-visible UV-Vis), calcio intercambiable, magnesio intercambiable,

potasio intercambiable, sodio intercambiable (Ca, Mg, K, Na) (bases intercambiables, espectrometría de absorción atómica), capacidad de intercambio catiónico (CICE) (suma de cationes), hierro intercambiable, manganeso intercambiable, zinc intercambiable, cobre intercambiable (Fe, Mn, Zn, Cu) (extracción con DTPA, espectrometría de absorción atómica), porcentaje de saturación de bases (cálculo).

3.6.2 Calidad nutricional de forrajes:

para evaluar la calidad nutricional de los forrajes se realizaron análisis bromatológicos con base en los protocolos establecidos por el laboratorio de reconversión ganadera de la Universidad Industrial de Santander:

Cenizas: diferencia gravimétrica empleando Mufla a 550 °C durante 6 horas

Proteína (%): se cuantificó el porcentaje de nitrógeno empleando un analizador elemental CHNSO, el cual fue multiplicado por la constante 6.25, para obtener el porcentaje de proteína de la muestra

Energía (Kcal/Kg): se determinó empleando un calorímetro Parr 6200.

3.6.2 Captura de Carbono:

Para determinar la captura de carbono se determinó la concentración de carbono en cada uno de los forrajes empleando un analizador elemental CHNSO.

La captura de carbono se cuantificó multiplicando la producción de biomasa en base seca por la concentración de carbono.

3.7 Análisis estadístico.

Las variables experimentales fueron procesadas en un análisis de varianza ANOVA, donde, al existir diferencias significativas ($p < 0.05$), se utilizó el examen de rangos múltiples de Duncan. Los datos se procesaron en el programa estadístico SAS.

4. Resultados

4.1 Temperatura y Humedad relativa (HR)

Las mediciones realizadas de la temperatura y la humedad fueron registradas y procesadas estadísticamente como se ve en la tabla 1.

En cuanto a la variabilidad de la temperatura en las horas de la mañana (hora de medición 9:30 am) se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) de aproximadamente 4 grados de diferencia en donde en el sistema silvopastoril se evidencia una temperatura más baja que la reportada en el terreno que está afuera del sistema.

De igual manera, la temperatura registrada en las horas de la tarde (hora de medición, 3:30 pm) se evidenció una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) de casi 3 grados centígrados de diferencia en cuanto al sistema silvopastoril (valor más bajo) en comparación con el suelo desnudo (valor más alto).

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la HR registrada en el sistema silvopastoril y el terreno no tratado; donde este último reportó valores de humedad menores en casi 3% en comparación con el sistema silvopastoril.

De la misma manera, en las horas de la tarde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el sistema silvopastoril y en el terreno no intervenido; este último arrojó el dato más bajo con casi 3% por debajo del sistema silvopastoril.

4.1.1. Temperatura y humedad de sistema silvopastoril

Tabla 1.

Temperatura (°C) afuera y adentro del SST en las horas de la mañana y la tarde

Tratamiento	Hora de toma de Muestra	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
Sistema silvopastoril	9:00 am	28.60 ^a	51.743 ^a
Afuera del sistema	9:00 am	32.59	48.700 ^a
Sistema silvopastoril	3:30 pm	29.67 ^a	46,173 ^a
Afuera del sistema	3:30 pm	31.98 ^b	42.967 ^a

Nota: Medias en columnas seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes (P<0.05), prueba de rangos múltiples de Duncan.

4.2 Biomasa

4.2.1 Biomasa por m² y hectárea/año en Materia Fresca y Materia seca.

En los resultados de la producción de biomasa fresca se evidenciaron diferencias significativas (P<0.05), donde los valores oscilaron entre 42623 a 66774 kg/ha/año; donde el valor más alto se presentó en el pasto Mombasa y el menor valor se obtuvo de la *Leucaena*.

Para la variable de biomasa por hectárea, extrapolada datos de hectárea al año en materia seca, se obtuvieron diferencias estadísticas (P<0.05) entre todos los datos obtenidos de los forrajes establecidos en el sistema silvopastoril; siendo nuevamente el pasto Mombasa el de mayor valor (11692.29) y la *Leucaena l.* el forraje con el menor valor.

En la biomasa seca por metro cuadrado, se obtuvieron diferencias significativas entre los pastos y forrajes establecidos en el sistema.

De la misma forma, también se puede observar que la capacidad de carga expresada en unidades gran ganado (UGG), es significativamente mayor en las pasturas establecidas en el sistema silvopastoril en comparación con el pasto empleado en el sistema tradicional, llegando a

ser casi cinco veces mayor que el de este último, lo que en términos productivos significa que se pueden pastorear casi cinco animales más en el sistema silvopastoril en comparación con la pradera del sistema tradicional.

Tabla 2.

Biomasa por metro cuadrado y hectárea/año en materia fresca y materia seca

Tratamiento	Forraje	Biomasa m ² MF	Biomasa ha/año MF	Biomasa m ² MS	Biomasa ha/año MS	Capacidad de carga (UGG)
	<i>Mombasa</i>	11692.29 ^a	66774.72 ^a	17,51009 ^a	192,2021 ^a	
<i>Sistema silvopastoril</i>	<i>GuineaSS</i>	10310.18 ^b	62556,94 ^b	16,48127 ^b	169,4824 ^b	6,57
	<i>Leucaena</i>	6809.97 ^d	42623.89 ^d	12,80608 ^d	111,9448 ^d	
<i>Sistema tradicional</i>	<i>GuineaST.</i>	7221.67 ^c	56392,50 ^c	15,97691 ^c	118,7124 ^c	1,64

Nota: Medias en columnas seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes (P<0.05), prueba de rangos múltiples de Duncan.

4.3 Captura de carbono en el sistema

Para la variable de captura de carbono, se encontraron diferencias significativas entre la cantidad de captura de carbono de la *Leucaena* con respecto a los demás pastos, sin embargo, entre el pasto *Mombasa* y el pasto *Guinea ST* no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Para esta variable, se encontró el valor más alto en la *Leucaena* con un porcentaje de 50,204% (ver tabla 3).

Tabla 3.

Captura de carbono del Sistema

Forraje	Captura de carbono (%)
---------	------------------------

Leucaena	50,204 ^a
Guinea SS	46,224 ^b
Mombasa	43,669 ^{bc}
Guinea ST	41,099 ^{b c}

4.4 Contenido de nutrientes en los pastos.

Los parámetros de calidad nutricional de los pastos y forrajes establecidos en el sistema arrojaron datos estadísticamente diferentes ($P < 0.05$), para el caso de la proteína bruta, el valor más bajo se obtuvo en el pasto Guinea (8,26 y 10,26) y el valor más alto en la *Leucaena leucocephala* (18,35).

Se aprecian las diferencias significativas entre los valores obtenidos para la variable de contenido de energía de los distintos forrajes, siendo nuevamente la Leucaena, la planta con mayor contenido de energía, seguida por el pasto Guinea y por último el pasto Mombasa.

De igual manera, para el contenido de cenizas, el cual nos indicó el contenido de minerales en los forrajes, se obtuvieron diferencias significativas entre los distintos forrajes, siendo nuevamente *Leucaena leucocephala* la planta con mayor contenido de cenizas y el pasto Guinea el de menor contenido. Todos estos resultados mencionados pueden ser observados en la tabla 4.

Tabla 4.

Contenido de proteína, energía y cenizas en los forrajes

Forraje	Energía (Kcal/kg)	proteína (%)	Cenizas (%)
Leucaena	4408,92 ^a	18,35 ^a	11.52000 ^a
Mombasa	3899,48 ^b	12,40 ^b	10.06333 ^b

Guinea SS	3897,80 ^c	10,26 ^c	11.52000 ^c
Guinea ST	3887,47 ^d	8,26 ^d	6.19333 ^d

Nota: Medias en columnas seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes (P<0.05), prueba de rangos múltiples de Duncan.

4.4 Análisis de suelo

Se obtuvieron diferencias leves en cuanto a los análisis de suelo tomados antes y después de la implementación del sistema silvopastoril; entre ellas se destaca el aumento del pH (de 7,92 a 7,96) y la disminución de los valores de algunos minerales (calcio, magnesio, potasio, fósforo y zinc), como puede analizarse en la tabla 5. Esto puede ser una respuesta a la implementación del sistema silvopastoril que logró activar los mecanismos de captación de nutrientes en las plantas.

Tabla 5.

Análisis comparativo de suelo antes y después del establecimiento del sistema silvopastoril

Determinación analítica	Unidad	Análisis			
		Inicial	Interpretación	Análisis Final	Interpretación
pH	unidad pH	7,92	alcalino	7,96	alcalino
Conductividad eléctrica	dS/m	ND	no salino	ND	no salino
Materia orgánica	%	7	alto	5,63	alto
Fósforo disponible	mg/Kg	16,82	bajo	14,21	bajo
Calcio intercambiable	meq/100 g	15,59	alto	12,446	alto
Magnesio intercambiable	meq/100 g	7,599	alto	7,574	alto
Potasio intercambiable	meq/100 g	1,465	alto	1,209	alto
Sodio intercambiable	meq/100 g	<0,10	normal	<0,10	normal
CIC	meq/100 g	24,73	alta	21,3	alto
Hierro intercambiable	mg/Kg	34,33	medio	33,02	medio
Manganeso intercambiable	mg/Kg	1,61	bajo	1,58	bajo
Zinc intercambiable	mg/Kg	1,63	medio	1,57	medio
Cobre intercambiable	mg/Kg	0,99	bajo	0,97	bajo
Saturación calcio	%	63	alto	59	alto
Saturación magnesio	%	31	alto	35	alto
Saturación potasio	%	6	alto	6	alto
Saturación de sodio	%	0	óptimo	0	óptimo

4.5 Producción gases efecto invernadero

En el diagrama 1 presentado a continuación, se observa que los gases de efecto invernadero aumentaron considerablemente en el sistema silvopastoril a comparación del suelo desnudo, tanto los primeros 20 minutos como en el lapso de tiempo del minuto 20 al minuto 40; esto puede ser causado por la activación de los microorganismos del suelo en consecuencia de la alta actividad de estos en los procesos de descomposición y aprovechamiento de la materia orgánica presente en el sistema.

De igual manera, en el gráfico 2, se observa un aumento significativo el almacenamiento de dióxido de carbono del sistema silvopastoril con relación al suelo desnudo, en donde esta primera casi cuatriplica el valor arrojado por el suelo desnudo en los primeros 20 minutos; mientras que el periodo de tiempo de entre 20 a 40 minutos, este valor es de más del doble que el encontrado en el suelo desnudo.

Ilustración 2.

Diagrama de la producción de gases de efecto invernadero en el sistema silvopastoril vs el suelo desnudo.

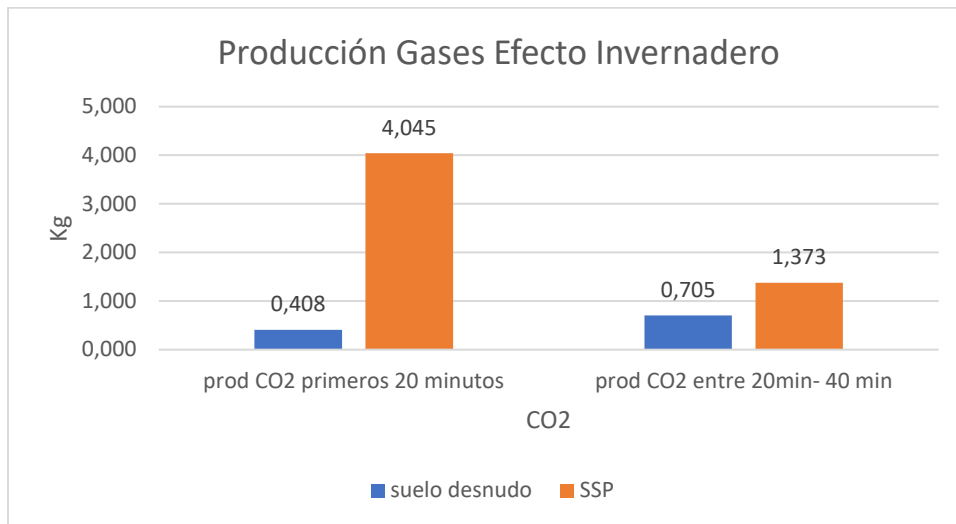
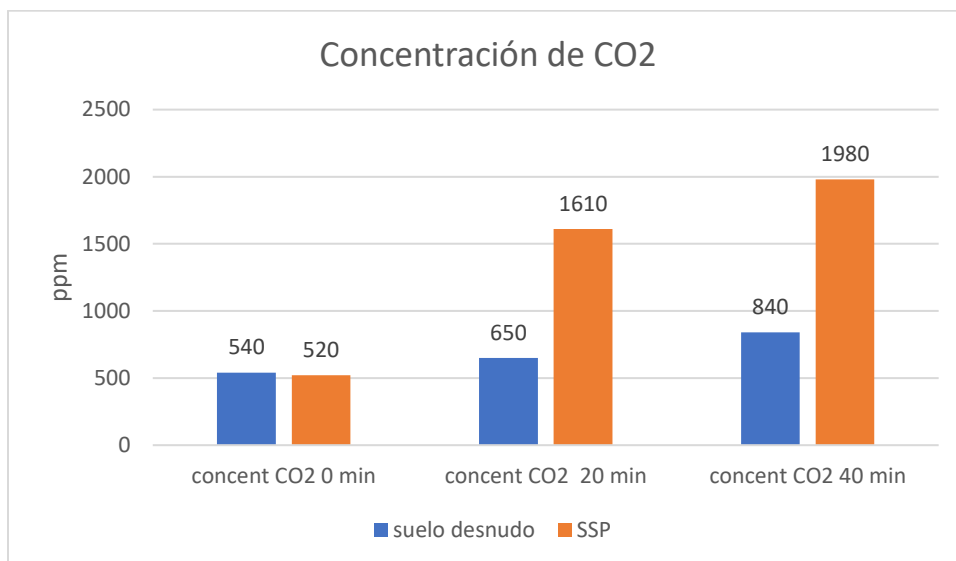


Ilustración 3.

Concentración de CO₂ en el sistema silvopastoril vs suelo desnudo



5. Discusión

Debido a su naturaleza invasiva y su abundancia, la *leucaena*, comienza a ser una opción ecológica para usarse en biorrefinerías para la producción de combustibles, productos químicos y materiales funcionales. Entre algunos de sus usos en continuo estudio está la producción de etanol

a través de fermentación anaeróbica con levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Debido a su alto contenido de biomasa, estimado en 50 toneladas por hectárea por año, y su alto contenido de celulosa del 45% (Singh et al., 2017); Además, se puede obtener alrededor de 3000 kg de aceite de *Leucaena leucocephala* por hectárea, el cual contiene bajos niveles de ácido graso libre, lo que lo hace apto para la producción de biodiesel sin necesidad de un pretratamiento energéticamente costoso (Ilham & Nimme, 2019). En pocas palabras, la *Leucaena* ofrece un ciclo completo de beneficios bioenergéticos. La *Leucaena* es capaz de soportar un intenso ramoneo y su presencia aumenta la productividad vegetal y animal.

En el presente estudio se ha podido evidenciar la importancia de la implementación de los sistemas silvopastoriles en zonas degradadas como en el caso particular del municipio de Capitanejo, donde los resultados evidencian que el mejoramiento de la pradera propician una disminución de la temperatura de aproximadamente 3 grados, concluyendo que los cambios microclimáticos inducidos por los árboles inducen a la reactivación de los procesos orgánicos en el suelo y la relación con la radiación solar, generando un mayor confort en el pastoreo. Sumado a esto, la leucaena es capaz de soportar un intenso ramoneo y su presencia aumenta la productividad vegetal y por ende el rendimiento del pastoreo.

Este efecto de los sistemas silvopastoriles se ha evaluado en diferentes regiones y climas, con el fin de determinar el grado de confort que este les brinda a los animales; en un estudio realizado por Pezzopane et al. (2019) en el estado de São Paulo, Brasil, se evaluó un sistema silvopastoril con árboles nativos en dos épocas del año: seca y lluviosa con temperaturas oscilantes entre 19 y 23°C respectivamente, cuyos resultados arrojaron una disminución de la temperatura de aproximadamente 2 grados por debajo de la normalmente encontrada.

Además, la leucaena puede traer beneficios adicionales a los productores ya que se puede obtener alrededor de 3000 kg de aceite de *Leucaena leucocephala* por hectárea, el cual contiene bajos niveles de ácido graso libre, lo que lo hace apto para la producción de biodiesel sin necesidad de un pretratamiento energéticamente costoso (Ilham & Nimme, 2019).

Una de las funciones más importantes de los SSP es la de proveer sombra que no solamente proporciona bienestar en los animales, sino que también ayuda al crecimiento de los pastos y su captura de carbono alrededor de los árboles, como lo expresa De Oliveira et al. (2017) en su trabajo, donde evaluó la exposición al sombreado del pasto *Panicum maximum cv. Mombasa* en tres niveles (pleno sol, 25 y 50%).

En el caso particular del presente estudio, la combinación Leucaena – Mombasa ha mostrado unas condiciones apropiadas para el aumento en la producción de forrajes como lo demuestran los valores de 66.774 kg/ha/año en el pasto Mombasa y para el de Leucaena de 42.623 kg/ha/año; se pueden contrastar estos datos con similitud a los reportados por Gaviria et al. (2015) y Cuartas et al. (2015), cuya cantidad de biomasa estimada de *L. leucocephala*, fue de 4,3 t ha/año, asumiéndose que la mayor producción de biomasa en los sistemas silvopastoriles respecto a los sistemas convencionales puede deberse a la presencia de estratos aéreos que permiten una mayor captación de luz solar y sistemas radiculares más profundos que absorben nutrientes y humedad de forma más eficiente (Broom et al., 2013), de la misma manera esta leguminosa cuenta con una gran capacidad de realizar la fijación de nitrógeno atmosférico y proporcionarlo a los pastos acompañantes, razón por la cual la utilización de la Leucaena para la conformación de los sistemas silvopastoriles en México va en constante aumento.

Los SPS que utilizan *Leucaena* como principal arbusto forrajero están creciendo rápidamente en México como es el caso del proyecto de investigación realizado por Casanova-Lugo et al., (2014) donde se incluyó rendimiento y calidad del forraje de *L. leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* como forraje puro o mixto sembrado en la península de Yucatán, México; los resultados demostraron la mejora, en términos de forraje biomasa y calidad.

En cuanto a la biomasa obtenida del pasto Mombasa (66.774 kg/ha/año), cabe resaltar que uno de los aspectos que ha influenciado se relaciona con el tamaño de corte, que oscilo entre los 190 cm, comparando con el estudio elaborado por Júnior et al. (2017), donde se evaluó la cantidad de biomasa producida por el pasto *Mombasa* en un sistema silvopastoril empleando distintos niveles de fertilización nitrogenada, encontrando que la fertilización nitrogenada sólo fue eficiente para los pastos cortados a 105 cm dando una mayor producción de biomasa estimada que los cortados a 70 y 90 cm.

Ya que las condiciones agroecológicas como el tipo de suelo y el clima pueden variar mucho de una región a otra, se hace difícil obtener comparaciones tanto de la producción de biomasa como de la captura de carbono, sin embargo, estudios realizados en México por Hernández et al. (2020), donde se evaluó un SSP de *Leucaena* y *Megathyrsus maximus cv. Tanzania*, la biomasa forrajera total en estación lluviosa fue de 5.300 kg MS ha⁻¹, es decir un dato más bajo que los reportados en el presente estudio. De igual manera, en la hacienda Lucerna, norte del Valle del Cauca con una altura de 960 msnm, 24°C, 1100 mm anuales, 75% 80% de humedad relativa se obtuvieron datos de biomasa seca para leucaena a cortes de 28, 35 y 42 días, datos de 4.77 t/ha/año, 6.59 t/ha/año y 6.51 t/ha/año, resaltando que estos son menores a los obtenidos en este estudio (Maya et al. 2005).

Por otro lado, en un estudio realizado por López-Hernández et al. (2023), en Chiapas, en el sur de México, se evaluaron las reservas de carbono y las tasas de acumulación en sistemas silvopastoriles de *Leucaena leucocephala* y *Cynadon plectostachyus*, y pasto *Brachiaria decumbens* y comparados con tierras de pastoreo abierto convencionales, para plantaciones de entre 2 y 10 años cuyas tasas medias anuales de acumulación de biomasa oscilaron entre 0,25 y 2,57 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica que estos sistemas son sumideros de CO₂ a largo plazo, excluyendo otras fuentes de GEI como las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica, aumentando el secuestro de carbono orgánico del suelo y sugiere que la edad y la vida útil de los árboles juegan un papel significativo en el secuestro de C sobre el suelo variando a largo plazo sus propiedades. Esto contrasta con los análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, ya que, aunque se observa un aumento en la producción de GEI, se observa a la vez un incremento en la captura de carbono en el sistema implementado, siendo en orden de mayor a menor significancia la realizada por la *Leucaena*, seguida Guinea SS y finalmente Mombasa.

Es importante resaltar que uno de los principales beneficios que se han reportado de los SSP es el aumento de la eficiencia del ciclo del Nitrógeno, relacionado estrechamente con el incremento de la actividad biológica en el suelo, razón por la cual puede atribuirse a los resultados del presente estudio el aumento de la producción de gases.

Datos similares a los encontrados en este estudio los ha reportado Gaviria et al. (2015) y Cuartas et al. (2015), es su estudio cuya cantidad de biomasa estimada de *L. leucocephala*, fue de 4,3 t ha/año, asumiéndose que la mayor producción de biomasa en los sistemas silvopastoriles respecto a los sistemas convencionales puede deberse a la presencia de estratos aéreos que permiten una mayor captación de luz solar y sistemas radiculares más profundos que absorben nutrientes y humedad de forma más eficiente (Broom et al., 2013), de la misma manera esta

leguminosa cuenta con una gran capacidad de realizar la fijación de nitrógeno atmosférico y proporcionarlo a los pastos acompañantes, razón por la cual la utilización de la *Leucaena* para la conformación de los sistemas silvopastoriles en México va en constante aumento. Los SPS que utilizan *Leucaena* como principal arbusto forrajero están creciendo rápidamente en México como es el caso del proyecto de investigación realizado por Casanova-Lugo et al., (2014) donde se incluyó rendimiento y calidad del forraje de *L. leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* como forraje puro o mixto sembrado en la península de Yucatán, México. Los resultados demostraron la mejora, en términos de forraje biomasa y calidad, cuando ambas especies se especies. Sin embargo, el arbusto *Leucaena* tuvo mayor contenido de proteína (228 g kg MS), un dato ligeramente más alto que el encontrado en este estudio.

En un estudio elaborado por Júnior et al. (2017), se evaluó la cantidad de biomasa producida por el pasto *Mombasa* en un sistema silvopastoril empleando distintos niveles de fertilización nitrogenada; encontrando que la fertilización nitrogenada sólo fue eficiente para los pastos cortados a 105 cm dando una producción de biomasa estimada más baja que la producción de biomasa encontrada en nuestro estudio ($125 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), mientras que los pastos cortados a menos de 70 y 90 cm demostraron bajos resultados para la fertilización nitrogenada, mostrando plantas con bajas eficiencias fisiológicas.

Las condiciones agroecológicas como el tipo de suelo y el clima pueden variar mucho de una región a otra y por lo tanto hace difícil obtener comparaciones exactas, ya que las estrategias de uso de suelo y tipo de forrajes establecidos deben responder ellas. En un estudio realizado por Hernández et al. (2020) en donde se evaluó un SSP de *Leucaena* y *Megathyrsus maximus cv. Tanzania*, la biomasa forrajera total estación lluviosa fue de $5.300 \text{ kg MS ha}^{-1}$, es decir un dato más bajo que los reportados en el presente estudio. De igual manera, en la hacienda Lucerna, norte

del Valle del Cauca con una altura de 960 msnm, 24°C, 1100 mm anuales, 75% 80% de humedad relativa se obtuvieron datos de biomasa seca para leucaena a cortes de 28, 35 y 42 días, datos de 4.77, 6.59 y 6.51 t/ha/año, resaltando que estos son menores a los obtenidos en este estudio (Maya et al. 2005).

Una de las funciones más importantes de los SSP es la de proveer sombra que no solamente proporciona bienestar en los animales, sino que también ayuda al crecimiento de los pastos y su captura de carbono alrededor de los árboles, como lo expresa De Oliveira et al. (2017) en su trabajo, donde evaluó la exposición al sombreado del pasto *Panicum maximum cv. Mombasa* en tres niveles (pleno sol, 25 y 50%), encontrando que, a pleno sol, la gramínea Mombasa mostró el mayor aumento en la producción de gas, simultáneamente a una mayor proporción de metafloema y menor engrosamiento epidérmico secundario.

Por otro lado, en un estudio realizado por López-Hernández et al. (2023), donde evaluaron las reservas de carbono y las tasas de acumulación en sistemas silvopastoriles de *Leucaena leucocephala* y *Cynadon plectostachyus*, y pasto *Brachiaria decumbens* y compararlos con tierras de pastoreo abierto convencionales. El estudio se llevó a cabo en Chiapas, en el sur de México, Se midieron las reservas de carbono en 18 parcelas de silvopastoreo, con una edad de plantación de entre 2 y 10 años. Realizando comparaciones, se muestrearon 9 parcelas cercanas a parcelas a pleno sol (praderas abiertas) pastoreadas de forma rotativa. La media de biomasa arbórea en SP fue de $5,5 \pm 1,9$ Mg C ha⁻¹ siendo indiferente a la edad de los sistemas silvopastoriles. Las tasas medias anuales de acumulación de biomasa oscilaron entre 0,25 y 2,57 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica que los sistemas de PE son sumideros de CO₂, excluyendo otras fuentes de GEI como las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica. La tasa media de secuestro de carbono orgánico del suelo (SOC) de los SP fue de $0,143 \pm 0,043$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹ a 50 cm de

profundidad. Las tasas de secuestro de SOC se correlacionaron positivamente con la edad de la PE al principio y disminuyeron después de unos 8 años. Los resultados sugieren que la edad y la vida útil de los árboles juegan un papel significativo en el secuestro de C sobre el suelo a través de la PE de *Leucaena leucocephala*, mientras que el almacenamiento de SOC varía con las propiedades del suelo. Futuras investigaciones sobre la respuesta relativa de las fracciones activas y estables de SOC junto con los flujos de CO₂ del suelo podrían explicar los resultados sobre el potencial de almacenamiento de SOC de estos sistemas agroforestales

Una de las funciones más importantes de los SSP es la de proveer sombra que no solamente proporciona bienestar en los animales, sino que también ayuda al crecimiento de los pastos y su captura de carbono alrededor de los árboles, como lo expresa De Oliveira et al. (2017) en su trabajo, donde evaluó la exposición al sombreado del pasto *Panicum maximum cv. Mombasa* en tres niveles (pleno sol, 25 y 50%), encontrando que, a pleno sol, la gramínea Mombasa mostró el mayor aumento en la producción de gas, simultáneamente a una mayor proporción de metafloema y menor engrosamiento epidérmico secundario.

En un estudio realizado por López y García (2015) donde se evaluó la disponibilidad de nitrógeno edáfico en un sistemas silvopastoril compuesto por *Leucaena leucocephala*, en una finca ubicada en Balboa, Colombia, los resultados indican un aporte de 249,31 kg/ha de N en este suelo, teniendo en cuenta la diferencia entre los contenidos inicial y contenidos finales; indicando los beneficios de la *Leucaena* en sistemas silvopastoriles. Estos valores son consistentes con los encontrados por Bruning y Rozema (2013) quienes estiman que el uso de leguminosas como abono verde, contribuyendo a un incremento de 30 a 80 kg N /ha por año. Aunque el N tiene diferentes formas en el suelo, éste sólo es absorbido por las plantas y los microorganismos como nitrato (NO₃) o amonio (NH₄⁺). En medias de N total y N amoniacal mostraron una gran variación en

este estudio. Dado que este elemento tiene grandes cantidades en el suelo, más que otros elementos esenciales para la planta (Navarro y Navarro, 2003). Mientras que la cantidad de amonio N en el suelo disminuyó a 9,37 g/ha, en el tejido vegetal aumentó, posiblemente debido al estado fenológica de la planta. En este estudio *Leucaena* contribuyó a un aumento de 250 kg N/ha por año, lo que indica las ventajas de este forraje cuando se incluye en sistemas silvopastoriles.

De igual manera, en un estudio realizado por Sarabia-Salgado et al. (2020), evaluaron la fijación la transferencia de N, rendimiento y composición del forraje (bajo dos intervalos de corte) en un sistema silvopastoril (SPS) con *Leucaena leucocephala* -*Megathyrsus maximus* y *M. maximus*-monocultivo con vacas lecheras El rendimiento de forraje fue de 7.284 y 10.843 kg MS ha-1, y la proteína bruta (PB) de forraje fue de 29,0% y 26,1% para *L. leucocephala*, cosechado a los 35 y 50 días, respectivamente. La PC para el *M. maximus* asociado fue de 9,9% y 7,8% para IC 35 y 50 días, respectivamente, y para MMM fue de 7,4% y 8,4%, cosechados a los 35 y 50 días. La producción de leche fue de 4,7 kg vaca-1 día-1 para las vacas pastando MMM y de 7,4 kg vaca-1 día-1 bajo SPS. La fijación de nitrógeno en *L. leucocephala* (%Ndfa) se estimó en 89% y 95%, a los 35 y 50 días, con una transferencia de N₂ a la hierba asociada de 34,3% y 52,9%. El SPS tiene el potencial de fijar y transferir importantes cantidades de N₂ a la hierba asociada, e incrementar el contenido de CP del forraje y la producción de leche.

Así mismo, Rodríguez et al. (2019) evaluó la producción del cultivo de pasto Mombasa bajo dos sistemas diferentes: monocultivo y silvopastoril, con alturas de 70, 80, 90 y 100 cm en época seca y lluviosa evaluando materia seca. En cuanto al SSP, la altura de corte de 70 cm presentó el mayor TDM y relación hoja/tallo para los dos periodos evaluados, manteniendo la altura del residuo en 40 cm.

De la misma manera, en un estudio realizado por Hernández et al. (2020) en el estado de Veracruz, México, en un sistema silvopastoril conformado por *Leucaena* y *Megathyrus maximus* cv. Tanzania, realizó un análisis de suelo después de conformado el sistema recogiendo muestras en zigzag para analizar las condiciones físicas y químicas de este. Los análisis realizados encontraron que los suelos del potrero eran francos arenosos con 64 % de arena, 17 % de arcilla y 19 % de limo. El pH era ligeramente ácido (6,6) un dato relativamente similar al encontrado en los suelos de este estudio; el contenido de materia orgánica era bajo (0,15). La composición química incluía 100 mg L⁻¹ de nitratos, 70 mg L⁻¹ de amonio, 108 mg L⁻¹ de potasio y 27 mg L⁻¹ de fósforo. La conductividad eléctrica del suelo en el lugar fue de 45 dS m⁻¹.

En Colombia, se han realizado estudios con el fin de cuantificar los gases de efecto invernadero emitidos por los diferentes sistemas productivos de las zonas ganaderas del país, es así como Naranjo Et al., (2012) evaluaron el efecto de los sistemas silvopastoriles con *Leucaena*, denotando valores de 3259 kg CO₂ eq/ha/año, lo cual es una cifra más baja que la encontrada en este estudio; No obstante cabe resaltar que dichos autores aseguran que la cantidad de CO₂ que puede fijar anualmente un sistema ganadero se ve influenciado estrechamente por diferentes aspectos, como el manejo, la historia del uso suelo, la textura, el clima, la producción, entre otros, lo que hace difícil tener comparaciones veraces de un sistema u otro, de igual manera, los procesos fisiológicos de los animales también contribuyen a la emisión de GEI (Amézquita Et Al., 2010).

6. Conclusiones

Se demostró que los sistemas silvopastoriles contribuyen positivamente en la salud e integridad del suelo, puesto que se observó un aumento en el aprovechamiento de la materia orgánica, mejorando la eficiencia y productividad de la actividad microbiológica.

Se comprobó que los sistemas silvopastoriles generan un microclima que reduce notablemente la temperatura y a su vez aumentan la humedad de su entorno, ya que la cobertura vegetal de estos, impide la exposición directa de los rayos solares sobre el suelo, las plantas y los animales.

En el presente estudio se analizó que la implementación de los sistemas silvopastoriles incrementa la producción y calidad de los forrajes por hectárea, aumentando la capacidad de carga, optimizando el rendimiento de las praderas, lo que a su vez se vio reflejado en la cantidad de nutrientes que aportan.

7. Recomendaciones

Se recomienda desarrollar modelos productivos en sistemas silvopastoriles en bosques secos tropicales con diferentes clases de fertilización: fertilizantes sintéticos y biofertilizantes; para evaluar la eficiencia de la activación microbiológica edáfica y la productividad y calidad de los forrajes.

Se recomienda implementar sistemas silvopastoriles con diferentes tipos de forraje en bosques secos tropicales para manejar ganaderías sostenibles, logrando proyectarse como ganaderías regenerativas, evaluando los rendimientos tanto en la producción de leche como ganancias de peso para carne.

Referencias Bibliografía

- A. Stifkens, E. M. Matthews, C. S. McSweeney, & E. Charmley. (n.d.). Increasing the proportion of *Leucaena leucocephala* in hay-fed beef steers reduces methane yield.
- Alzate, J., & Peñaranda, S. (2017). Incidencia del monocultivo de la caña de azúcar, en los aspectos económicos y socio ambientales del Valle del Cauca, en el período 2007 - 2017. *Incidencia Del Monocultivo de La Caña de Azúcar, En Los Aspectos Económicos y Socio Ambientales Del Valle Del Cauca, En El Período 2007 - 2017.*
- Alcázar Caicedo, C., Avella Muñoz, E. A., Norden Medina, N., García Villalobos, D. H., García Martínez, H., Castellanos Castro, C., & González Martínez, R. Programa nacional para la conservación y restauración del bosque seco tropical en Colombia. Plan de Acción 2020-2030.
- Almeida, Frazão, LA, Lessa, TAM, Fernandes, LA, Veloso, Álvaro L. de C., Lana, AMQ, de Souza, IA, Pegoraro, RF y Ferreira, EA (2021). Reservas de carbono y nitrógeno en el suelo y la calidad de la materia orgánica del suelo bajo sistemas silvopastoriles en el Cerrado brasileño. *Investigación de suelo y labranza*, 205, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>
- Amatya, Chang, SX, Beare, MH y Mead, DJ (2002). Propiedades del suelo bajo un sistema silvopastoril de *Pinus radiata* - raigrás en Nueva Zelanda. Parte II. C y N de la biomasa microbiana del suelo y dinámica del N del suelo. *Sistemas agroforestales*, 54 (2), 149–160. <https://doi.org/10.1023/A:1015076607090>
- Amézquita M C, Murgueitio E, Ibrahim M and Ramírez B 2010 Carbon sequestration in pasture and silvopastoral systems compared with native forests in ecosystems of tropical America.

- In: Abberton M, Conant R and Batello C (Editors). Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change. Integrated Crop Management 2010 FAO, Rome
- Arciniegas, S., & Flórez, D. (2018). Estudio de los sistemas silvopastoriles como alternativa para el manejo sostenible de la ganadería. *Cien. Agri.*, 15(2), 107–116. <https://doi.org/10.19053/01228420.v15.2>
- Bakhoun, N., Fall, D., Fall, F., Diouf, F., Hirsch, A. M., Balachandar, D., & Diouf, D. (2018). *Senegalia senegal* (synonym: *Acacia senegal*), its importance to sub-Saharan Africa, and its relationship with a wide range of symbiotic soil microorganisms. *South African Journal of Botany*, 119, 362–368. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.10.007>
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., ... & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494.
- Broom, D. M.; Galindo, F. A. & Murgueitio, E. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *P. Roy. Soc. Lond. B Bio.* 2025:1471-2954. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/royprsb/280/1771/20132025.full.pdf>, 2013
- Bravo, A. P., González-Stagnaro, C., & GIRARZ, C. D. L. C. C. (2013). Manejo de pastos y forrajes tropicales. Maracaibo, Venezuela: Astro Data SA.
- Bravo Parra, A.M. (2021) Cadenas sostenibles ante un clima cambiante. La ganadería en Colombia. Bonn (Germany): Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 142 p. ISBN: 978-958-8945-52-1

- Bruning, B. and Rozema, J. 2013. Symbiotic nitrogen fixation in legumes: Perspectives for saline agriculture. *Env. Exp. Bot.* 92(2013)134 – 143
- Bussoni, A., Cubbage, F., & Giambruno, J. A. (2021). Silvopastoral systems and multi-criteria optimization for compatible economic and environmental outcomes. *Agricultural Systems*, 190, 103118. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103118>
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., Solorio-Sanches, F.J., Parsons, D., Ramires-Aviles, L., 2014. Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in mixed and pure fodder banks systems in Yucatan, Mexico. *Agroforestry systems* 88 (1), 29e39
- Cannicci, S., Lee, S. Y., Bravo, H., Cantera-Kintz, J. R., Dahdouh-Guebas, F., Fratini, S., Fusi, M., Jimenez, P. J., Nordhaus, I., Porri, F., & Diele, K. (2021). A functional analysis reveals extremely low redundancy in global mangrove invertebrate fauna. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, 118(32). <https://doi.org/10.1073/pnas.2016913118>
- Chen, G., Zhu, H., & Zhang, Y. (2003). Soil microbial activities and carbon and nitrogen fixation. *Research In Microbiology*, 154(6), 393-398. [https://doi.org/10.1016/s0923-2508\(03\)00082-2](https://doi.org/10.1016/s0923-2508(03)00082-2)
- Contreras Santos, J. L., Martínez Atencia, J., Cadena Torres, J., & Fallas Guzmán, C. K. (2019). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Cuartas, C. A.; Naranjo, J. F.; Tarazona, A.; Correa, G. & Barahona-Rosales, R. Dry matter and nutrient intake and diet composition in *Leucaena leucocephala* - based intensive silvopastoral systems. *Trop. Subtrop Agroecosyst.* 18:303-311. <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2125/991>, 2015

- De Oliveira, L. B. T., Santos, A. C. D., André, T., Santos, J. L. D., & De Oliveira, H. P. (2017). Influence of a silvopastoral system on anatomical aspects and dry matter quality of Mombasa and Marandu grasses. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 13(3), 1–11. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2017/31624>
- Dupin, M. G., Espírito-Santo, M. M., Leite, M. E., Silva, J. O., Rocha, A. M., Barbosa, R. S., & Anaya, F. C. (2018). Land use policies and deforestation in Brazilian tropical dry forests between 2000 and 2015. *Environmental Research Letters*, 13(3), 035008.
- Duval, V., & Cámara, R. (2021). Diversity and carbon sequestration in a secondary forest of caldén (*Prosopis caldenia*) en La Pampa, Argentina. *Estudios Geograficos*, 82(291). <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202184.084>
- Garcia, M., Garcia, J., & Carvajal, D. (2018). Evaluación del Efecto de la Fertilización química y orgánica En la composición bromatológica de semillas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) En Boyacá – Colombia. *RIAA Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2).
- García, H., Corzo, G., Isaacs, P., & Etter, A. (2014). Distribución y estado actual de los remanentes del bioma de bosque seco tropical en Colombia: insumos para su gestión. *El bosque seco tropical en Colombia*, 228-251.
- Gaviria, Xiomara; Naranjo, J. F. & Barahona-Rosales, R. Nutritional quality and fractionation of carbohydrates and protein in the forage components of an intensive silvopastoral system. *Pastos y Forrajes*. 38 (2):194-201. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000200007, 015
- González-M, R., García, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodríguez, N., ... & Pizano, C. (2018). Desenmarañando la heterogeneidad ambiental, la distintividad florística

- y las amenazas actuales de los bosques secos tropicales en Colombia. *Cartas de investigación ambiental*, 13 (4), 045007.
- Hanisch, A. L., Negrelle, R. R. B., Bonatto, R. A., Nimmo, E. R., & Lacerda, A. E. B. (2019). Evaluating Sustainability in Traditional Silvopastoral Systems (caívas): Looking Beyond the Impact of Animals on Biodiversity. *Sustainability*, 11(11), 3098. <https://doi.org/10.3390/su11113098>
- Hernandes, A., Velasco, M., Vaquera, H., Martínez, J., Hernandez, P., & Aguirre, J. (2018). Growth analysis of (*Panicum maximum* Jacq.) Cv. Mombasa. *Revista MVZ Córdoba*, 23.
- Hernández, M. H., Ortiz, S. L., Rodríguez, J. J., Jiménez, E. O., Elizalde, S. P., Rivera, P. D., & Galván, M. M. C. (2020). Rendimiento y calidad nutritiva del forraje en un sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena leucocephala* y *Megathyrus maximus* cv. Tanzania. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(1), 53-69. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4565>
- Ilham, Z., & Nimme, F. H. (2019). Quantitative priority estimation model for evaluation of various non-edible plant oils as potential biodiesel feedstock. *AIMS Agriculture And Food*, 4(2), 303-319. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.2.303>
- Júnior, O. S., Santos, A. C. D., Rodrigues, M. O. D., Rodrigues, M. O. D., & Alencar, N. M. (2017). Productive efficiency of mombasa grass in silvopastoral system under pasture deferment and nitrogen fertilizer. *Semina. Ciências Agrárias*, 38(5), 3307. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n5p3307>
- Kweku, D. W., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K. A., Danso, K. B., Oti-Mensah, E. A., ... & Adormaa, B. B. (2018). Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. *Journal of Scientific research and reports*, 17(6), 1-9.

- López, L. B., & García, J. C. C. (2015). Nitrógeno edáfico y nodulación de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles. *Acta Agronómica/Acta Agronómica*, 64(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.45362>
- Maya Mazorra, G. E., Durán Castro, C. V., & Ararat Rojas, J. E. Altura, disponibilidad de forraje y relación hoja tallo del pasto estrella solo y asociado con leucaena. Departamento de Ciencia Animal.
- Mukherjee, S. (2022). Soil Erosion. In *Current Topics in Soil Science* (pp. 117–130). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92669-4_11
- Naranjo, J. F., Cuartas, C. A., Murgueitio, E., Chará, J., & Barahona, R. (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock research for rural development*, 24(8), 8-24.
- Navarro B and Navarro G. 2003. *Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Ediciones Mundi-Prensa. MadridBarcelona-México. Second Edition ISBN: 84-8476-155-X
- Nawaz, M.F., Bourrié, G. & Trolard, F. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Palacios-Lozano, M. T., Camacho Rojas, A., Pinto, A., & Rojas, L. (2019). Bases técnicas para la formulación de la política nacional de ganadería bovina sostenible-Colombia (BT-PNGBS).
- Paula, Reis, GG, Reis, MGF, Oliveira Neto, SN, Leite, HG, Melido, RCN, Lopes, HNS y Souza, FC (2013). Crecimiento de eucaliptos en monocultivos y sistemas silvopastoriles con densidades iniciales de árboles y arreglos espaciales variados. *Sistemas agroforestales*, 87 (6), 1295–1307. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9638-5>

- Pezzopane, J. R. M., Nicodemo, M. L. F., Bosi, C., Garcia, A. R., & Lulu, J. (2019). Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal Of Thermal Biology*, 79, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Polania, K., Olaya, A., Cherubin, M., & Herrera, W. (2021). Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, 385(0016–7061), 1–114900.
- Polanía-Hincapié, K. L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F. A., & Silva-Olaya, A. M. (2021). Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, 386, 114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>
- Reddy, P. P. (2016). Agricultural Soil Compaction. In *Sustainable Intensification of Crop Production* (pp. 41–52). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2702-4_3
- Rivera, J., Molina, I., Chara, J., Muergueitio, E., & Barahona, R. (2017). Sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: alternativa productiva en el trópico ante el cambio climático. *Centro Para La Investigación En Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV)*, 40(3), 171–183.
- Rodrigues, M. O. D., Santos, A. C. D., Da Silveira, O. F. M., De Oliveira, L. B. T., & De Lima Leite, R. L. (2019). Cutting height of Mombasa grass under silvopastoral and monoculture systems. *Journal of Agricultural Science*, 11(5), 433. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p433>
- Ruden A, Castro JP, Gutiérrez JF, Koenig S, Sotelo M, Arango J. 2020. GANSO: Nuevo modelo de negocios y de asistencia técnica para la profesionalización de la Ganadería Sostenible

en la Orinoquia colombiana. CCAFS Info Note. Cali, Colombia: Programa de Investigación de CGIAR en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS).

Saljnikov, E., Eulenstein, F., Lavrishchev, A., Mirschel, W., Blum, W. E. H., McKenzie, B. M., Lilburne, L., Römbke, J., Wilke, B.-M., Schindler, U., & Mueller, L. (2022). *Understanding Soils: Their Functions, Use and Degradation* (pp. 1–42). https://doi.org/10.1007/978-3-030-85682-3_1

Sarabia-Salgado, L., Solorio-Sánchez, F., Ramírez-Avilés, L., Alves, B. J. R., Ku-Vera, J., Aguilar-Pérez, C., Urquiaga, S., & Boddey, R. M. (2020). Increase in Milk Yield from Cows through Improvement of Forage Production Using the N₂-Fixing Legume *Leucaena leucocephala* in a Silvopastoral System. *Animals*, 10(4), 734. <https://doi.org/10.3390/ani10040734>

Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M. A., Tung, S. A., Hafeez, A., & Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(11), 10056–10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>

Shahabedini, S., Ghahramany, L., Pulido, F., Khosravi, S., & Moreno, G. (2018). Estimating leaf biomass of pollarded lebanon oak in open silvopastoral systems using allometric equations. *Trees*, 32(1), 99–108. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1614-7>

Singh, M. K., Kumar, M., & Thakur, I. S. (2017). Proteomic characterization and schizophyllan production by *Schizophyllum commune* ISTL04 cultured on *Leucaena leucocephala* wood under submerged fermentation. *Bioresource Technology*, 236, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.170>

- Stan, K., & Sanchez-Azofeifa, A. (2019). Tropical Dry Forest Diversity, Climatic Response, and Resilience in a Changing Climate. *Forests*, 10(5), 443. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/f10050443>.
- Velez-Torres, I., & Vélez Galeano, H. (2019). Plexos conflictivos: una visión territorial e histórica de los conflictos ambientales en la cuenca alta del río Cauca. *Revista Colombiana de Sociología*, 42(1). <https://doi.org/10.15446/rcs.v42n1.73181>
- Yando, E. S., Sloey, T. M., Dahdouh-Guebas, F., Rogers, K., Abuchahla, G. M., Cannicci, S., Canty, S. W., Jennerjahn, T. C., Ogurcak, D. E., Adams, J. B., Connolly, R. M., Diele, K., Lee, S. Y., Rowntree, J. K., Sharma, S., Cavanaugh, K. C., Cormier, N., Feller, I. C., Fratini, S., . . . Friess, D. A. (2021). Conceptualizing ecosystem degradation using mangrove forests as a model system. *Biological Conservation*, 263, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109355>
- Zapata, A., & Silva, B. (2020). *Sistemas Silvopastoriles. Aspectos teóricos y prácticos. (2nd ed., Vol. 2)*. CIPAV - Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.
- Zeppetello, L. R. V., Cook-Patton, S. C., Parsons, L. A., Wolff, N. H., Kroeger, T., Battisti, D. S., Bettles, J., Spector, J. T., Balakumar, A., & Masuda, Y. J. (2022). Consistent cooling benefits of silvopasture in the tropics. *Nature Communications*, 13(1), 708. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28388-4>