

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**PRODUCTIVIDAD DE PASTOS EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES EN EL
CORREDOR SECO DEL NORTE DE NICARAGUA**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

En AGROFORESTERÍA Y AGRICULTURA SOSTENIBLE

William J. Büschting

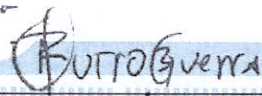
Turrialba, Costa Rica

2023

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA Y
AGRICULTURA SOSTENIBLE**


FIRMANTES:



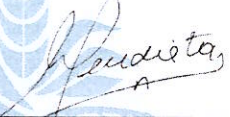
Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Codirector de tesis



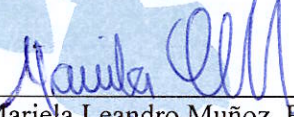
Danilo Pezo Quevedo, Ph.D.
Codirector de tesis



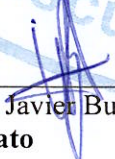
Cristóbal Villanueva Najarro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Bryan Mendieta Araica, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i., Escuela de Posgrado



William Javier Buschting Marín
Candidato

DEDICATORIA

A Dios, a mi familia y a mi Patria, que un día volverá a ser República.

A la libertad.

Si existe una condición natural y universal en la que el *Homo sapiens* encuentra la plenitud de ser todo lo que su potencial humano encapsula, para enfrentar con gallardía los escollos que entraña la vida o disfrutar de las ambrosías que ésta le depara, que indiscutible e indispensablemente es de beneficio actual y futuro para sí mismo y para sus semejantes, que sin dudas lleve por el camino de la dignidad ontológica (no por decreto) y de la felicidad, que con certeza oriente al respeto y a la integridad, que abone a la consciencia individual y colectiva, y que sea una clara expresión de un desarrollo social moderno, esa irremplazable condición inherente de todos, pero que siempre algunos, con desafueros y tropelías, quieren usurpar, esa condición es la libertad.

La libertad para vivir, porque así lo dispuso el Creador de todo lo que conocemos, sin que nadie más, detentando un poder transitorio y pagano, se arrogue el exclusivo derecho del Padre de apagar esa llama cuando él así lo decida.

La libertad para disentir, opinar y expresar, porque el ser humano ha sido dotado de capacidades mentales para conocer, entender y discernir las realidades distópicas que los lenguajes orwellianos pretenden instaurar, para alienar la memoria del pasado y del conocimiento comprensivo del presente.

La libertad de practicar los dogmas de las creencias celestiales, porque la comunicación con el Creador alimenta y nutre el espíritu con las virtudes, que conservan la esencia divina anidada en el hombre, pero también transforma la mirada de los escépticos de los despotismos.

La libertad para arraigar, florecer y fructificar en la tierra que nos vio nacer, porque es vasta, fértil y cálida, y no es un feudo ni un botín, sino el regazo de una madre que guarda a todos sus hijos por igual.

¡Nicaragua está hecha de vigor y de gloria, Nicaragua está hecha para la libertad!

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto “Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la Cosecha de Agua en Nicaragua” (COSUDE-CATIE) y al Proyecto “RESTAURación LATIN AMERICAN MODEL FOREST NETWORK – COSTA RICA”, por haber dispuesto los recursos financieros necesarios para otorgarme una beca de estudios.

A Bayardo Quintero, Coordinador del Proyecto Cosecha de Agua en Nicaragua, por haberme brindado la oportunidad de ser parte del equipo del Proyecto, y posteriormente, depositar su confianza en mis capacidades intelectuales para alcanzar esta prestigiosa experiencia académica.

A Pedro Orozco, por haberme considerado también para el equipo del Proyecto, pero sobre todo por el respeto y la tolerancia que siempre tuvo ante mis opiniones, que en algún momento pudieron parecer insolentes, pero solo buscaban contribuir a los objetivos laborales comunes.

A Amilcar Aguilar, Maritza Rivera y Mario Serpas, por respaldar mi candidatura para obtener esta beca de estudios. A Luisa Gámez, por su importante apoyo profesional en el último esfuerzo para culminar mi tesis. A Néstor Castellón, por la sugerencia en el tema de tesis.

Al CATIE, por abrirme sus puertas a ésta inestimable experiencia de vida con la que he conseguido crecer profesional y personalmente.

A Roberto Quiroz, Codirector de tesis, por su eminente tutoría, pero muy especialmente por sus consejos personales, permanente disponibilidad, paciente enseñanza y preocupación por mi aprendizaje. A Danilo Pezo, Codirector de tesis, por su extraordinaria orientación en la elaboración de este trabajo y su calidez profesional. A los miembros del Comité Consejero: Cristóbal Villanueva, por sus valiosos aportes en la preparación de este trabajo, y Bryan Mendieta, por su contribución en la evaluación de este proceso.

A todo el claustro docente, por el esfuerzo en la formación académica de sus alumnos, sobre todo a Guillermo Detlefsen y Fernando Carreras, quienes, además, por medio de RESTAURación, gestionaron los recursos financieros para mi estadía en el campus.

A todos los colegas de mi promoción, con quienes compartí espacios y momentos de afanoso estudio y plácida recreación. A todo el personal de la Escuela de Posgrado, por su invariable amabilidad.

Al equipo técnico del Proyecto, por su valiosa y constante colaboración en la etapa de campo de mi tesis, especialmente a: Félix Chavarría, Ramón Joya, Maynord Soza, Adanelis Parrilla, Ena Ibarra y Byron Morán.

A los productores participantes del estudio, por su alta disposición y genuina amabilidad en apoyar esta investigación con sus fincas, con información y con la recolección de datos.

A todo aquel ciudadano costarricense de bien, por su hospitalidad y solidaridad con la diáspora nicaragüense.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE CUADROS DEL ARTÍCULO 1	VI
ÍNDICE DE CUADROS DEL ARTÍCULO 2	VII
ÍNDICE DE FIGURAS DEL ARTÍCULO 1	VII
ÍNDICE DE FIGURAS DEL ARTÍCULO 2	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES	VIII
ARTÍCULO 1. Productividad de pastos en los sistemas silvopastoriles en el Corredor Seco del Norte de Nicaragua: I. Componente leñoso	IX
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	2
2.1. Ubicación y descripción del área de estudio.....	2
2.2. Toma de datos y análisis.	3
2.3. Caracterización del componente leñoso de los SSP manejados en el marco del PCA.....	3
3. RESULTADOS.....	6
3.1. Composición, diversidad, riqueza y estructura de la cobertura arbórea de los SSP.....	6
3.1.1. Composición florística de los SSP en general, por tipo de pastura y de diseño.....	6
3.1.2. Diversidad de especies (Shannon-Wiener) y riqueza específica (Margalef) de los SSP general, por tipo de pastura y de diseño.	8
3.1.3. Estructura horizontal y vertical de los SSP.	8
4. DISCUSIÓN.....	11
4.1. Caracterización del componente leñoso de los SSP.....	11
5. CONCLUSIONES	14
6. RECOMENDACIONES	14
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ARTÍCULO 2. Productividad de pastos en los sistemas silvopastoriles en el Corredor Seco del Norte de Nicaragua: II. Componente herbáceo.....	21
RESUMEN.....	21
ABSTRACT	21
1. INTRODUCCIÓN.....	23
2. METODOLOGÍA	24
2.1. Ubicación y descripción del área de estudio.....	24
2.2. Toma de datos y análisis.	25
2.3. Cuantificación de la producción y la calidad nutricional de las pasturas mejoradas y seminaturales.....	25
2.4. Estimación de la contribución de los pastos mejorados a la productividad animal.	26

2.5.	Evaluación de sensores remotos y proximales para la estimación de biomasa en las pasturas.....	27
3.	RESULTADOS.....	29
3.1.	Disponibilidad y calidad nutricional de las pasturas mejoradas y seminaturales.....	29
3.1.1.	Producción de biomasa y composición botánica.....	29
3.1.2.	Calidad nutricional.....	32
3.2.	Contribución potencial de <i>M. maximus</i> a la mejora de la productividad bovina en los SSP evaluados.....	33
3.3.	Predicción de la producción de biomasa utilizando índices de vegetación NIR y RGB.....	35
3.3.1.	Sensores remotos.....	35
3.3.2.	Sensores proximales.....	36
4.	DISCUSIÓN.....	36
4.1.	Producción y calidad de las pasturas mejoradas y las pasturas seminaturales.....	36
4.1.1.	Disponibilidad de biomasa.....	36
4.1.2.	Composición botánica.....	38
4.1.3.	Calidad nutricional.....	39
4.1.4.	Contribución del Proyecto Cosecha de Agua a la mejora de la alimentación del ganado bovino en época seca.....	41
4.2.	Contribución potencial de las pasturas de <i>M. maximus</i> a la productividad animal.....	41
4.3.	Evaluación de los sensores remotos y los sensores proximales.....	42
5.	CONCLUSIONES.....	44
6.	RECOMENDACIONES.....	45
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
8.	ANEXOS.....	59
	Anexo 1. Productores atendidos por el PCA participantes del estudio.....	59
	Anexo 2. Número de familias, de especies y de individuos registrados en el estudio.....	59
	Anexo 3. Parámetros de la estructura horizontal de los SSP.....	60

ÍNDICE DE CUADROS DEL ARTÍCULO 1

Cuadro A1- 1.	Composición florística general del componente arbóreo en los SSP estudiados.....	6
Cuadro A1- 2.	Composición florística de los SSP en función del tipo de pastura y del diseño del componente arbóreo.....	7
Cuadro A1- 3.	Índices de diversidad alfa (H') y diversidad específica (D_{mg}) de los SSP en función del tipo de pastura y del diseño del componente arbóreo.....	8
Cuadro A1- 4.	Especies con mayores valores de ARI , FRI y DRI	8

ÍNDICE DE CUADROS DEL ARTÍCULO 2

Cuadro A2- 1. Calidad nutricional de las pasturas mejoradas y seminaturales.	32
Cuadro A2- 2. Productividad simulada del ganado de engorde en función de la carga animal en pastura seminatural y mejorada.	33
Cuadro A2- 3. Métricas utilizadas en la evaluación de los modelos de regresión lineal y no lineal, para predecir la estimación de biomasa en <i>M. maximus</i> cv Mombasa con sensores remotos.	35
Cuadro A2- 4. Métricas utilizadas en la evaluación de los modelos de regresión lineal y no lineal, para predecir la estimación de biomasa en <i>M. maximus</i> cv. Mombasa con sensores proximales.	36

ÍNDICE DE FIGURAS DEL ARTÍCULO 1

Figura A1- 1. Localización del área de estudio y de las unidades productivas participantes.	2
Figura A1- 2. Temperatura media y precipitación predominantes en el área de estudio durante el periodo de la toma de datos.	3
Figura A1- 3. Especies con mayor peso ecológico (IVI) en las áreas de estudio.	9
Figura A1- 4. Estructura general de los SSP en función de la clase diamétrica (cm).	10
Figura A1- 5. Estructura de los SSP de acuerdo al Índice de distribución vertical de especies (A).	11

ÍNDICE DE FIGURAS DEL ARTÍCULO 2

Figura A2- 1. Localización del área de estudio y de las unidades productivas participantes.	24
Figura A2- 2. Temperatura media y precipitación predominantes en el área de estudio durante el periodo de la toma de datos.	25
Figura A2- 3. Producción de biomasa de las pasturas mejoradas y seminaturales en cada UM.	29
Figura A2- 4. Número de cabezas de ganado capaces de sostenerse con la disponibilidad de MS estimada en pasturas mejoradas y seminaturales por cada UM.	30
Figura A2- 5. Producción promedio de biomasa de las pasturas mejoradas y seminaturales.	30
Figura A2- 6. Composición botánica promedio de las pasturas mejoradas.	31
Figura A2- 7. Composición botánica promedio de las pasturas seminaturales.	31
Figura A2- 8. Producción de kilogramos de proteína cruda (PC) y megacalorías de energía metabolizable (EM) por unidad de superficie y tipo de pastura.	32
Figura A2- 9. Comportamiento de la productividad potencial del ganado de carne pastoreando <i>M. maximus</i> , por superficie, como función de la carga animal.	33
Figura A2- 10. Comportamiento de la producción animal potencial del ganado de carne, por tiempo y superficie como función de la carga animal en pasturas de <i>M. maximus</i>	34

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

ADP	Árboles Dispersos en Potreros
ANOVA	ANalysis of VAriance
AOAC	Association of Official Agricultural Chemists
APP	Application (abreviatura)
BST	Bosque Seco Tropical
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CSC	Corredor Seco Centroamericano
CV	Cerca Viva
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho
DBCA	Diseño Bloques Completamente al Azar
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	Google Earth Engine
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
LIFE-SIM	Livestock Feeding Strategies Simulation Models
NIR	Near InfraRed
Past	PAleontological STatistics
PCA	Proyecto Cosecha de Agua
QGIS	Quantum GIS (Geographical Information System)
RGB	Red Green Blue
SNAP	SeNtinel Application Platform
SSP	Sistema Silvopastoril
U.A.	Unidad Animal
UNA	Universidad Nacional Agraria, Nicaragua
UTM	Universal Transverse Mercator

ARTÍCULO 1. Productividad de pastos en los sistemas silvopastoriles en el Corredor Seco del Norte de Nicaragua: I. Componente leñoso

RESUMEN

En las regiones de sabana tropical es necesaria la implementación de sistemas productivos pecuarios más resilientes y rentables. En este sentido, el Proyecto Cosecha de Agua en Nicaragua fortaleció los Sistemas Silvopastoriles del Corredor Seco Centroamericano mediante la promoción de pasturas mejoradas de *Megathyrsus maximus* Jacq. cv. Mombasa. En estos SSP se caracterizó el componente leñoso de los SSP y se encontraron 19 familias botánicas (predominó Fabaceae), 36 especies y 634 individuos distribuidos en cercas vivas (CV) y árboles dispersos en potreros (ADP); muy baja diversidad alfa ($H' = 1.64 \pm 0.18$) y baja riqueza específica ($D_{mg} = 2.14 \pm 0.27$); una estructura horizontal donde las leguminosas son las especies con mayor importancia ecológica, y una estructura vertical con diversidad media ($A_{rel} = 61.12\%$).

Palabras clave: *Composición florística, Shannon-Wiener, Margalef, IVI, clases diamétricas, Pretzsch, árboles dispersos en potrero, cercas vivas*

ARTICLE 1. Grass productivity in Silvopastorals Systems in the Dry Corridor in the Northern Nicaragua: I. Woody component.

ABSTRACT

Implementing more resilient and profitable livestock production systems is necessary in tropical savanna regions. In this sense, the Water Harvest Project in Nicaragua strengthened the Silvopastoral Systems (SSP) of the Central American Dry Corridor by promoting improved *Megathyrsus maximus* Jacq. cv. Mombasa pastures. The SSP woody component was characterized, resulting in 19 botanical families (Fabaceae was predominant), 36 species, and 634 individuals distributed in live fences (LF) and scattered trees in pastures (STP); very low alpha diversity ($H' = 1.64 \pm 0.18$) and low specific richness ($D_{mg} = 2.14 \pm 0.27$); a horizontal structure where legumes are the species with most significant ecological importance, and a vertical structure with medium diversity ($A_{rel} = 61.12\%$).

Keywords: *Floristic composition, Shannon-Wiener, Margalef, IVI, diametric classes, Pretzsch Index, scattered trees in pastures, live fences.*

1. INTRODUCCIÓN

Las regiones tropicales del mundo concentran el 45% de los 4060 millones de hectáreas de boques existentes a nivel global, y a pesar de su importancia ecológica, social y económica, estos bosques desaparecen a un ritmo de 9.3 millones de hectáreas por año (FAO 2020). El 88% de ésta deforestación se encuentra relacionada a las actividades productivas agropecuarias, a saber: 50% por la expansión de las áreas de cultivo y 38% por la ampliación de tierras para el pastoreo de ganado. Esta última actividad impulsa el 42% de la deforestación del bosque tropical seco, el cual, a partir del año 2000, ha perdido el 19% de su superficie a nivel mundial y el 25.4% en América Central (FAO 2022).

Los sistemas ganaderos que prescindan del elemento forestal en sus potreros conducen a la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua, el calentamiento global y la degradación del suelo (Neary *et al.* 2009; Alroy 2017; Austin *et al.* 2020), entre otros perjuicios. A la postre, la continuidad operativa de éste modelo extensivo de producción bovina repercute, directa e indirectamente, de forma negativa en las variables productivas y reproductivas del hato (Cheng, *et al.* 2022), con las consecuentes pérdidas para los productores pecuarios, principalmente pequeños y medianos.

Por el contrario, se ha demostrado que la presencia de árboles y arbustos en las pasturas favorece la productividad animal e incrementa la resiliencia del sistema productivo, al reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de adaptación (Cuartas *et al.* 2014). Es por ello, que la implementación de esquemas productivos bajo un enfoque de sistemas silvopastoriles (SSP), es decir, la incorporación del componente leñoso en áreas de pasturas, es fundamental para el desarrollo de una ganadería sustentable en las regiones tropicales (Solorio *et al.* 2017).

En este sentido, el estudio del componente leñoso de los SSP es relevante para conocer el estado actual, la composición y la distribución espacial de sus elementos. Este conocimiento permite entender su funcionamiento, con el propósito de desarrollar buenas prácticas de manejo agroforestal de cara al cumplimiento de su principal objetivo, que es la producción forrajera en cantidad y calidad suficiente. Además, es determinante en la planificación de programas de manejo, conservación e incluso, restauración ecológica de los sistemas productivos pecuarios (Ni *et al.* 2014).

Por ello, el objetivo de esta investigación fue caracterizar el componente leñoso de los sistemas silvopastoriles, manejados por pequeños y medianos ganaderos del Corredor Seco del Norte de Nicaragua, en el contexto del Proyecto Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la Cosecha de Agua en Nicaragua (PCA).

2. METODOLOGÍA

2.1. Ubicación y descripción del área de estudio.

Esta investigación se desarrolló en trece unidades productivas agropecuarias, propiedad de pequeños y medianos ganaderos atendidos por el PCA, localizadas en comunidades de los municipios de Condega y Pueblo Nuevo, departamento de Estelí, Nicaragua (Figura A1-1).

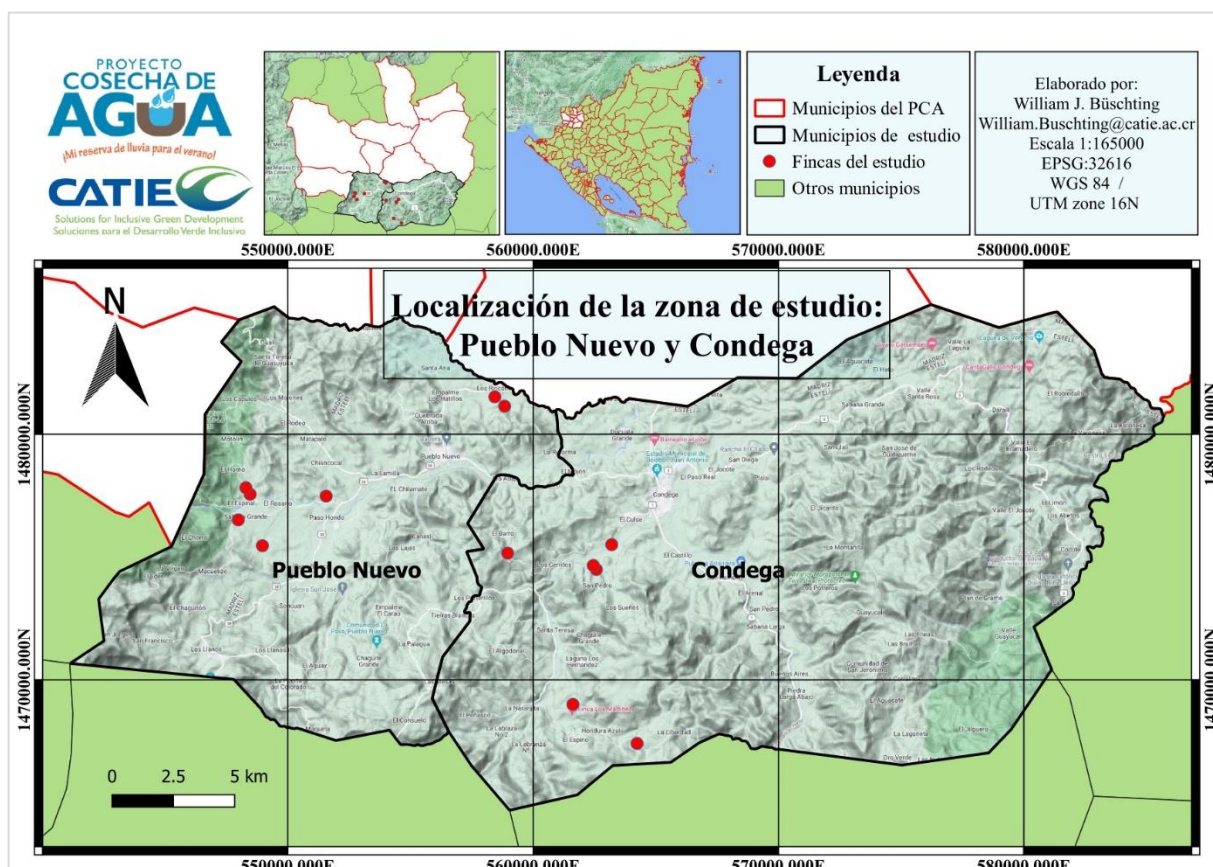


Figura A1- 1. Localización del área de estudio y de las unidades productivas participantes.

Los suelos de estos municipios se caracterizan por ser moderadamente profundos, de textura franco-arcillosa, ligeramente ácidos, con bajo porcentaje de materia orgánica, altamente degradados, relieve fuertemente ondulado a escarpado, bien drenados y erosión hídrica moderada a fuerte (INETER 2021).

El clima es tropical de sabana con precipitaciones entre 800-1,400 mm año⁻¹ (estación seca de noviembre a abril), humedad relativa (HR) promedio entre 65-75% (INETER 2005) y temperaturas medias anuales de 24.6°C (Ruiz *et al.* 2021). De acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1978), esta zona se tipifica como Bosque Seco Tropical (BST). Las condiciones climáticas predominantes durante la etapa de campo del estudio se presentan en la Figura A1-2.

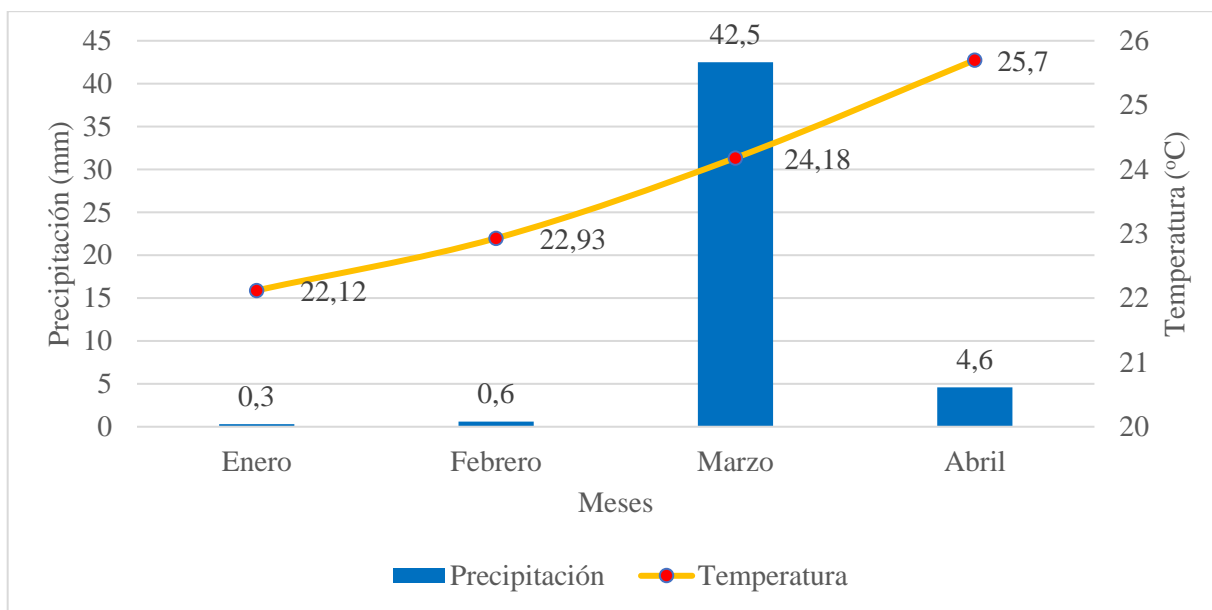


Figura A1- 2. Temperatura media y precipitación predominantes en el área de estudio durante el periodo de la toma de datos.

En los dos municipios cubiertos por este estudio, el 42.31% de la superficie reportada como de uso agropecuario se destina a la utilización en pasturas. Aproximadamente, 1/3 de las cabezas de ganado existentes en los diez municipios que atiende el PCA, se encuentran en las fincas de Pueblo Nuevo y Condega (INIDE 2013a; INIDE 2013b).

2.2. Toma de datos y análisis.

La etapa de campo se llevó a cabo en las fincas de productores ganaderos durante los meses de enero a abril de 2023 (época seca). Las unidades muestrales (UM) (ver Anexo 1) fueron seleccionadas a partir de un listado de 605 ganaderos atendidos por el PCA, quienes recibieron apoyo técnico para el desarrollo de sus SSP. Los criterios utilizados para la selección de las fincas fueron: que tuviera un área de pasto mejorado sembrado con semillas facilitadas por el PCA, que el pasto estuviera intacto previo a su próxima utilización, condiciones biofísicas y de manejo similares a las pasturas seminaturales usadas como control, las que preferiblemente deberían estar en terreno contiguo y con topografía relativamente plana; y disposición del propietario para apoyar el estudio, facilitando permisos de acceso a la propiedad e información pertinente.

2.3. Caracterización del componente leñoso de los SSP manejados en el marco del PCA.

En las UM se tomaron los siguientes datos censales del componente leñoso:

- a) Número de especies y su clasificación taxonómica.
- b) Diámetro a la altura del pecho (DAP). Medido a una altura de 1.3 m, pero cuando el tronco estaba bifurcado se tomaron dos circunferencias y se calculó el diámetro cuadrático medio (DCM), con la siguiente fórmula:

$$DCM = \sqrt{\sum_{i=1}^n DAP_i^2}$$

Donde:

DCM : Diámetro Cuadrático Medio.

DAP_i : Diámetro a la Altura del Pecho de cada uno de los troncos medidos.

- c) Altura total y comercial. Estimada con *smartphone* a través de la aplicación *Trees APP* v. 4.1.9.¹

Para conocer la composición florística se clasificaron las especies por familia botánica. La diversidad y la riqueza de especies se determinaron mediante los índices de diversidad alfa (Shannon-Wiener) y diversidad específica (Margalef), utilizando el software libre *Past* v.3.17 (Hammer *et al.* 2001).

$$H' = \sum_{i=1}^S Pi * \ln(Pi)$$

Donde:

H' : Índice de Shannon-Wiener

S : Número de especies presentes

N : Número total de individuos

ni : Número de individuos de la especie

\ln : Logaritmo natural

$$D_{mg} \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

Donde:

D_{mg} : Índice de Margalef

S : Número de especies presentes

\ln : logaritmo natural

N : Número total de individuos

Para conocer la estructura horizontal de los SSP, se estimaron la abundancia relativa (AR_i), la frecuencia relativa (FR_i), la dominancia relativa (DR_i) (Canizales-Velázquez *et al.* 2021), el Índice de Valor de Importancia (IVI), y se determinaron ocho clases diamétricas con amplitud de 10.0 cm.

$$A_i = N_i/S ;$$

$$AR_i = \left(\frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \right) X 100$$

Donde:

AR_i : Abundancia relativa

A_i : Abundancia absoluta

N_i : Número de individuos de la especie i .

S : Superficie de muestreo

$$F_i = P_i/NS ;$$

$$FR_i = \left(\frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \right) X 100$$

Donde:

FR_i : Frecuencia relativa

F_i : Frecuencia absoluta

P_i : Número de sitios en el que está presente la especie

NS : Número total de sitios de muestreo

$$D_i = G_i/S ;$$

$$DR_i = \left(\frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \right) X 100$$

Donde:

DR_i : Dominancia relativa

D_i : Dominancia absoluta

G_i : Área basal de la especie

S : Superficie de muestreo

¹ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.forest.trees>

$$IVI = (AR_i + FR_i + DR_i) / 3$$

Donde:

- IVI* : Índice de Valor de Importancia.
AR_i : Abundancia Relativa.
FR_i : Frecuencia Relativa.
DR_i : Dominancia Relativa.

Para conocer la estructura vertical, se utilizó el Índice de distribución vertical de especies (A) o Índice de Pretzsch (Pretzsch 2009). Para ello, se definieron tres pisos altitudinales en función de la máxima altura encontrada: estrato superior, que va del 100 % al 80 % de la altura máxima encontrada; estrato medio, del 80 % a 50 %, y estrato inferior, de 50% a 0 %. Este índice (A) sirve para determinar la diversidad estructural en cuanto a la distribución vertical de las especies y se calcula con la siguiente fórmula (Alanís-Rodríguez *et al* 2020):

$$A = - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^Z p_{ij} \times \ln p_{ij}$$

$$p_{ij} = \frac{n_{i,j}}{N}$$

Donde:

- A*: Índice de distribución vertical de especies
S: Número de especies presentes
Z: Número de estratos de altura
ln: Logaritmo natural
p_{ij}: Porcentaje de especies en cada estrato

Donde:

- p_{ij}*: Porcentaje de especies en cada estrato
n_{ij}: Número de individuos de la misma especie (i) en el estrato (j)
N: Número total de individuos

Puesto que el máximo valor de (A) está dado por el número de especies y de estratos asignados, se estimó el A_{max} y A_{rel} . Estandarizar el índice permite hacer comparaciones con otras zonas de estudio.

$$A_{max} = (\ln S \times Z)$$

$$A_{rel} = (A/A_{max}) \times 100$$

3. RESULTADOS

3.1. Composición, diversidad, riqueza y estructura de la cobertura arbórea de los SSP.

3.1.1. Composición florística de los SSP en general, por tipo de pastura y de diseño.

La caracterización del componente leñoso abarcó 12.10 ha que contemplaron doce de las trece UM del estudio. Una de las UM se descartó porque no presentaba elementos forestales por su ubicación contigua a áreas de cultivo.

En las doce UM con leñosas, la composición florística del componente arbóreo presentó 19 familias botánicas que dieron lugar a 33 géneros y 36 especies, distribuidas en 634 individuos. El detalle por familia se visualiza en el Cuadro A1-1.

Cuadro A1- 1. Composición florística general del componente arbóreo en los SSP estudiados.

No.	Familia	Géneros	Especies	% Especies	No. Individuos	% Individuos
1	Fabaceae	12	13	36.11	363	56.94
2	Picramniaceae	1	1	2.78	63	9.94
3	Rhamnaceae	1	1	2.78	52	8.20
4	Burseraceae	1	1	2.78	48	7.57
5	Boraginaceae	1	3	8.33	34	5.36
6	Sterculiaceae	1	1	2.78	25	3.94
7	Meliaceae	1	1	2.78	15	2.37
8	Bignoniaceae	3	3	8.33	10	1.89
9	Salicaceae	1	1	2.78	6	0.95
10	Euphorbiaceae	1	1	2.78	4	0.63
11	Anacardiaceae	1	1	2.78	2	0.32
12	Bombacaceae	2	2	5.56	2	0.32
13	Polygonaceae	1	1	2.78	2	0.32
14	Rutaceae	1	1	2.78	2	0.32
15	Simaroubaceae	1	1	2.78	2	0.32
16	Anonaceae	1	1	2.78	1	0.16
17	Moraceae	1	1	2.78	1	0.16
18	Myrtaceae	1	1	2.78	1	0.16
19	Rubiaceae	1	1	2.78	1	0.16
Total general		33	36	100.00	634	100.00

Los resultados indican que cuatro familias botánicas abarcaban el 58.33% de las especies identificadas, y que también cuatro familias aglutinaban al 82.65% del total de individuos registrados. Las Fabáceas fueron la única familia que figuró en ambos casos, pero también fue destacable por su amplia dominancia sobre estos aspectos de la composición florística. La mayoría de las familias (15) solo aportaron una especie y menos del 1% de los individuos registrados. El detalle del número de especies e individuos se presenta en el Anexo 2.

Tanto en pasturas mejoradas como en seminaturales, las UM reflejaron dos diseños comunes de SSP: árboles dispersos en potreros (ADP) y cercas vivas (CV). El 33.33% de las UM tenía

únicamente ADP, el 25.0% solo CV y el 41.67% tenía ambos diseños. La composición florística desagregada por tipo de pastura y diseño SSP se visualiza en el Cuadro A1-2.

Cuadro A1- 2. Composición florística de los SSP en función del tipo de tipo de pastura y del diseño del componente arbóreo.

No.	Familia	Pastura mejorada				Pastura seminatural			
		ADP		CV		ADP		CV	
		Spp.	Ind.	Spp	Ind.	Spp	Ind.	Spp	Ind.
1	Fabaceae	12	124	8	107	7	14	4	116
2	Rhamnaceae	1	39	1	3	1	10	-	-
3	Boraginaceae	2	19	3	12	1	2	1	1
4	Meliaceae	1	15	-	-	-	-	-	-
5	Sterculiaceae	1	12	1	8	1	1	1	4
6	Bignoniaceae	2	7	1	2	1	1	2	2
7	Picramniaceae	1	6	1	21	1	1	1	35
8	Salicaceae	1	6	-	-	-	-	-	-
9	Euphorbiaceae	1	3	-	-	-	-	1	1
10	Bombacaceae	2	2	-	-	-	-	-	-
11	Burseraceae	1	2	1	41	-	-	1	5
12	Moraceae	1	1	-	-	-	-	-	-
13	Myrtaceae	1	1	-	-	-	-	-	-
14	Simaroubaceae	1	1	-	-	1	1	-	-
15	Anacardiaceae	-	-	-	-	1	1	1	1
16	Anonaceae	-	-	-	-	-	-	1	1
17	Polygonaceae	-	-	1	2	-	-	-	-
18	Rubiaceae	-	-	-	-	1	1	-	-
19	Rutaceae	-	-	-	-	1	2	-	-
Total general		28	238	17	196	16	34	13	166

Spp.: especies; *Ind.:* Individuos

En las áreas de pastura mejorada (7.52 ha) se localizó el 88.88% de las especies leñosas y el 68.45% de los individuos registrados. Por su parte, las áreas de pastura seminatural (4.83 ha) albergaron el 58.33% de las especies identificadas y el 31.54% de los individuos. Cabe indicar que el 47% de las especies leñosas se observaron en ambos tipos de pastura.

En relación con el diseño de los SSP, ambas pasturas coincidieron en tener presencia de un mayor número de especies en los ADP que en las CV. Sin embargo, en las pasturas seminaturales difiere el comportamiento en cuanto a la cantidad de individuos, pues relativamente estas dispusieron de mucha mayor cantidad de árboles en las CV que en ADP. Las leguminosas fueron las leñosas predominantes tanto en los dos tipos de pastura como en los dos diseños SSP.

3.1.2. Diversidad de especies (Shannon-Wiener) y riqueza específica (Margalef) de los SSP general, por tipo de pastura y de diseño.

En general, los valores para los índices de Shannon-Wiener (H') y de Margalef (D_{mg}) alcanzaron 1.64 (± 0.18) y 2.14 (± 0.27), respectivamente, y sus valores mínimos y máximos fueron desde 0.39 hasta 2.45 y de 0.6 a 3.99, en el mismo orden. Desde la perspectiva del tipo de pastura y del diseño del SSP, la diversidad y la riqueza de especies del componente arbóreo se presenta en el Cuadro A1-3.

Cuadro A1- 3. Índices de diversidad alfa (H') y diversidad específica (D_{mg}) de los SSP en función del tipo de pastura y del diseño del componente arbóreo.

Variable	Pasto Mejorado				Seminatural			
	ADP		CV		ADP		CV	
	H'	D_{mg}	H'	D_{mg}	H'	D_{mg}	H'	D_{mg}
n	9	9	7	7	5	5	6	6
Media	1.23	1.5	1	1.16	0.95	1.36	0.82	1
D.E.	0.71	0.94	0.98	1.18	0.81	1.35	0.67	0.85
E.E.	0.24	0.31	0.37	0.45	0.36	0.61	0.27	0.35
Mín	0	0	0	0	0	0	0	0
Máx	2.08	2.75	2.04	2.52	2.16	3.47	1.75	2.09

n: número de SSP; D.E.: Desviación Estándar; E.E.: Error Estándar; Min: Mínimo; Max: Máximo

Los valores medios para ambos índices fueron siempre mayores en la pastura mejorada y en ADP, que en la pastura seminatural y en CV.

3.1.3. Estructura horizontal y vertical de los SSP.

Respecto a la estructura horizontal, las tres especies más abundantes, frecuentes y dominantes se presentan en el Cuadro A1-4. Los resultados de AR_i , FR_i , DR_i e IVI para cada especie, se pueden ver en el Anexo 3.

Cuadro A1- 4. Especies con mayores valores de AR_i , FR_i y DR_i .

Variable	Familia	Especie	Valor (%)
AR_i	Fabaceae	<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standley	29.02
	Picramniaceae	<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm	9.94
	Rhamnaceae	<i>Karwinskia calderonii</i> Standley	8.20
FR_i	Picramniaceae	<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm	8.33
	Fabaceae	<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	7.41
	Fabaceae	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	7.41
DR_i (área basal)	Fabaceae	<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standley	23.31
	Fabaceae	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	12.01
	Sterculiaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam	8.57

AR_i : Abundancia Relativa; FR_i : Frecuencia Relativa; DR_i : Dominancia Relativa.

El Cuadro A1-4 muestra claramente la prevalencia de las Fabáceas en los tres componentes de la estructura horizontal de las UM. *C. velutina* con 15.02 árboles ha⁻¹ fue la especie más abundante del inventario y a su vez, intrafamiliarmente 5 de cada 10 individuos pertenecen a esta especie. Le siguieron en abundancia, aunque de lejos, *A. amorphoides* con 5.20 árboles ha⁻¹ y *K. calderonii* con 4.29 árboles ha⁻¹. Las especies menos abundantes fueron ocho, y solamente reportaron un individuo por cada una.

Las especies más frecuentemente encontradas fueron *A. amorphoides* y dos Fabáceas más (*G. sepium* y *E. cyclocarpum*), las mismas que fueron observadas en 9 y 8 SSP, respectivamente. Ninguna especie estuvo presente en todos los SSP estudiados.

Con 7.711 m² de área basal, *C. velutina* fue también, la especie más dominante y *E. cyclocarpum*, otra Fabácea, fue la segunda especie más dominante, pero esta última se localizó más como árboles dispersos en potreros que como cerca viva. *G. ulmifolia* completa la tríada y se observó en fracciones iguales en ambos diseños.

La constante presencia en las variables de la estructura horizontal tiene su efecto en el Índice de Valor de Importancia, presentado en la Figura A1-3.

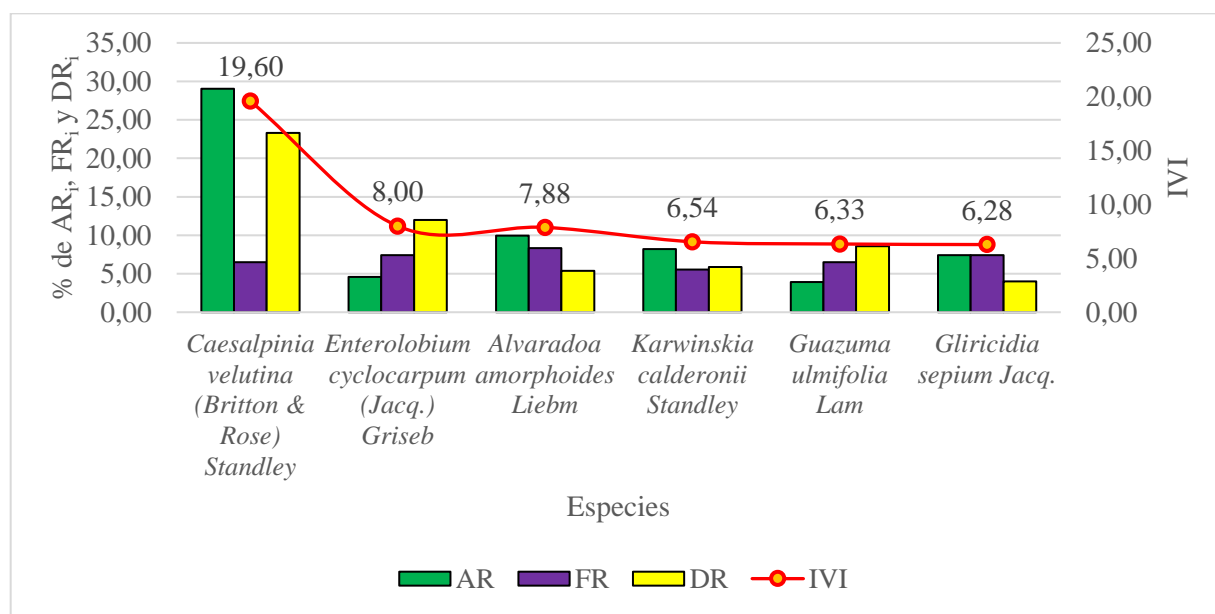


Figura A1- 3. Especies con mayor peso ecológico (IVI) en las áreas de estudio.

Las principales variables que definieron un lugar en el IVI para este estudio fueron la AR_i y la DR_i. La FR_i fue similar entre las especies presentadas en la Figura A1-3. Por ello, de las seis especies ecológicamente más importantes, la mitad fueron Fabáceas. *C. velutina* se presentó como la especie más importante por su numerosidad y mayor suma de áreas basales (G), mientras *E. cyclocarpum* como la segunda más importante por su dominancia. *A. amorphoides* y *K. calderonii* lograron mayor IVI gracias a su AR_i. *G. ulmifolia* debió su importancia ecológica a la DR_i.

El análisis de la estructura horizontal del componente leñoso se completa con la clasificación diamétrica, presentada en la Figura A1-4. En ella se observa que la mayor cantidad de individuos en estos SSP correspondió a la segunda clase diamétrica con DAP de entre 10.00 y 19.99 cm. Luego, en la medida que los DAP incrementaban, el número de individuos decreció

paulatinamente, es decir, los individuos jóvenes y delgados fueron más abundantes que los individuos maduros, y progresivamente estos van sustituyendo a los más viejos. La clase diamétrica con valores <9.99 cm describió la regeneración natural.

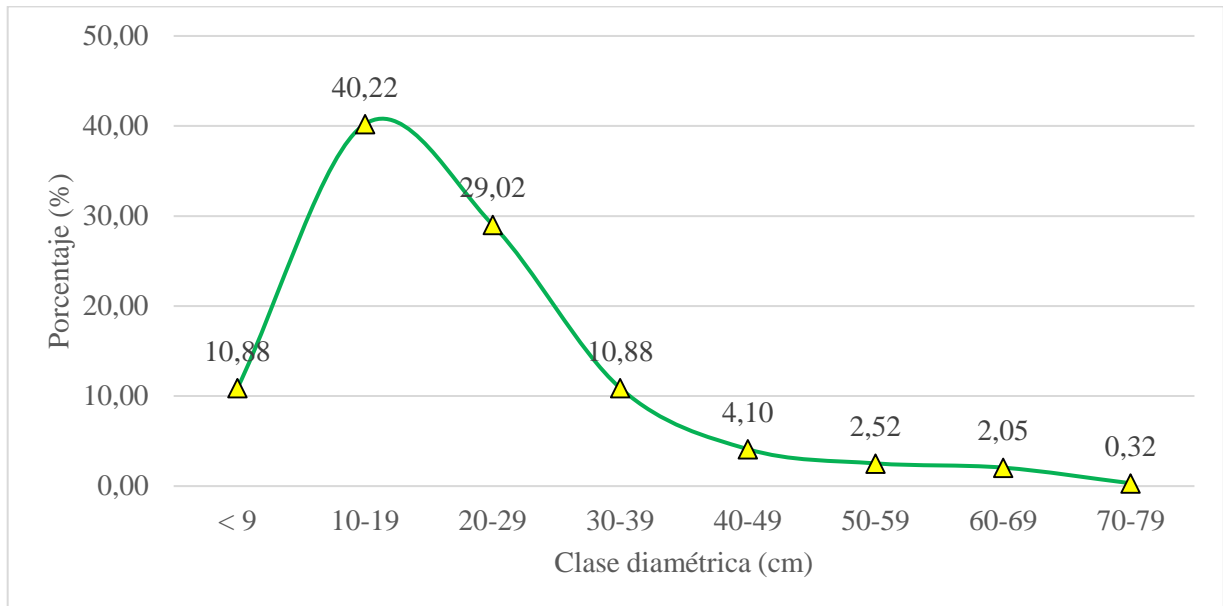


Figura A1- 4. Estructura general de los SSP en función de la clase diamétrica (cm).

El análisis de la estructura vertical empleando el Índice de Pretzch se presenta en la Figura A1-5. Este índice señala que la máxima altura encontrada fue de 20.0 m. A partir de ello, la estratificación vertical se fijó en: 20.0 – 16.0 m para el estrato superior, 15.99 – 10.0 m para el estrato intermedio y < 9.99 m para el estrato inferior.

El estrato más alto estuvo conformado por tres individuos: *Cedrela odorata* L., *E. cyclocarpum* y *Ficus insipida* Willd. Cada una de estas especies reflejó una densidad de 0.08 árboles ha⁻¹ y entre todas sumaron el 3.17% de las áreas basales estimadas. En el estrato intermedio se encuentra el 27.74% de las áreas basales totales. *C. velutina* y *C. odorata* fueron las especies más abundantes en este estrato, con el 34.66 y 13.33% de los individuos, respectivamente, y también las más dominantes con 17.47 y 21.45% de las áreas basales del estrato medio, en el mismo orden. El estrato inferior fue el más numeroso en especies e individuos, así como el de mayor concentración de áreas basales (69.07%). Nuevamente, *C. velutina* figuró como la especie más abundante (24.92%) y dominante (26.72%) en este piso. En abundancia le siguieron *A. amorphoides* y *K. calderonii*, y en dominancia, *G. ulmifolia* y *E. cyclocarpum*.

El valor del índice de Pretzsch fue de 2.861, con un $A_{max} = 4.682$ y el $A_{rel} = 61.12\%$.

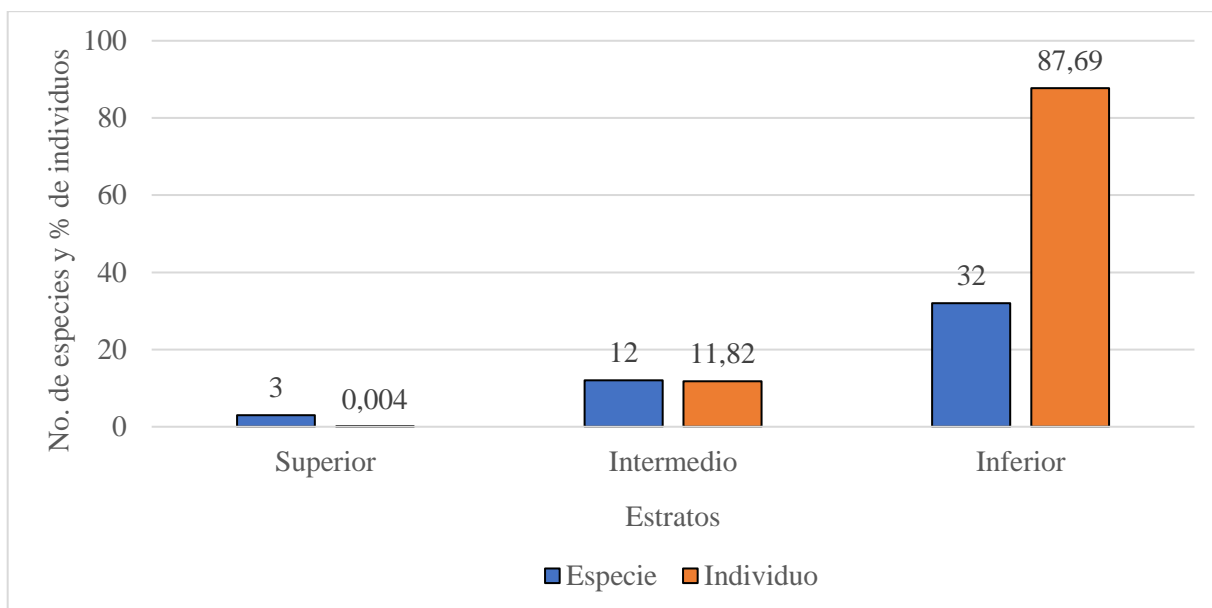


Figura A1- 5. Estructura de los SSP de acuerdo al Índice de distribución vertical de especies (A).

4. DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del componente leñoso de los SSP.

En la zona de estudio se han investigado variables de composición florística, diversidad y estructura horizontal desde la perspectiva silvícola, obteniendo resultados para áreas de bosque. En los SSP, el bosque se expresa parcialmente a través del componente arbóreo, pero también el bosque ha sido intervenido en alguna medida por labores pecuarias que implican un cambio importante en el uso del suelo (Contreras-Santos *et al.* 2021). Por tanto, los resultados encontrados en la caracterización del componente leñoso de los SSP tienen similitud con los hallazgos de otras investigaciones (González 2003; Ruiz 2012; Pérez-Castellón *et al.* 2014). Dichas semejanzas se fundamentan en características propias de las especies observadas, pero también, como es de esperarse, por la naturaleza del sistema evaluado, a causa de la acción antrópica.

Lo encontrado sobre las Fabáceas, como la familia dominante en los SSP cubiertos en este trabajo, coincide con lo observado por González (2003) sobre los SSP como refugios de vida silvestre en el municipio de Estelí (Nicaragua), quien encontró que esta familia representaba el 45% de las especies registradas. También Ruiz (2012), analizando la composición florística de un bosque ripario en Condega, reportó que las Fabáceas eran la familia predominante con el 35.71% de las 28 especies observadas en 16 familias botánicas. Por otro lado, en un estudio realizado por Pérez-Castellón *et al.* (2014) en bosques riparios dentro de una microcuenca en el municipio de Pueblo Nuevo (Nicaragua), encontraron 31 especies arbóreas distribuidas en 21 familias botánicas, siendo las Fabáceas las más representativas (38% de las especies) y en menor medida, las Boragináceas.

Las Fabáceas son la familia botánica más diversa del mundo (Beech *et al.* 2017) y se encuentran creciendo en diferentes ambientes y climas (Rahman y Parvin 2015). Esto incluye ecosistemas áridos y semiáridos, por lo cual la mayoría de estas especies disponen de adaptaciones

morfofisiológicas que les permiten enfrentar con mayor solvencia el estrés hídrico (Bianco y Cenzano 2018).

Gei *et al.* (2018), analizando 42 cronosecuencias de bosques secundarios neotropicales, señalan dos rasgos funcionales como responsables del éxito en la abundancia de las leguminosas en condiciones de sequía estacional y en climas áridos: la disposición de hojas compuestas (bipinnadas) y su capacidad de fijar nitrógeno. Los folíolos pequeños permiten la regulación de la temperatura y la conservación del agua. La fijación de nitrógeno contribuye a la aclimatación fotosintética, mejora la eficiencia en el uso del agua, y puede satisfacer la demanda de nitrógeno después de la caída de las hojas viejas y el retoño de las nuevas. Entre las especies más abundantes de este estudio que poseen dichos atributos se encuentran *Gliricidia sepium* Jacq. *E. cyclocarpum*, *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth y *Albizia saman* (Jacq.) Merr (Martín-Alonso *et al.* 2021)

La versatilidad ecológica de las Fabáceas es importante para el desarrollo de los SSP presentes en el territorio en que se realizó el estudio. En pastizales de clima cálido la disponibilidad de nitrógeno es limitada (Vendramini *et al.* 2014), pero las leguminosas suministran este elemento a las pasturas a través de su fijación biológica (Nyfeler *et al.* 2011; Schmiedgen *et al.* 2022). Esto es más factible en SSP como el de árboles dispersos en potreros, donde existe una mayor interacción del pasto con el componente arbóreo. Esto sugiere la necesidad de aumentar la cobertura arbórea por medio de la regeneración natural en aquellas pasturas mejoradas donde su densidad es baja (Esquivel *et al.* 2008), pero hasta cierto límite, por los efectos adversos que puede ejercer el exceso de sombra en altas densidades de copa de los árboles (Villanueva *et al.* 2008). Por otro lado, el hecho que *M. maximus* cv. Mombasa es un pasto más tolerante a la sombra que las especies seminaturales (Malaviya 2020), permitiría aumentar la multifuncionalidad de los SSP.

Además del efecto que tienen las ventajas adaptativas de esta familia botánica, la diversidad específica de las UM también ha sido moldeada por la conjugación de los objetivos productivos de los ganaderos con las acciones técnicas promovidas por las iniciativas de desarrollo ambiental y socioeconómico en el territorio.

En este sentido, Ruiz (2012) y Pérez-Castellón *et al.* (2014), se aproximan en sus estimaciones de H' para reportar niveles de diversidad muy bajos: $DAP > 10.0$ cm = 1.923 y 1.977, respectivamente. Ambos estudios identificaron las partes de la microcuenca donde existía actividad agropecuaria, como las áreas de menor diversidad alfa. Esto se refleja en el estado de los diseños de SSP analizados, los cuales se ubican en la parte muy baja en la escala de H' (Baliton *et al.* 2020; Coracero y Malabrigo 2020) y baja en la escala de D_{mg} (Apri Heri *et al.* 2021).

Al respecto, en este estudio se encontró que el 91.85% de los individuos de *C. velutina* se encuentran establecidos en cercas vivas; y de este porcentaje, el 76.92% corresponden a una sola cerca viva simple, que cumple el propósito de producir leña, madera y postes. El caso de *Bursera simaruba* L. (Sarg) es similar: 95.83% de sus ejemplares se encuentran en cercas vivas, y el 77.08% de esta se ubica en una sola cerca viva simple para obtener material vegetal reproductivo (estacones).

Este fenómeno de pocas especies representando a la mayoría de los individuos, y patrones de riqueza específica relacionados a las condiciones edafoclimáticas y las preferencias de los

productores, también ha sido reportado por Ibrahim *et al.* (2006) en otras zonas de América Central.

Sin embargo, esas acciones de manejo también inciden positivamente en los ADP. Las prácticas de regeneración natural en estos diseños son realizadas por los ganaderos desde hace ya algún tiempo. Esto se puede evidenciar en la presencia de especies con $DAP < 9.99$ cm en los potreros, y la mayor abundancia de los individuos en la clase diamétrica 10.0 – 19.9 cm con disminución progresiva hacia los mayores diámetros. Este comportamiento de las clases diamétricas a partir de $DAP \geq 10.0$ cm, conocido como de “J invertida”, se asemeja al de los bosques en proceso de recuperación (Aguirre *et al.* 2017), lo cual es común en los bosques tropicales y significa que su desarrollo se dirige a etapas más productivas (Aguirre *et al.* 2021). Taylor y Halpern (1991) afirman que esto significa un reclutamiento garantizado, y por tanto, la regeneración de la población como estrategia orientada a la sostenibilidad de la cobertura arbórea.

En términos de estructura horizontal, esta investigación se corresponde con dos estudios en que se reportó a *A. amorphoides* y *G. ulmifolia* entre las de mayor peso ecológico en las UM. Con Pérez-Castellón *et al.* (2014) se coincide en la identificación de *A. amorphoides* entre las especies más abundantes (34.78 árboles ha^{-1}); mientras que con Ruiz (2012) se difiere en que él reportó a *G. ulmifolia* entre las más frecuentes, pero esa especie en esta investigación se caracterizó más por su dominancia. Por otro lado, Talavera (2012), calificó a *K. calderonii* entre las especies ecológicamente más importante por su frecuencia en el municipio de La Trinidad (Nicaragua), el cual se ubica en la misma zona en que se desarrolló este estudio.

La estructura vertical del componente leñoso no se ha reportado en otras investigaciones desarrolladas en la zona. Su valor de $A_{rel} = 61.12\%$ significa una diversidad estructural media en los estratos de altura, ya que los valores de A_{rel} cercanos a 100 % implican que todas las especies se distribuyen equitativamente en los tres estratos de altura. Este resultado se explica porque la gran mayoría de individuos se encuentran en los estratos intermedio e inferior (Dávila-Lara *et al.* 2019). Básicamente, en esta distribución influyó la presencia de regeneración natural ($DAP < 10.0$ cm) y el establecimiento de estacones (prenderizos) en las cercas vivas.

La sombra que genera la estructura vertical y horizontal del componente leñoso afecta la productividad y la calidad de las pasturas; generalmente de forma negativa en el caso de la primera y en forma positiva en el caso de la segunda (Obispo *et al.* 2013). Sin embargo, para mantener o mejorar la productividad del ganado en las condiciones de sabana tropical, donde el estrés calórico permanente ocasionado por el clima repercute negativamente en sus aspectos productivos y reproductivos (Córdova *et al.* 2005), es necesaria la presencia del componente leñoso que implican los SSP.

En todo caso, el manejo adecuado de la biomasa aérea de este componente es determinante para lograr un mejor aprovechamiento del espacio productivo vertical, que permiten los SSP y que contribuye a su perdurabilidad en el tiempo, sin que haya perjuicio de la productividad de biomasa de la pastura.

5. CONCLUSIONES

Las Fabáceas son la familia dominante en los sistemas silvopastoriles estudiados. Esto representa una oportunidad para mejorar la alimentación del ganado en dichos sistemas productivos, pero también de contribuir a la restauración ecológica de los mismos.

La antropización del paisaje, provocado por la implementación de sistemas productivos ganaderos, deriva en bajos índices de diversidad y de riqueza de especies forestales. Sin embargo, la presencia de especies de pastos tolerantes a la sombra facilita la mejoría de estos índices, al permitir la conservación y la regeneración natural de elementos forestales en los potreros.

El componente leñoso de los SSP estudiados es relativamente joven y su diversidad está claramente definida por los objetivos productivos y económicos de los ganaderos.

6. RECOMENDACIONES

Continuar la realización de estudios de caracterización del componente leñoso de los SSP en el bosque tropical seco, para evidenciar el estado de estos y disponer de argumentos sólidos en la toma de decisiones técnicas de carácter territorial para el mediano y largo plazo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, Z; Reyes, B; Quizhpe, W; Cabrera, A. 2017. Composición florística, estructura y endemismo del componente leñoso de un bosque montano en el sur del Ecuador (en línea). *Arnaldoa*. 24(2):543-556. Consultado 07 jun. 2023. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/506>
- Aguirre, Z; Cango, L; Quizhpe, W. 2021. Composición florística, estructura y endemismo del componente leñoso del bosque Huashapamba, Loja, Ecuador (en línea). *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 9(1):1-16. Consultado 09 jun. 2023. Disponible en: <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/670>
- Alanís-Rodríguez, E; Rubio-Camacho, E; Canizales-Velázquez, P; Mora-Olivo, A; Pequeño-Ledezma, M; Buendía, E. 2020. Estructura y diversidad de un bosque de galería en el noreste de México (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 11(58):134-153. Consultado 07 jun. 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339579004_Estructura_y_diversidad_de_un_bosque_de_galeria_en_el_noreste_de_Mexico
- Alroy, J. 2017. Effects of habitat disturbance on tropical forest biodiversity (en línea). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114(23):6056–6061. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1611855114>
- Apri Heri, I; Rachmat, H; Elfiati, D; Slamet, B; Susilowati, A; Rangkuti, A; Harahap, M. 2021. Maintaining tree biodiversity in urban communities on the university campus (en línea). *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 22(5):2839-2847. Consultado 08 jun. 2023. Disponible en: <https://smujo.id/biodiv/article/view/7675/4818>
- Austin, KG; Baker, JS; Sohngen, BL; Wade, CM; Daigneault, A; Ohrel, SB; Ragnauth, S; Bean, A. 2020. The economic costs of planting, preserving, and managing the world's forests to mitigate climate change (en línea). *Nature Communications*. 11(1):5946. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-19578-z>
- Baliton, R; Landicho, L; Cabahug, R; Paelmo, R; Laruan, K; Rodriguez, R; Visco, R; Castillo, A. 2020. Ecological services of agroforestry systems in selected upland farming communities in the Philippines (en línea). *Biodiversitas*. 21(2):707-717. Consultado 08 jun. 2023. Disponible en: <https://smujo.id/biodiv/article/view/4509>
- Beech, E; Rivers, M; Oldfield, S; Smith, P. 2017. GlobalTreeSearch: The first complete global database of tree species and country distributions (en línea). *Journal of Sustainable Forestry*. 36(5):454-489. Consultado 09 jun. 2023. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10549811.2017.1310049>
- Bianco, L; Cenzano, A. 2018. Leguminosas nativas: estrategias adaptativas y capacidad para la fijación biológica de nitrógeno. Implicancia ecológica (en línea). *Idesia*. 36(4):1-10. Consultado 09 jun. 2023. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292018000400071

- Canizales-Velázquez, P; García-García, S; Holguín-Estrada, V; Collantes-Chávez-Costa, A. 2021. Estructura y diversidad arbórea de un bosque de galería urbano en el río Camachito, Noreste de México (en línea). *Polibotánica*. 51(-):91-105. Consultado 06 jun. 2023. Disponible en: <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/898/1155>
- Cheng, M; McCarl, B; Fei, C. 2022. Climate Change and Livestock Production: A Literature Review (en línea). *Atmosphere*. 13(1):140. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/1/140>
- Contreras-Santos, J; Martínez-Atencia, J; Raghavan, B; López-Rebolledo, L; Garrido-Pineda, J. 2021. Sistemas silvopastoriles: mitigación de gases de efecto invernadero, bosque seco tropical – Colombia (en línea). *Agronomía Mesoamericana*. 32(3):901-919. Consultado 06 oct. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v32n3/2215-3608-am-32-03-00901.pdf>
- Coracero, E; Malabrigo Jr., P. 2020. Diversity assessment of tree species in sitio Dicasalarin, Barangay Zabali, Baler, Aurora, Philippines (en línea). *Open Journal of Ecology*. 10(-):717-728. Consultado 06 jun. 2023. Disponible en: https://www.scirp.org/pdf/oje_2020111014113706.pdf
- Córdova, A; Rodríguez, G; Córdova, M; Córdova, C; Pérez, J. 2005. Ganancia diaria y peso al destete en terneros de cruces *Bos taurus* con *Bos indicus* en trópico húmedo (en línea). *Revista MVZ Córdoba*. 10(1):589-592. Consultado 17 sep. 2023. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/mvz/v10n1/v10n1a09.pdf>
- Cuartas, CA; Naranjo, JF; Tarazona, AM; Murgueitio, E; Chará, JD; Ku Vera, J; Solorio, FJ; Flores, MX; Solorio, B; Barahona, R. 2014. Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change (en línea). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 27(2):76-94. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902014000200003
- Dávila-Lara, M; Aguirre-Calderón, O; Jurado-Ybarra, E; Treviño-Garza, E; González-Tagle, M; Trincado, G. 2019. Estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques templados de San Luis Potosí, México (en línea). *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 6(18):399-409. Consultado 09 jun. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3586/358662621001/html/#B16>
- Esquivel, MJ; Harvey, CA; Finegan, B; Casanoves, F; Skarpe, C. 2008. Effects of pasture management on the natural regeneration of neotropical trees (en línea). *Journal of Applied Ecology*. 45(1):371-380. Consultado 16 oct. 2023. Disponible en: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1365-2664.2007.01411.x>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ca9825en/ca9825en.pdf>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2022. FRA 2020 Remote Sensing Survey. FAO Forestry Paper No. 186. Rome. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cb9970en/cb9970en.pdf>
- Gei, M; Rozendaal, DMA; Poorter, L; Bongers, F; Spreti, JI; Garner, MD; Aide, TM; Andrade, JL; Balvanera, P; Becknell, JM; Brancalion, PHS; Cabral, GAL; César, RG; Chazdon, RL; Cole, RJ; Colletta, GD; de Jong, B; Denslow, JS; Dent, DH; DeWalt, SJ; Dupuy, JM; Durán, SM; do Espírito Santo, MM; Fernandes, GW; Nunes, YRF; Finegan, B; Moser, VG; Hall, JS; Hernández-Stefanoni, JL; Junqueira, AB; Kennard, D; Lebrija-Trejos, E; Letcher, SG; Lohbeck, M; Marín-Spiotta, E; Martínez-Ramos, M; Meave, JA; Menge, DNL; Mora, F; Muñoz, R; Muscarella, R; Ochoa-Gaona, S; Orihuela-Belmonte, E; Ostertag, R; Peña-Claros, M; Pérez-García, EA; Piotta, D; Reich, PB; Reyes-García, C; Rodríguez-Velázquez, J; Romero-Pérez, IE; Sanaphre-Villanueva, L; Sanchez-Azofeifa, A; Schwartz, NB; de Almeida, AS; Almeida-Cortez, JS; Silver, W; de Souza Moreno, V; Sullivan, BW; Swenson, NG; Uriarte, M; van Breugel, M; van der Wal, H; Veloso, DM; Vester, HFM; Vieira, ICG; Zimmerman, JK; Powers, JS. 2018. Legume abundance along successional and rainfall gradients in Neotropical forests (en línea). *Nature Ecology & Evolution*. (2):1104-1111. Consultado 20 may. 2023. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0559-6>
- González, N. 2003. Dos sistemas silvopastoriles como refugio de vida silvestre en el municipio de Estelí (en línea). Tesis MSc. León, Nicaragua. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-León). Consultado 20 may. 2023. Disponible en: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/484>
- Hammer, Ø.; Harper, DAT; Ryan, P. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis (en línea). *Palaeontologia Electronica*. 4(1):1-9. Consultado 20 may. 2023. Disponible en: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Holdridge, L. 1978. Ecología basa en zonas de vida (en línea). Consultado 30 may. 2023. San José, Costa Rica. 216 p. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7936/BVE19040225e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ibrahim, M; Villanueva, C; Casasola, F; Rojas, J. 2006. Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y restauración de la integridad ecológica de paisajes ganaderos (en línea). *Pastos y Forrajes*. 29(4):383-419. Consultado 10 jun. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269121676004.pdf>
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). 2005. Atlas climático de Nicaragua. Managua, Nicaragua (en línea). Consultado 16 may. 2023. Disponible en: <https://webserver2.ineter.gob.ni/mapas/Nicaragua/clima/atlas/index.html>
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). 2021. 1^{er} Atlas nacional de suelos de la República de Nicaragua 2021 (en línea). Consultado 24 may. 2023. Disponible en: <https://www.ineter.gob.ni/flipatlassuelo-Ord/publicacionflip/atlassuelo.html>

- Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE); Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). 2013 a. IV Censo Nacional Agropecuario. Departamento de Estelí y sus municipios: uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario (en línea). Managua, Nicaragua. 52 p. Consultado 29 may. 2023. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/38160371/esteli-magfor>
- Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE); Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). 2013 b. IV Censo Nacional Agropecuario. Departamento de Madriz y sus municipios: uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario (en línea). Managua, Nicaragua. 71 p. Consultado 29 may. 2023. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/46823639/departamento-de-madriz-y-sus-municipios-magfor>
- Malaviya, D; Baig, M; Kumar, B; Kaushal, P. 2020. Effects of shade on guinea grass genotypes *Megathyrsus maximus* (Poales: Poaceae) (en línea). *Revista de Biología Tropical*. 68(2):563-572. Consultado 07 may. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v68n2/0034-7744-rbt-68-02-563.pdf>
- Martín-Alonso, G; Bustamante-González, C; Varela-Nualles, M; Pérez-Díaz, A; Viñals-Núñez, R; Delgado-Álvarez, A; Fundora-Sánchez; L. 2021. Cuantificación de la fijación biológica del nitrógeno en árboles de sombra de dos cafetales de Cuba (en línea). *Cultivos Tropicales*. 42(2):e05. Consultado 01 nov. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1932/193268052005/html/>
- Neary, DG; Ice, DG; Jackson, CR. 2009. Linkages between forest soils and water quality and quantity (en línea). *Forest Ecology and Management*. 258(10):2269-2281. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112709003557>
- Ni, R; Baiketuerhan YC; Zhang, C; Zhao, X; Gadow, KV. 2014. Analysing structural diversity in two temperate forests in northeastern China (en línea). *Forest Ecology and Management*. 316(1):139-147. Consultado 04 nov. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112713006798>
- Nyfelner, D; Huguenin-Elie, O; Suter, M; Frossard, E; Lüscher, A. 2011. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 140(1-2):155-163. Consultado 11 jun. 2023. Disponible en: [Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167636911001000)
- Obispo, N; Espinoza, Y; Gil, J; Ovalles, F; Cabrera, E; Pérez, M. 2013. Relación de la proporción de sombra en el potrero con el rendimiento, calidad del forraje y ganancia diaria de peso en novillos (en línea). *Revista Científica*. 23(6):531-536. Consultado 16 sep. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/959/95928830010.pdf>

- Pérez-Castellón, E; Bonilla-Zúñiga, G; Díaz-Rivera, E. 2014. Composición florística del bosque ripario en la microcuenca La Laguneta, municipio de Pueblo Nuevo, Estelí (en línea). La Calera. Revista científica. 14(23):84-88. Consultado 20 may. 2023. Disponible en: <https://lcalera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/213/213>
- Pretzsch, H. 2009. Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model (en línea). Springer-Verlag. Heidelberg, Germany. 664 p. Consultado 07 jun. 2023. Disponible en: https://www.agrifs.ir/sites/default/files/Forest%20Dynamics%2C%20Growth%20and%20Yield%2C%20From%20Measurement%20to%20Model%20%7BHans%20Pretzsch%20-%202009%29_0.pdf
- Rahman, A; Parvin, M. 2015. Taxonomic studies on the family Fabaceae (Weeds) at Rajshahi University Campus (en línea). Plant. 3(3):20-25. Consultado 09 jun. 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/288832567_Taxonomic_Studies_on_the_Family_Fabaceae_Weeds_at_Rajshahi_University_Campus
- Ruiz, V; Savé, R; Lanuza, O; Herrera, A; Benavidez, K; Rodríguez, J. 2021. Evolución de la temperatura y precipitación en cuatro estaciones meteorológicas, ubicadas en la región Norcentral de Nicaragua, Centroamérica (en línea). Revista Científica de FAREM-Estelí Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano. 10(38):197-212. Consultado 16 may. 2023. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8845388>
- Ruiz, M. 2012. Estudio florístico del estado actual del bosque ripario en la microcuenca el Coyote, Condega, Estelí (en línea). Tesis Ing. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional Agraria (UNA). 39 p. Consultado 19 may. 2023. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/1166/1/tnk10r934f.pdf>
- Schmiedgen, A; Komainda, M; Kayser, M; Tonn, B; Isselstein, J. 2022. Trees in silvopastoral systems reduce legume proportion with no consequence for internal N resorption efficiency (en línea). Journal of Plant Ecology. 16(3):1-14. Consultado 11 jun. 2023. Disponible en: <https://academic.oup.com/jpe/article/16/3/rtac090/6775164>
- Solorio, S; Wright, J; Franco, M; Basu, S; Sarabia, S; Ramírez, L; Ku-Vera, J. 2017. Silvopastoral systems: Best agroecological practice for resilient production systems under dryland and drought conditions (en línea). In: Ahmed M., Stockle C. (eds) Quantification of Climate Variability, Adaptation and Mitigation for Agricultural Sustainability. Springer, Cham. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32059-5_11
- Talavera, Z. 2012. Estudio florístico del estado actual del bosque de galería en la microcuenca Tomabú, en el municipio La Trinidad, Estelí, Nicaragua (en línea). Tesis Ing. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional Agraria (UNA). 46 p Consultado 09 jun. 2023. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/1165/1/tnk10t137.pdf>
- Taylor, AH; Halpern, CB. 1991. The structure and dynamics of *Abies magnifica* forests in the southern Cascade Range, USA (en línea). Journal of Vegetation Science. 2(2):189-200. Consultado 07 oct. 2023. Disponible en: <https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/Iter/pubs/pdf/pub1189.pdf>

- Vendramini, J; Dubeux, Jr, J; Silveria, M. 2014. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems (en línea). Revista Brasileira de Ciências Agrárias. 9(2):308-315. Consultado 13 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119031262025.pdf>
- Villanueva, C; Ibrahim, M; Ríos, J; Suarez, J. 2008. Disponibilidad de *Brachiaria brizantha* en potreros con diferentes niveles de cobertura arbórea en el trópico subhúmedo de Costa Rica (en línea). Zootecnia Tropical. 26(3):293-296. Consultado 04 nov. 2023. Disponible en: <http://ve.scielo.org/pdf/zt/v26n3/art29.pdf>

ARTÍCULO 2. Productividad de pastos en los sistemas silvopastoriles en el Corredor Seco del Norte de Nicaragua: II. Componente herbáceo.

RESUMEN

Las especies predominantes de pasto en los sistemas silvopastoriles en el Corredor Seco del Norte de Nicaragua fueron *M. maximus* (mejorada) y *Cynodon dactylon* L. Pers (seminatural), reportándose diferencias ($p < 0.05$) en la disponibilidad promedio de biomasa entre ambas especies en la estación seca, con $9.08 (\pm 1.08)$ ton MS ha⁻¹ para *M. maximus* y $1.59 (\pm 1.28)$ ton MS ha⁻¹ para *C. dactylon*, pero no hubo diferencias ($p > 0.05$) en los parámetros nutricionales entre ambos tipos de pasto, salvo %PC en Mombasa cuando la muestra provino de un diseño de árboles dispersos en potreros (ADP) (6.8 ± 0.48) en lugar de un diseño de cercas vivas (CV) (5.13 ± 0.61). Las pasturas mejoradas de *M. maximus*, simuladas bajo un régimen de pastoreo adecuado, tienen el potencial de incrementar la productividad del ganado de engorde hasta en tres veces más en la ganancia de peso por animal, que las pasturas seminaturales. Con las pasturas de *M. maximus* era posible mantener 4.0 UA ha⁻¹ y producir 415.9 kg GDP ha⁻¹ en 10 meses de ceba. Las predicciones de biomasa en función de los índices de vegetación (IV) obtenidos con imágenes satelitales presentaron relaciones lineales y potenciales positivas, pero de baja predictividad (R^2): NDVI (0.17 – 0.16), EVI (0.17 – 0.18) y SAVI (0.16 – 0.16), mientras que con IV_{green} presentaron un mejor R^2 (0.50-0.56). De forma general, el PCA contribuyó a la productividad de los SSP con mayor aporte de biomasa que garantiza los requerimientos energéticos y proteicos del ganado, pero este puede ser aún mayor si se aprovecha en el momento oportuno. Establecer Mombasa en ADP ayuda a obtener pastos de mejor calidad. La heterogeneidad en el crecimiento y desarrollo de pasturas afectó negativamente el uso de IV como predictores del rendimiento de pasto.

Palabras clave: Disponibilidad, calidad nutritiva, época seca, *Megathyrus maximus* Jacq. cv. Mombasa, sensor remoto, sensor proximal, cámara RGB, teléfono inteligente, LIFE-SIM.

ARTICLE 2. Grass productivity in Silvopastorals Systems in the Dry Corridor in the Northern Nicaragua: II. Herbaceous component.

ABSTRACT

Megathyrus maximus (improved) and *Cynodon dactylon* L. Pers (seminatural), were the predominant pasture species in the silvopastoral systems practiced in the Dry Corridor of Northern Nicaragua, reporting differences ($p < 0.05$) in the average biomass availability between both species in the dry season, with $9.08 (\pm 1.08)$ and $1.59 (\pm 1.28)$ ton DM ha⁻¹ for *M. maximus* and *C. dactylon*, respectively. Nonetheless, there were no differences ($p > 0.05$) between both pasture species in the nutritional parameters, except for the CP content in Mombasa, with higher values for the scattered trees in pastures (STP) system (6.8 ± 0.48) versus the live fencing (LF) system (5.13 ± 0.61). Based on simulation, *M. maximus* pastures, managed with an appropriate grazing regime, can potentially increase three times the live-weight gain of beef cattle, as compared to semi-natural pastures. *M. maximus* pastures could maintain 4.0 AU ha⁻¹ and produce 415.9 kg LWG ha⁻¹ in 10 months. Biomass predictions based on vegetation indexes (VIs) generated by satellite images showed positive linear relationships, but, with low prediction power (R^2): NDVI (0.17 – 0.16), EVI (0.17 – 0.18), and SAVI (0.16 – 0.16); whereas, predictions using IV_{green} , showed better R^2 (0.50-0.56). In general terms, the STP system contributes to the productivity of the SSP with a higher contribution of biomass that guarantees

covering the livestock's energy and protein requirements, but this can be even greater if used at the right moment. Establishing Mombasa in a STP system helps to obtain better quality pastures. The heterogeneity in pasture growth and development affected negatively the use of VIs as predictors of pasture yield.

Keywords: Availability, nutritional quality, dry season, Megathyrus maximus Jacq. cv. Mombasa, remote sensor, proximal sensor, RGB camera, smartphone, LIFE-SIM.

1. INTRODUCCIÓN

El 20% de la superficie terrestre es ocupada por ecosistemas de sabana tropical (De la Ossa-Lacayo *et al.* 2016). Estos abarcan el 65% de la superficie de África, el 60% de Australia y 250 millones de hectáreas en América Latina, las que tienen gran importancia actual y futura en la producción de alimentos y el desarrollo de la ganadería (Huntley y Walker 1982; CIAT-EMBRAPA 1999). Sin embargo, a nivel global, más de 250 millones de personas habitantes de estos territorios viven por debajo del umbral de la pobreza extrema (FAO 2018) y sufren de inseguridad alimentaria y nutricional, fenómenos que se encuentran íntimamente vinculados (Bjornlund *et al.* 2022). Estas personas requieren alternativas productivas para mejorar sus condiciones de vida.

En América Central este paisaje bioclimático y socioeconómico está representado por el Corredor Seco Centroamericano (CSC). El CSC es un territorio con una extensión superficial aproximada de 15,918,270 ha (Arias *et al.* 2012) vulnerable al cambio climático, donde habitan aproximadamente 11 millones de personas acorraladas por la pobreza, la inseguridad alimentaria y la emigración (Gotlieb *et al.* 2019). Aunado a ello, los sistemas ganaderos de pequeños productores basan la alimentación de sus bovinos en la utilización de pastos naturalizados de bajo rendimiento (García *et al.* 2019). Estos pastos, escasos y de baja calidad en la estación seca, se convierten en una limitante importante para mantener la producción y la productividad animal, lo que deriva en la baja rentabilidad de la ganadería centroamericana (Lemus *et al.* 2021).

Como alternativa a esta situación, CATIE (2018) propone la implementación de Sistemas Silvopastoriles (SSP) como estrategia para mejorar la alimentación del ganado vacuno, y a su vez lograr el incremento en la resiliencia de los sistemas productivos pecuarios. Estos sistemas son definidos por Pezo *et al.* (2018:10) como “opciones de producción ganadera que involucran plantas leñosas perennes multipropósito (árboles y arbustos) en combinación con especies herbáceas y especies animales, todos gestionados de manera integrada”.

Por lo antes mencionado, el Proyecto “Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la Cosecha de Agua en Nicaragua” (PCA) fomentó SSP en unidades productivas ganaderas del CSC. En estos SSP se utilizaron pasturas mejoradas de *Megathyrus maximus* Jacq. cv. Mombasa para incrementar la disponibilidad de alimento al ganado, principalmente en la estación seca, y por tanto, contribuir a mejorar la productividad bovina. Sin embargo, a pesar de su importancia, la contribución de este aporte tecnológico al territorio aún no se ha dimensionado en términos productivos presentes y futuros.

En razón de ello, esta investigación buscó determinar la contribución de las pasturas mejoradas de *M. maximus* a la productividad de los SSP implementados en el CSC, y por extensión de las condiciones climáticas a las ecorregiones de sabana tropical en el mundo. Para lo cual se propuso caracterizar los SSP, cuantificar la producción y calidad nutricional de la biomasa de pasturas mejoradas producidas en la época seca, estimar el potencial de contribución de éstas a la productividad animal, y evaluar métodos no destructivos para la estimación de la biomasa disponible de pasturas mejoradas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Ubicación y descripción del área de estudio.

Esta investigación se desarrolló en trece unidades productivas agropecuarias propiedad de pequeños y medianos ganaderos atendidos por el PCA, localizadas en comunidades de los municipios de Condega y Pueblo Nuevo, departamento de Estelí, Nicaragua (Figura A2-1).

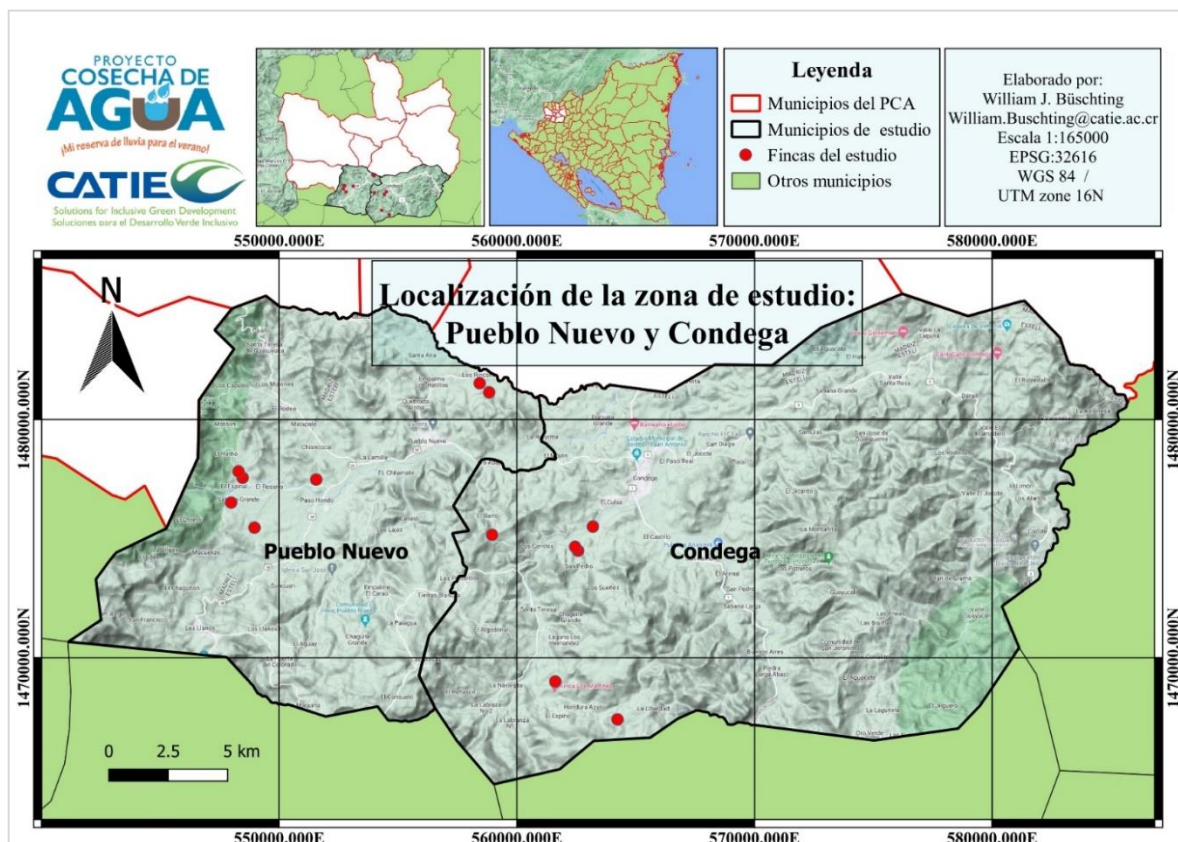


Figura A2- 1. Localización del área de estudio y de las unidades productivas participantes.

Los suelos de estos municipios se caracterizan por ser moderadamente profundos, de textura franco-arcillosa, ligeramente ácidos, con bajo porcentaje de materia orgánica, altamente degradados, relieve fuertemente ondulado a escarpado, bien drenados y erosión hídrica moderada a fuerte (INETER 2021).

El clima es tropical de sabana con precipitaciones entre 800-1,400 mm/año (estación seca de noviembre a abril), humedad relativa (HR) promedio entre 65-75% (INETER 2005), y temperaturas medias anuales de 24.6°C (Ruiz *et al.* 2021). De acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1978), esta zona se tipifica como Bosque Seco Tropical (BST). Las condiciones climáticas predominantes durante la etapa de campo del estudio se presentan en la Figura A2-2.

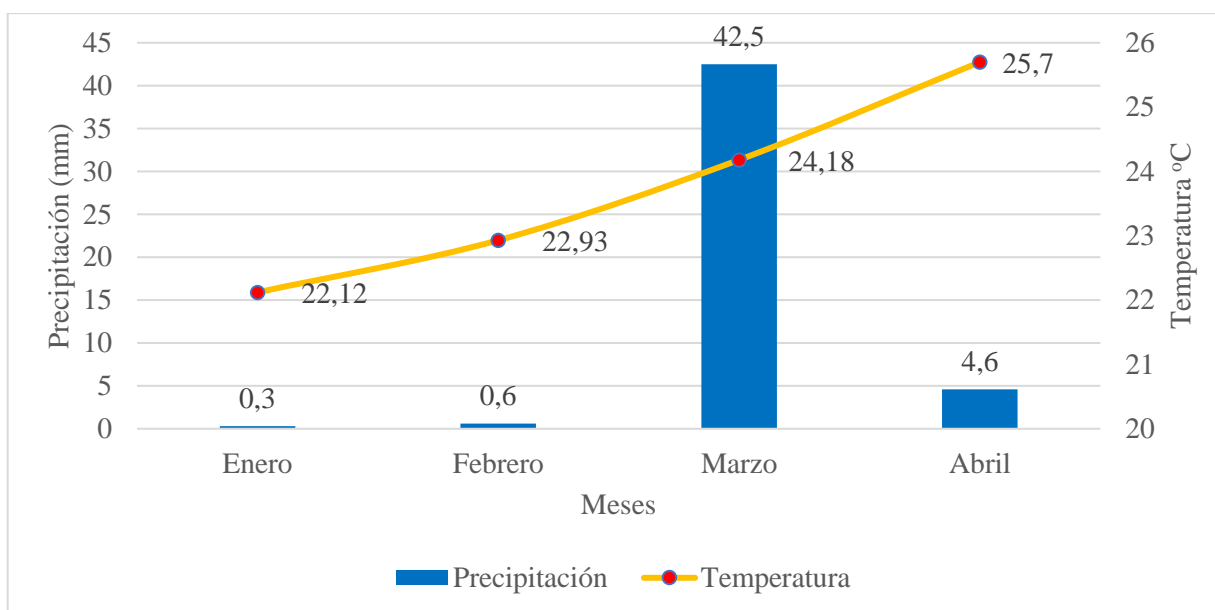


Figura A2- 2. Temperatura media y precipitación predominantes en el área de estudio durante el periodo de la toma de datos.

En los dos municipios cubiertos por este estudio, el 42.31% de la superficie reportada para el uso agropecuario se destina a la utilización en pasturas. Aproximadamente, 1/3 de las cabezas de ganado existentes en los diez municipios que atiende el PCA, se encuentran en las fincas de Pueblo Nuevo y Condega (INIDE 2013a; INIDE 2013b).

2.2. Toma de datos y análisis.

La etapa de campo se llevó a cabo en las fincas de productores ganaderos durante los meses de enero a abril de 2023 (época seca). Las unidades muestrales (UM) (ver Anexo 1) fueron seleccionadas a partir de un listado de 605 ganaderos atendidos por el PCA, quienes recibieron apoyo técnico para el desarrollo de sus SSP. Los criterios utilizados para la selección de las fincas fueron: que tuvieran un área de pasto mejorado sembrado con semillas facilitadas por el PCA, que el pasto estuviera intacto previo a su próxima utilización, condiciones biofísicas y de manejo similares a las pasturas seminaturales usadas como control, las que preferiblemente deberían estar en terreno contiguo y con topografía relativamente plana; y disposición del propietario para apoyar el estudio, facilitando permisos de acceso a la propiedad e información pertinente.

2.3. Cuantificación de la producción y la calidad nutricional de las pasturas mejoradas y seminaturales.

La cuantificación de la producción de biomasa de las pasturas mejoradas y las pasturas seminaturales se llevó a cabo utilizando el Método de Rango de Peso Seco, de Mannetje y Haydock de 1963, descrito por Pezo (2018a). Se emplearon cinco muestras reales (MR) y 60 muestras visuales (MV) por hectárea. El recorrido por los potreros bajo evaluación se realizó junto con el productor, tomando las MV de forma sistemática cada ocho metros y a una distancia de al menos tres metros de los cercos. Las MR se tomaron usando un marco cuadrado de 0.25 m², cortando a 5 cm de altura, y se pesaron por separado en campo con una balanza electrónica digital SF-400 de 10 kg de capacidad.

En las muestras de pasto colectadas se separó el material senescente del material verde, y sobre este último se determinó el porcentaje de materia seca (%MS) siguiendo el método del horno de microondas propuesto por Lacerda *et al.* (2008), y utilizando la siguiente ecuación:

$$\% M.S. = \left[\frac{\text{Peso Seco}}{\text{Peso Fresco}} \right] * 100$$

Al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria (Managua-Nicaragua) se remitieron 250 g de MS de cada especie de pasto y potrero muestreado: trece de *M. Maximus* y nueve de *C. dactylon* (cuatro productores no contaron con pasturas seminaturales de *C. dactylon*). A estas muestras se les realizó análisis bromatológicos para determinar el contenido de Proteína Cruda (PC,%) y de Fibra Detergente Ácido (FDA,%), usando los métodos oficiales de AOAC 2001.11 (Kjeldahl) y 973.18, respectivamente. La digestibilidad de la materia seca (DMD) fue estimada en el laboratorio a partir del valor de FDA mediante la ecuación evaluada por Tassone *et al.* (2022):

$$DMD = 88.9 - (0.779 * FDA)$$

Las variables se analizaron estadísticamente considerando un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). Para la variable de producción de biomasa (ton MS ha⁻¹) se realizó un análisis de varianza (ANOVA) usando modelos lineales generales y mixtos con el programa InfoStatP (Di Rienzo *et al.* 2019), teniendo el tipo de pastura como efecto fijo y a las fincas (bloque) como efecto aleatorio. Las variables PC, FDA y digestibilidad se analizaron con el software R 4.2 (R Core Team 2022) empleando un modelo lineal generalizado con distribución beta binomial y una función de enlace logit. Se ajustó esta función por los problemas de variabilidad (sobre dispersión).

2.4. Estimación de la contribución de los pastos mejorados a la productividad animal.

Para evaluar escenarios potenciales de estrategias de alimentación sobre la productividad animal, se utilizó el modelo de simulación para ganado de carne (BEEF v15.1) del software LIFE-SIM (León-Velarde *et al.* 2006). Los datos para crear los escenarios fueron obtenidos de entrevistas con los productores participantes del estudio, así como de investigaciones realizadas por universidades locales y por el CATIE en condiciones agroclimáticas similares al territorio objetivo.

El animal simulado fue un novillo de un año y 200 kg de peso inicial, con cruce racial ½ – ¾ de raza cebuina, que operaban en su zona climática de confort. La disponibilidad de pasto seminatural al ingreso de los animales a los potreros fue de 0.1 ton MS ha⁻¹ en la estación seca (noviembre -abril) y 0.45 ton MS ha⁻¹ en la estación lluviosa (mayo – octubre), mientras que en el pasto mejorado los valores correspondientes fueron de 0.7 ton MS ha⁻¹ en la estación seca y 3.0 ton MS ha⁻¹ en la estación lluviosa. Los valores de digestibilidad (60% en estación seca y 62% en estación lluviosa) y PC (10% en época seca y 12% en época lluviosa), fueron los mismos para ambos tipos de pastura. El tiempo de ceba correspondió a diez meses contados a partir de enero a octubre. Para la pastura mejorada se utilizó cargas animales desde 1.26 hasta 4.5 UA ha⁻¹, mientras que en pasturas seminaturales solamente se utilizó 1.26 UA. No se incluyeron datos de suplementación.

2.5. Evaluación de sensores remotos y proximales para la estimación de biomasa en las pasturas.

Para la evaluación del sensor remoto, las imágenes satelitales de cada pastura mejorada se obtuvieron de la plataforma de procesamiento geoespacial denominada Google Earth Engine (GEE). GEE se ha convertido en una poderosa herramienta para el análisis de procesos terrestres y ambientales (Pham-Duc *et al.* 2023), estando el estudio de la cobertura del suelo y la agricultura entre sus campos de aplicación más frecuentes (Pérez-Cutillas *et al.* 2023).

GEE proporciona productos listos para usar, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (Kumar y Mutanga 2018). Estos índices, así como el Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (IVAS), se calcularon en el Editor de Código de GEE, basado en las siguientes ecuaciones (Liu y Huete 1995; Jiang *et al.* 2008):

$$NDVI = \frac{N - R}{N + R}$$

$$EVI = G * \frac{N - R}{N + R_{C1} - B_{C2} + L_d}$$

$$SAVI = \frac{(N - R)}{(N + R + L_s)} * (1 + L_s)$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

EVI: Índice de Vegetación Mejorado

SAVI: Índice de Vegetación Ajustada al Suelo

N, R, B: Reflectancias superficiales corregidas atmosféricamente en las bandas del infrarrojo cercano, el rojo y el azul del espectro electromagnético, respectivamente

G: Factor de ganancia (2.5)

C1 y C2: Coeficientes para corregir la influencia de los aerosoles en las bandas R y B, con valores de 6 y 7.5, respectivamente.

L_d: Factor de ajuste del dosel con valor de 1.

L_s: Factor de ajuste del suelo con valor de 0.5.

Se empleó la colección de imágenes provenientes de Sentinel 2SR, las cuales son cada vez más utilizadas (Pérez-Cutillas *et al.* 2023). A estas imágenes, con resolución espacial de 10 m por pixel, se les aplicó la función para el enmascaramiento de nubes, se filtraron por fecha (01/01/2023 – 28/02/2023) y porcentaje de nubosidad (20%), y se redujeron a un solo mosaico. Cada imagen fue cortada a nivel de un área céntrica (libre de árboles) en la pastura mejorada muestreada, y se descargó conteniendo los índices de vegetación calculados en GEE.

Las medias de estos índices se extrajeron con SNAP y fueron sometidas a la validación cruzada de los modelos estadísticos de regresión lineal y potencial, así como a las métricas utilizadas en el análisis de las imágenes de sensores proximales, que se describen para sensores proximales. Además, se calibró un modelo general de cada tipo de regresión mencionada.

En cuanto a la evaluación del sensor proximal, se fotografiaron, en plano cenital sobre un área de 0.25 m² a una altura de 1.60 m del suelo, todas las muestras reales y visuales de los pastos, tomadas con el método del Doble Muestreo. El equipo utilizado fue un teléfono celular (sensor proximal) Xiaomi Redmi Note Pro11 equipado con cámara de 108 megapíxeles f/1.9. Cuando la pastura estuvo muy alta, se utilizó un *selfiestick*, que elevó el sensor proximal a 3.0 m del suelo. Las fotografías se extrajeron del celular y se almacenaron en formato .JPG.

Posteriormente, a las áreas de interés (0.25 m²) de cada una de las fotografías de pasto mejorado se le practicaron cálculos del Índice de Diferencia Verde-Rojo Normalizado (VI_{green}), propuesto por Gitelson *et al.* (2002) (Costa *et al.* 2020):

$$VI_{green} = \frac{R_{green} - R_{red}}{R_{green} + R_{red}}$$

Donde:

VI_{green} : Índice de Diferencia Verde-Rojo Normalizado
 R_{green} : Reflectancia en la banda verde del espectro electromagnético
 R_{red} : Reflectancia en la banda roja del espectro electromagnético

Para esto, se empleó la herramienta *Band Maths* del menú *Ráster* en el software libre SNAP v.9.0.0². Este procedimiento también se realizó con la calculadora *ráster* del software libre QGIS 3.28³.

Con los VI_{green} de las MR y sus respectivos pesos de MS se realizó una validación cruzada (Brown 2000). En esta validación, una muestra de seis pasturas sirvió para calibrar un modelo estadístico de regresión lineal simple, y otro no lineal potencial (Zorogastúa-Cruz *et al.* 2012):

$$Y = B_0 + B_1(X)$$

Donde:

Y : Materia verde seca
 B_0 : Intercepción
 B_1 : Pendiente
 X : VI_{green}

$$Y = \alpha X^\beta$$

Dónde:

Y : Materia verde seca
 α : Coeficiente a calcular
 β : Coeficiente a calcular
 X : VI_{green}

La otra muestra, también de seis pasturas, se utilizó para validar dichos modelos. Ambos modelos de regresión fueron sometidos a métricas adecuadas para evaluar la precisión de su predicción, recomendadas por Willmott (1982), Condori *et al.* (2010) y Quiroz *et al.* (2017):

Donde:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{N}$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}} * 100$$

Donde:

MAE : Error Medio Absoluto (ton ha⁻¹)
 $RRMSE$: Raíz Relativa del Error Cuadrado Medio
 S_i : Rendimiento simulado
 N : Número de casos

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}}$$

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - x_i)^2}$$

$RMSE$: Raíz del Error Cuadrado Medio (ton ha⁻¹)
 $Nash$: Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe
 O_i : Rendimiento observado (doble muestreo)
 x_i : Media observada en el rendimiento

² European Space Agency. 2022. SeNtinel Applications Platform (SNAP). <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

³ <https://www.qgis.org/es/site/>

Cabe mencionar que, de las 13 pasturas mejoradas una pastura fue excluida del análisis por presentar datos de MS (ton ha⁻¹) 6.47 veces mayor al promedio de las otras 12 muestras.

También se construyeron modelos de ambos tipos de regresión para cada pastura mejorada en particular. Como referencia de un potrero agrónomicamente bien manejado y con cobertura total, en junio del 2023 la evaluación del sensor proximal también se realizó en 0.57 ha de pastura de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst, localizada en la Finca de Lechería del CATIE.

3. RESULTADOS

3.1. Disponibilidad y calidad nutricional de las pasturas mejoradas y seminaturales.

3.1.1. Producción de biomasa y composición botánica.

El único pasto mejorado disponible en las UM del estudio fue *Megathyrsus maximus* Jacq. cv. Mombasa, y en el caso de las pasturas seminaturales, *Cynodon dactylon* (L.) Pers. fue la gramínea dominante. Las áreas de pastura mejorada muestreada comprendieron desde 0.17 hasta 1.52 ha (7.52 ha en total), mientras las áreas de pasto seminatural fueron desde 0.19 hasta 1.65 ha (4.83 ha en total).

La disponibilidad de forraje observada (ton MS ha⁻¹) de ambos tipos de pasturas por cada productor se presenta en la Figura A2-3. Cabe mencionar, que de las 13 pasturas mejoradas una (No. 13) fue excluida del análisis de disponibilidad por presentar datos (ton MS ha⁻¹) fuera de lo normal.

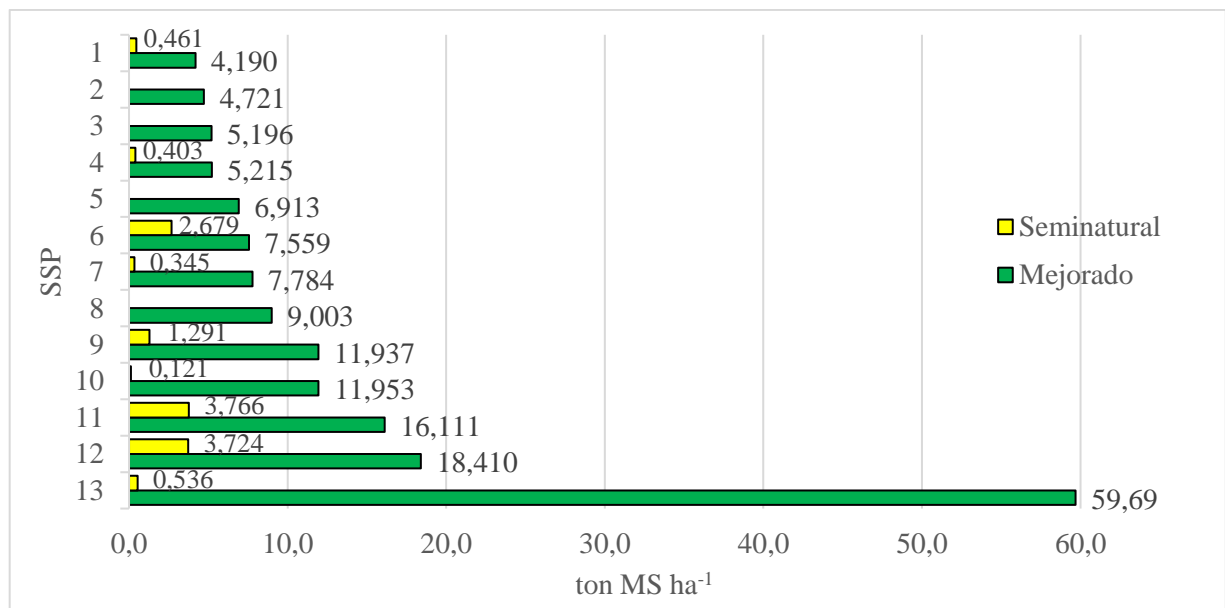


Figura A2- 3. Producción de biomasa de las pasturas mejoradas y seminaturales en cada UM.

La disponibilidad de forraje difirió ($p < 0.05$) entre ambos tipos de pasturas, con una variabilidad importante entre fincas; en cambio no fue afectada por el tipo de diseño del SSP (9.05 y 9.13 ton MS ha⁻¹ para ADP y para CV). Cabe destacar que la producción más baja de *M. maximus* es mayor que la más alta observada en *C. dactylon*. Con las cantidades de MS estimadas en ambas

pasturas, cada productor puede alimentar durante toda la estación seca (180 días) un número variable de cabezas de ganado de acuerdo con el peso vivo de éste, tal como se presenta en la Figura A2-4.

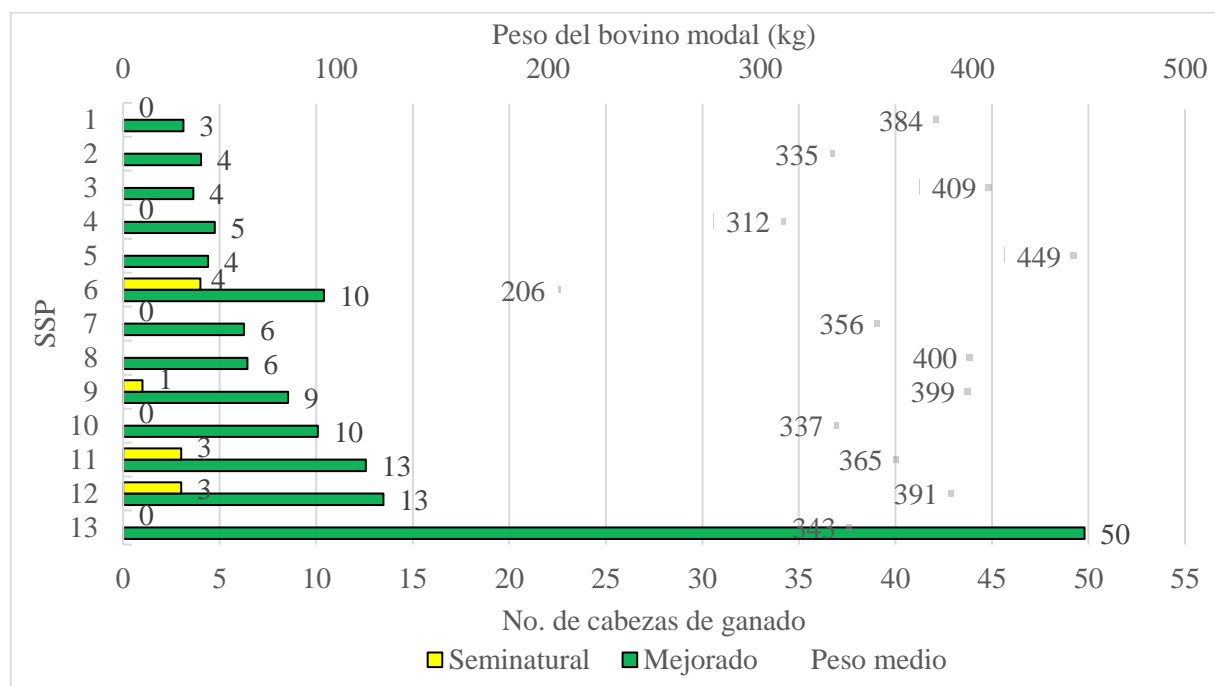


Figura A2- 4. Número de cabezas de ganado capaces de sostenerse con la disponibilidad de MS estimada en pasturas mejoradas y seminaturales por cada UM.

En general, *M. maximus* confiere a cada ganadero una mayor capacidad de manutención de su hato en comparación a la oferta de pasto por parte de *C. dactylon*. De hecho, se observan pasturas seminaturales que no disponen de MS suficiente para siquiera alimentar una cabeza de ganado en este periodo. La producción media de cada tipo de pastura se muestra en la Figura A2-5.

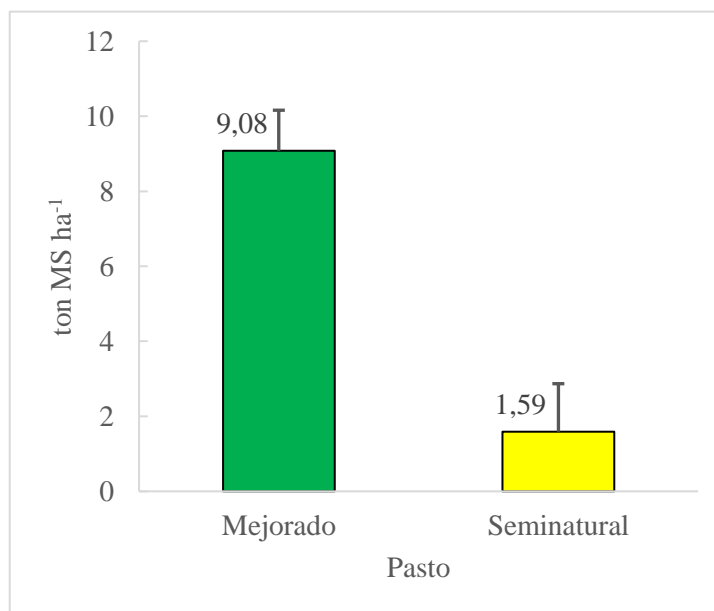


Figura A2- 5. Producción promedio de biomasa de las pasturas mejoradas y seminaturales

Por su parte, la composición botánica de los dos tipos de pasturas presentó un comportamiento similar en cuanto a estructura, con dominancia de una especie principal por su interés forrajero y la presencia de muchas otras varias especies en proporciones mucho menores.

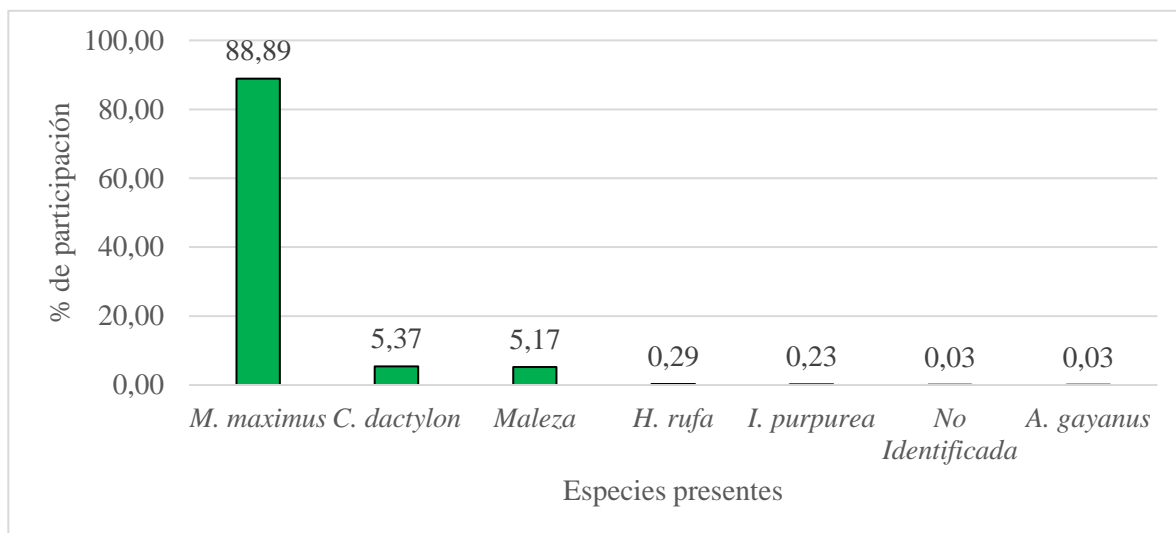


Figura A2- 6. Composición botánica promedio de las pasturas mejoradas.

Así entonces, *M. maximus* participó en casi la totalidad de la cobertura de las pasturas mejoradas (Figura A2-6), y fue acompañado en una pequeña fracción por *C. dactylon* y otras especies identificadas como malezas por los agricultores. También estaban presentes otras especies forrajeras como Jaragua (*Hyparrhenia rufa*) y Gamba (*Andropogon gayanus*), y otras que no son de uso forrajero.

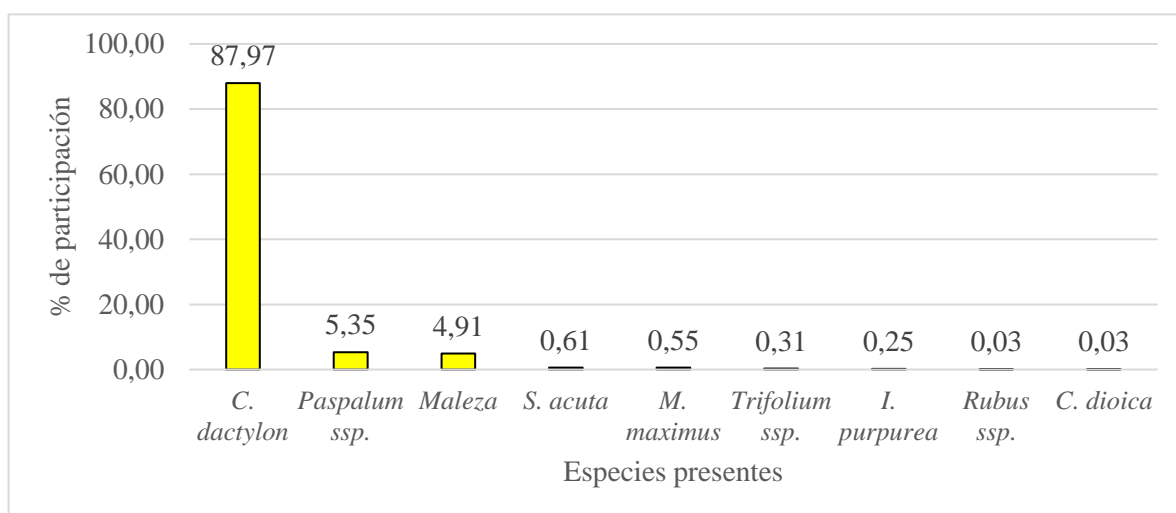


Figura A2- 7. Composición botánica promedio de las pasturas seminaturales.

C. dactylon fue la especie que los agricultores han estado sustituyendo en sus potreros con *M. maximus*. Por esa razón, dicha especie ocupó el primer lugar en la cobertura en las pasturas seminaturales (Figura A2-7), seguida por grama (*Paspalum ssp.*) y maleza. Las otras especies acompañantes, que fueron más numerosas que en las pasturas mejoradas, en su mayoría no son de uso forrajero. La presencia de *M. maximus* cv. Mombasa en algunos potreros, obedeció a

algunos intentos previos poco exitosos de los agricultores para establecer esta especie en sus potreros como nueva fuente de alimento.

3.1.2. Calidad nutricional.

El valor nutricional de *M. maximus* y *C. dactylon* expresados en términos de PC (%), FDA (%) y digestibilidad (%), se muestran en el Cuadro A2-1.

Cuadro A2- 1. Calidad nutricional de las pasturas mejoradas y seminaturales.

Parámetro (%)	Tipo de pastura		Diseño SSP*	
	Mejorado	Seminatural	ADP	CV
PC	6.19 a	5.93 a	6.85 a	5.13 b
FDA	60.80 a	62.2 a	60.30 a	61.59 a
Digestibilidad	41.53 a	40.45 a	41.92 a	40.92 a

Medias de cada parámetro con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

*En pasturas mejoradas

En las muestras de pasto colectadas en el período seco no se encontraron diferencias ($p > 0.05$) entre los dos tipos de pasturas con relación a las variables de calidad nutricional examinadas, excepto que el contenido de PC fue mayor ($p < 0.05$) en los pastos del sistema árboles dispersos en potreros que en los de cercas vivas.

Los valores absolutos de proteína cruda y energía metabolizable por unidad de superficie generada por los dos tipos de pasturas, se presenta en la Figura A2-8. La producción de proteína cruda y energía metabolizable por hectárea en pasturas de *M. maximus*, en promedio fue 5.9 veces mayor que en las pasturas seminaturales.

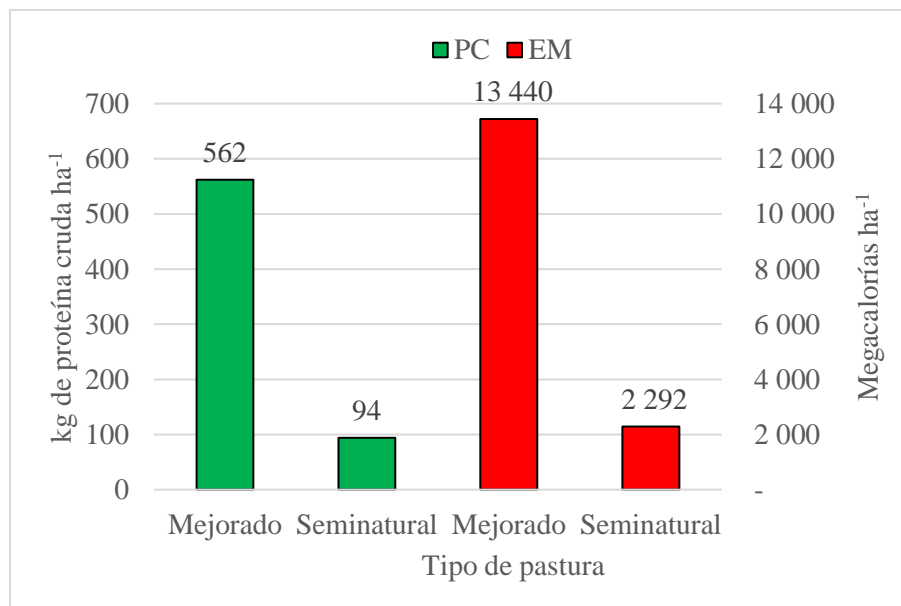


Figura A2- 8. Producción de kilogramos de proteína cruda (PC) y megacalorías de energía metabolizable (EM) por unidad de superficie y tipo de pastura.

3.2. Contribución potencial de *M. maximus* a la mejora de la productividad bovina en los SSP evaluados.

Los escenarios de la productividad potencial (simulada) por unidad de tiempo y espacio, del ganado de engorde en función de la carga animal, tanto para pasto seminatural como para pasto mejorado con un régimen de manejo adecuado del pastoreo, se muestra en el Cuadro A2-2.

Cuadro A2- 2. Productividad simulada del ganado de engorde en función de la carga animal en pastura seminatural y mejorada.

Escenario	Dieta	Carga Animal (UA ha ⁻¹)	Ganancia de Peso Diaria (kg)	Ganancia de Peso en el Periodo (kg)	Ganancia de Peso por Superficie (kg ha ⁻¹)	Margen Bruto (US\$ ha ⁻¹)
1	Seminatural	1.26	0.132	40	50.40	584.33
2	Mombasa	1.26	0.432	131	165.06	804.58

1 Unidad Animal (UA) = 450 kg Peso Vivo. Periodo de 303 días.

Los resultados del Cuadro A2-2 sugieren que cuando los dos tipos de pastura son sometidos a la misma carga de 1.26 UA ha⁻¹ (escenarios 1 y 2), el pasto mejorado presenta mayores ganancias de peso diario potencial por animal, y por ende, al final de la ceba, pero además lo hace por unidad de superficie. Este resultado también se ve reflejado en los ingresos por unidad de superficie que puede percibir el ganadero. Se reconoce que las pasturas mejoradas tienen un mayor potencial de capacidad de carga, por lo que en la medida que se aumentó el número de UA ha⁻¹ se incrementó la productividad animal; sin embargo, la productividad (kg ha⁻¹ año⁻¹) empezó a declinar cuando la carga animal superó las 4 UA ha⁻¹ (Figura A2-9).

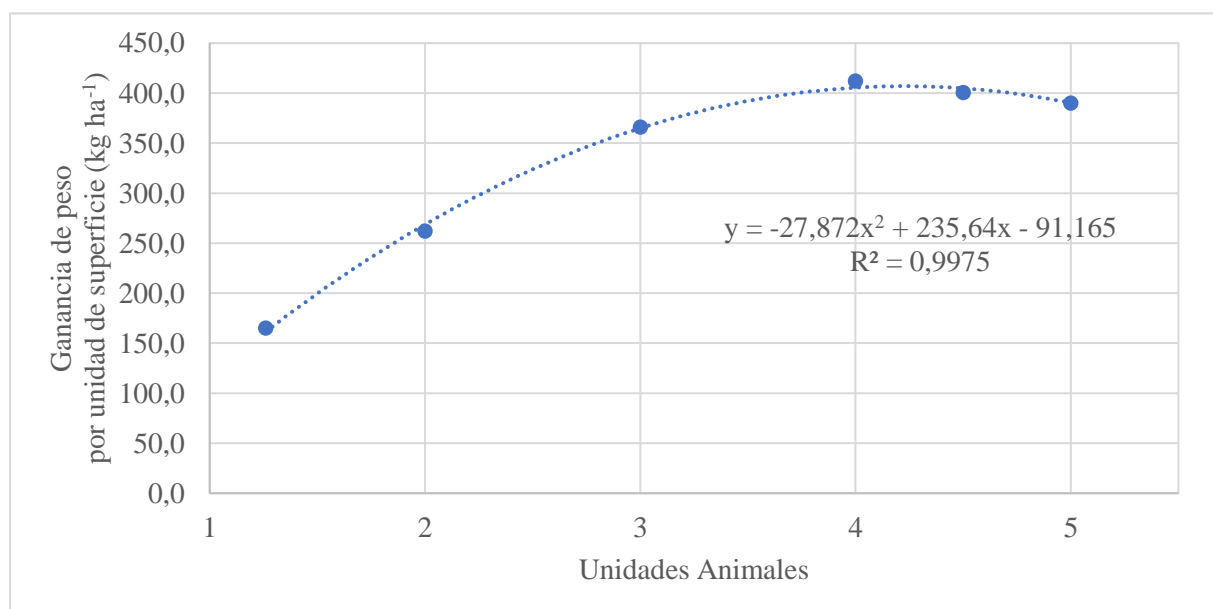


Figura A2- 9. Comportamiento de la productividad potencial del ganado de carne pastoreando *M. maximus*, por superficie, como función de la carga animal.

En cambio, la ganancia de peso por animal tendió a disminuir luego que la carga superó las 2.0 UA ha⁻¹ (Figura A2-10).

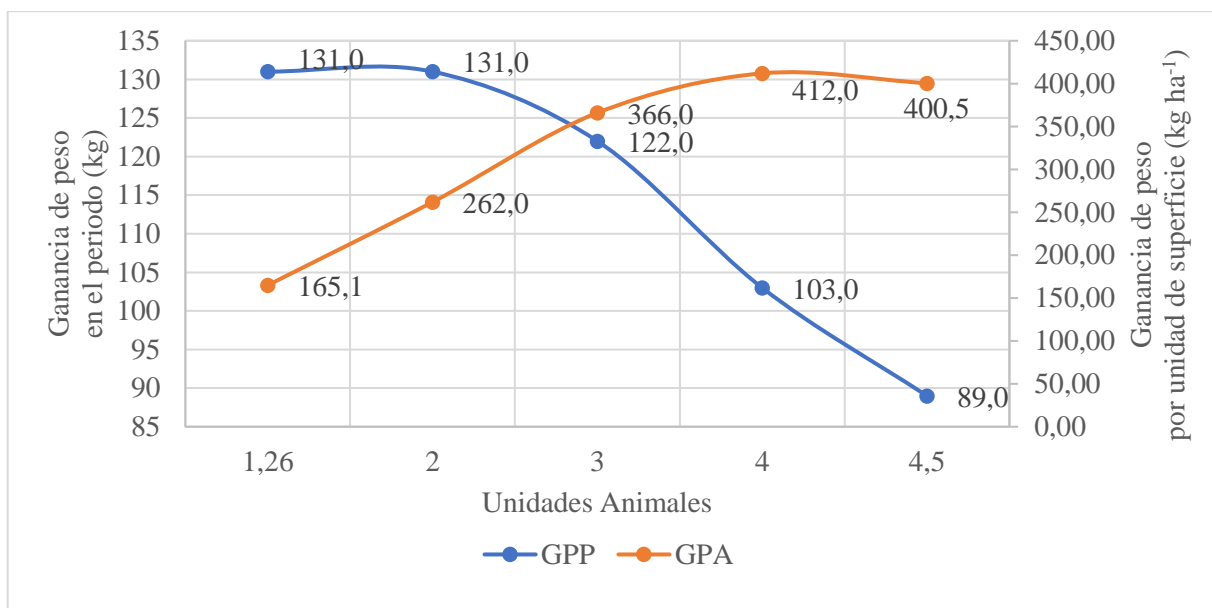


Figura A2- 10. Comportamiento de la producción animal potencial del ganado de carne, por tiempo y superficie como función de la carga animal en pasturas de *M. maximus*.

Además, los resultados obtenidos indican que el punto de equilibrio entre la producción por animal y la productividad por unidad de área en la pastura mejorada de *M. maximus* cv. Mombasa se logró con una carga animal de entre 2.5 y 3 UA ha⁻¹. Este valor es inferior a la carga máxima indicada por la función cuadrática de 4.2 UA ha⁻¹.

3.3. Predicción de la producción de biomasa utilizando índices de vegetación NIR y RGB.

3.3.1. Sensores remotos.

En el Cuadro A2-3 se muestran los resultados en la evaluación de los modelos estadísticos utilizados para estimar la producción de biomasa en pastura mejorada empleando imágenes satelitales.

Cuadro A2- 3. Métricas utilizadas en la evaluación de los modelos de regresión lineal y no lineal, para predecir la estimación de biomasa en *M. maximus* cv Mombasa con sensores remotos.

Proceso	Calibración		Validación		Modelo general	
Pastura	6 pasturas		6 pasturas			
Media observada ⁺	10.393	10.393	7.942	7.942	9.279	9.279
NDVI						
Modelo	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial
R ²	0.190	0.189	0.084	0.092	0.171	0.169
MAE ⁺	2.794	2.754	3.545	3.403	2.981	3.131
RMSE ⁺	3.958	4.050	4.559	4.396	4.157	4.250
RRMSE	0.380	0.389	0.574	0.553	0.448	0.458
Nash	0.189	0.152	-0.072	0.002	0.170	0.133
EVI						
Modelo	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial
R ²	0.119	0.122	0.084	0.092	0.175	0.183
MAE ⁺	2.780	2.835	3.534	3.428	2.936	3.063
RMSE ⁺	4.127	4.210	4.297	4.195	4.147	4.215
RRMSE	0.397	0.405	0.541	0.528	0.446	0.454
Nash	0.119	0.083	0.046	0.091	0.174	0.147
SAVI						
Modelo	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial
R ²	0.123	0.125	0.108	0.124	0.160	0.165
MAE ⁺	2.839	2.904	3.230	3.143	2.982	3.112
RMSE ⁺	4.118	4.211	4.312	4.157	4.184	4.263
RRMSE	0.396	0.405	0.542	0.523	0.450	0.459
Nash	0.123	0.083	0.040	0.108	0.160	0.128

⁺ ton MS ha⁻¹; MAE: Error Medio Absoluto; RMSE: Raíz del Error Medio Cuadrático; RRMSE: Raíz Relativa del Error Medio Cuadrático

Los resultados presentados en el Cuadro A2-3 evidencian que la producción de biomasa en las pasturas mejoradas careció de una estrecha relación con cualquiera de los tres índices utilizados, pues los coeficientes de determinación fueron muy bajos para la calibración, validación y para el modelo general. Los mayores valores de R² y eficiencia, junto con las menores expresiones de error, se encontraron en la calibración de ambos modelos de regresión basados en el NDVI, pero entre ellos, el modelo lineal simple tuvo mejores valores numéricos.

En el caso de los modelos generales, fue el EVI el que presentó mayores R² y menores magnitudes de error en relación con los otros índices de vegetación.

3.3.2. Sensores proximales.

Las métricas utilizadas para evaluar los modelos estadísticos en la cuantificación de biomasa de pasto Mombasa, usando sensores proximales, se presentan en el Cuadro A2-4.

Cuadro A2- 4. Métricas utilizadas en la evaluación de los modelos de regresión lineal y no lineal, para predecir la estimación de biomasa en *M. maximus* cv. Mombasa con sensores proximales.

Proceso	Calibración		Validación		Modelo general		Finca CATIE
Pastura	6 pasturas		6 pasturas				
Media observada ⁺	12.977	12.977	9.534	9.534	9.082	9.082	8.246
Modelo	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial	Lineal	Potencial	Lineal
R ²	0.506	0.565	0.295	0.188	*	*	0.563
MAE ⁺	5.983	5.617	7.754	5.177	3.028	3.735	2.287
RMSE ⁺	8.000	7.989	9.955	7.630	3.829	4.840	2.585
RRMSE	0.617	0.616	1.044	0.800	0.421	0.532	0.308
Nash	0.507	0.508	-0.445	0.151	0.249	-0.198	0.558

⁺ ton MS ha⁻¹; MAE: Error Medio Absoluto; RMSE: Raíz del Error Medio Cuadrático; RRMSE: Raíz Relativa del Error Medio Cuadrático; * R² es propio para cada pastura.

La media observada en la muestra para calibración fue superior a la obtenida para la muestra de validación. Sin embargo, todas las métricas en las pasturas mejoradas de las UM señalan altas diferencias entre las estimaciones de los modelos de regresión y lo observado en campo con el método del doble muestreo. Así mismo, expresan bajo desempeño en la predicción del rendimiento de biomasa como función del IV_{green}. Incluso, en la calibración de un modelo propio para cada pastura mejorada el comportamiento es similar.

Por otra parte, aunque la pastura de *C. nlemfuensis* evaluada en la Finca del CATIE presenta variaciones absolutas y relativas menores en el uso de este índice como variable explicativa del rendimiento del pasto, la eficiencia del modelo solo fue ligeramente mejor comparado a la obtenida en las pasturas de *M. maximus* evaluadas en Nicaragua.

4. DISCUSIÓN

4.1. Producción y calidad de las pasturas mejoradas y las pasturas seminaturales.

4.1.1. Disponibilidad de biomasa.

En esta investigación, las pasturas mejoradas de *M. maximus* presentaron los valores más altos de disponibilidad (Figura A2-5), superando al menos en casi cinco veces el valor más alto que se observó para las pasturas seminaturales. Iglesias-Gómez *et al.* (2022), estudiando el comportamiento agronómico y nutricional de especies mejoradas en pastoreo rotacional Voisin en Los Santos (Panamá), también encontraron mayores rendimientos para cultivares de *M. maximus* (incluido Mombasa) que para *C. dactylon*. Ambos resultados concuerdan con la aseveración hecha por Pezo (2018 b), sobre la potencial superioridad productiva de los pastos mejorados con relación a los pastos nativos, siempre que estos cuenten con las condiciones agroecológicas y de manejo pertinentes.

Respecto al manejo, Velasco *et al.* (2018), sostienen que este factor explica parcialmente de forma directa las diferencias en el crecimiento y el rendimiento del pasto. Su afirmación encuentra lugar en el amplio rango de valores de biomasa observada en las fincas de este estudio. Las prácticas aplicadas en el establecimiento y manejo de estas pasturas mejoradas variaron entre fincas, pero existe margen para mejoras de manera que se alcance un aprovechamiento óptimo de la capacidad productiva y nutricional inherente a las especies mejoradas.

El contraste advertido con las buenas prácticas, pero coincidente en todas las fincas estudiadas, radica en la etapa fenológica en que se utiliza el pasto ofrecido para alimentar el ganado. Las precipitaciones cada vez más escasas (Ruiz *et al.* 2021) y su distribución errática durante la estación lluviosa, inducen a los productores de esta zona a tomar decisiones estratégicas sobre el uso de los potreros para garantizar la alimentación del hato en la estación seca. En atención a ello, la práctica generalizada por los participantes del estudio es aprovechar la humedad del suelo para permitir el máximo crecimiento posible de *M. maximus* más allá de la floración, incluso en algunos casos hasta la senescencia.

La finalidad de esta acción es lograr altas tasas de acumulación de biomasa aérea, favorecidas por el hábito de crecimiento erecto de esta especie (en algunos casos se observaron macollas de 2 m de altura), para suministrarlas bajo pastoreo en los meses de menor disponibilidad de alimento en la finca. Es decir, en general no se implementa un típico régimen periódico de aprovechamiento, sino un único momento de cosecha: marzo o abril. Esto genera discrepancias en las estimaciones de la producción de biomasa, así como de su calidad nutricional, con relación a otros autores cuyos reportes usualmente provienen de sistemas de manejo con dinámicas de cortes intermitentes en función de la altura o del tiempo de rebrote.

En términos de disponibilidad, estos resultados difieren de los encontrados por Silveira Júnior *et al.* (2017), quienes estudiando la eficiencia productiva de Mombasa sometido a diferentes dosis de fertilización nitrogenada en un SSP del noreste brasileño, estimaron 6.891 ton MS ha⁻¹ en su parcela testigo (0 kg N) cuando las macollas alcanzaron una altura de 0.9 m. Pero se aproximan a las 9.358 ton MS ha⁻¹ estimadas por Galindo *et al.* (2017) en su tratamiento testigo (0 kg N), cortando el pasto cuando alcanzaba 0.9-1.0 m de altura (aproximadamente cada 38 días) durante la época seca en el Norte de San Pablo, Brasil.

Ahora bien, con intervalos de corte más prolongados, de 90 días y 12 semanas, respectivamente Hare *et al.* (2013) y Mwendia *et al.* (2022), reportan producciones que incluso abarcan el promedio encontrado en este estudio, las cuales van desde 10.177 hasta 12.02 y de 8.0 a 11.3 ton MS ha⁻¹ en sus unidades experimentales de Tailandia y Kenia, en el mismo orden.

Cabe mencionar que tres de los cuatro rendimientos más altos de Mombasa se registraron en pasturas establecidas en un sistema SSP de ADP. En estos potreros, pero también en el resto de los que tienen ese diseño, se observaron macollas más altas, vigorosas y con menor material senescente creciendo a la sombra de los árboles, principalmente cuando estos eran leguminosas, tales como: *E. cyclocarpum*, *H. brasiletto*, *A. pennatula* y *E. poeppigiana*.

Este comportamiento también es reportado por Barro *et al.* (2012), quienes evaluaron la producción de biomasa de distintas especies del género *Paspalum* a pleno sol y bajo diferentes niveles de sombra, encontrando mayores rendimientos en sombra media que a pleno sol, lo cual fue asociado a una menor temperatura (3°C menos) y a la mayor humedad del suelo (71% más) existentes bajo condición de sombra. Ríos (2021), evaluando el rendimiento y la calidad

nutricional de *M. maximus* y *U. Brizantha* bajo sombra de árboles dispersos en potreros, reporta mayor disponibilidad y calidad nutricional en los meses secos, cuando el pasto creció bajo sombra de los árboles que a pleno sol.

Sobre estos resultados, Lucero *et al.* (2019) afirman que la presencia de árboles en la pastura reduce la temperatura del suelo e incrementa la humedad relativa del aire, lo que deriva en una menor tasa de evapotranspiración y mayor disponibilidad hídrica para las plantas. Además, si los árboles presentes son leguminosas, la fijación biológica de nitrógeno contribuye significativamente a la nutrición y productividad de la pastura (Campillo *et al.* 2003; Andrade *et al.* 2008).

Desde una perspectiva fisiológica, Santiago-Hernández *et al.* (2016) afirman que la respuesta de Mombasa bajo sombra es activar el mecanismo de elongación celular para desarrollar hojas más largas y anchas, pero delgadas. Por otra parte, la disminución en la cantidad de radiación interceptada directamente, así como de la tasa de transpiración, reduce la actividad fotosintética. Esta situación conlleva a un “retraso en la maduración de los tejidos y de la degradación de los cloroplastos, y por consecuencia este proceso retarda la senescencia de los pastos” (Hernández-Melchor *et al.* 2023:2143) y conserva su calidad nutritiva (Obispo *et al.* 2008).

4.1.2. Composición botánica.

La composición botánica expresa el número de especies forrajeras y la proporción en que se encuentran presentes en el pastizal (Caringuini *et al.* 2019). Desde la perspectiva de cobertura del suelo, este análisis permite identificar el nivel de degradación de las pasturas, la cual inicia su proceso de deterioro cuando existe una presencia de malezas superior al 5% y menos del 80% de especies palatables (gramíneas y leguminosas) (Betancourt *et al.* 2007; Villalobos y WingChing-Jones 2020).

Conforme a estos parámetros, ambos tipos de pasturas no presentan el inicio de su degradación ya que prácticamente 9 de cada 10 unidades de superficie se encuentran cubiertas por la especie forrajera principal y la cobertura de malezas se aproxima ligeramente al 5%. Sin embargo, para tener una visión más certera de esta condición hizo falta la evaluación de otros criterios que no se contemplaron en este estudio. Entre los cuales se incluyen características fisicoquímicas del suelo, o la presencia de plagas y enfermedades.

La dominancia de pasto Mombasa (Figura A2-6) en las pasturas mejoradas es atribuible a su reciente establecimiento y a la búsqueda de garantizar la prevalencia de *M. maximus* mediante las prácticas de deshierba, pero también al efecto de cobertura que tiene su propio follaje sobre las arvenses, debido a la altura alcanzada y el distanciamiento al que fue sembrado. Además, la sombra de los árboles ha influido en su permanencia como especie principal, pues *C. dactylon*, que podría ser su principal competidor, es susceptible a la sombra de estos (Noor *et al.* 2023). En este sentido, el pasto ha presentado buena respuesta de adaptación a las condiciones de la zona de estudio y ha demostrado ser competitivo para su uso.

Por su parte, *C. dactylon* (Figura A2-7) abarca el mayor porcentaje de participación en las pasturas seminaturales como resultado de su crecimiento agresivo, basado en estructuras reproductivas (rizomas y estolones) que le permiten propagarse rápidamente y generar raíces profundas, aunado a la producción de semillas sexuales (Garzón y Mora 2014). Estas características le permiten adaptarse a una amplia gama de suelos y ser tolerantes al pastoreo

(Schneider-Canny *et al.* 2019). *C. dactylon* es una especie bastante común en las pasturas de la zona de estudio.

Esta predominancia de gramíneas C₄ y la presencia de especies introducidas de origen africano como Jaragua (*Hyparrhenia rufa* (Nees) Stapf) en SSP, también fue reportada por Ospina *et al.* (2009) en estudios sobre la composición florística en SSP del municipio de Muy Muy (Nicaragua), un territorio con similitud edafoclimática y productiva a la zona de este estudio.

4.1.3. Calidad nutricional.

Los resultados bromatológicos presentados en el Cuadro A2-1, indican, en primera instancia, que los reducidos niveles de proteína cruda, así como la alta concentración de fibra, y por ende baja digestibilidad, son producto de la época del año, pero además en el caso de *M. maximus* es el resultado de la estrategia de utilización diferida para tener una buena cantidad de biomasa para períodos críticos de la estación seca. Sobre esto, Molano (2012) afirma que la edad es tal vez el factor más determinante en la calidad nutritiva del forraje. Conforme la planta madura la relación hoja:tallo disminuye (Calzada-Marín *et al.* 2014), lo que incrementa la proporción de la pared celular y reduce la síntesis de proteínas. Estos cambios estructurales además afectan negativamente la digestibilidad del pasto (Ramírez *et al.* 2002).

Es decir que, bajo el manejo particular recibido por las pasturas estudiadas, la calidad nutritiva no parece ser para los productores el atributo más relevante; de manera que, para asegurar que los animales al menos mantengan peso o consigan ganancias moderadas en el periodo seco, los productores tendrán que proveer el nitrógeno requerido por los microorganismos ruminales, el cual es equivalente a un 7% de proteína cruda (Van Soest 1994).

En razón de ello, estos resultados tienen ciertas similitudes de tendencia a los encontrados por diversos autores según la edad de utilización del pasto, pero también conforme al patrón de distribución de los árboles en los potreros (ADP o CV).

En el caso de *M. maximus*, tienden a parecerse en la medida en que los análisis de sus estudios se aproximan a la etapa fenológica en que las pasturas de esta investigación son consumidas (al menos tres meses de edad), pero tienden a divergir cuando se alejan de ese momento, es decir, el aprovechamiento temprano en torno de los 30-45 días refleja mejores valores de PC, FDA y digestibilidad, para luego deteriorarse en función del tiempo transcurrido, tal como sucede en los pastos de esta investigación.

Así, en estudios realizados en San Pablo (Brasil) con el pasto Mombasa manejado a pleno sol, y con cosecha a los 30 días, Galindo *et al.* (2019) reportaron contenidos de PC de 9.5% y FDA de 39.8%; mientras que Ramírez-Ordoñez *et al.* (2022) en Oaxaca (México) obtuvieron valores de PC de 10.5%, FDA de 31.3% y digestibilidad de 74.3%. Por otro lado, Hare *et al.* (2013) obtuvieron contenidos de 9.3% de PC con cortes mensuales y 5.6% con intervalos de 90 días, mientras que la FDA fue de 37.2 y 38.8% a los 30 y 90 días de rebrote, respectivamente. Ventura *et al.* (2021) evaluaron cortes desde los 30 hasta los 120 días después del rebrote, y los porcentajes de PC y FDA desmejoraron de 10.4 a 5.1% y de 43 a 45.2%, respectivamente.

Ahora bien, cuando los análisis bromatológicos se realizaron a pastos incorporados en un SSP, sus resultados muestran una tendencia similar a lo observado en el Cuadro A2-1 respecto al diseño de la silvopastura. Si bien es cierto que ADP y CV son opciones SSP, sus diferencias en

la distribución espacial del componente arbóreo resultan en efectos diferentes en la disposición de la radiación solar incidente sobre el componente herbáceo. En esta investigación, en el caso de las cercas vivas ubicadas en el perímetro de los potreros, es posible que hayan permitido una incidencia de radiación similar a la recibida por pasturas establecidas a pleno sol

En este sentido, Barragán-Hernández y Cajas-Jirón (2019) trabajando con arreglos silvopastoriles en Córdoba (Colombia), encontraron que a los 28 días del rebrote los valores de PC, FDA y digestibilidad fueron de 13.87, 34.45 y 66.47%, respectivamente, en el testigo (solo pasto); en cambio, en potreros con árboles dispersos de *C. grandis*, *Pithecellobium saman* y *G. ulmifolia*, los valores obtenidos para esos atributos fueron de 16.4, 36.98 y 65.94%, respectivamente. Por otro lado, Obispo *et al.* (2008) estudiando el efecto de diferentes densidades de sombra arbórea sobre la producción y calidad de *M. maximus* en Yaracuy (Venezuela), encontraron que a los 45 días del rebrote los valores de PC y FDA fueron de 13.6 y 33.9% bajo la sombra de árboles, y de 12.1 y 42.6% a pleno sol. En cambio, no hubo efecto sobre la digestibilidad (59.4%).

Este fenómeno puede ser explicado por factores extrínsecos e intrínsecos a la especie. Wilson (1996) concluyó que la sombra conserva la humedad del suelo, lo que favorece la degradación de la materia orgánica, y por tanto la disponibilidad y el flujo de nitrógeno hacia la planta. Lo que es potenciado cuando el componente arbóreo es leguminoso, tanto por la producción y calidad de la hojarasca como por la fijación biológica de nitrógeno, además del aporte de estiércol que pueda hacer el ganado cuando busca la sombra (Xavier *et al.* 2014). Todo ello contrasta con las pasturas a pleno sol, máxime en la estación seca.

En torno a esto, Silveira Junior *et al.* (2017) señalan que la acumulación de proteínas es consecuencia de la buena adaptación del pasto Mombasa a los entornos con restricción de luz. Al respecto, Jarma-Orozco *et al.* (2022) explican que esta adaptación se sustenta en una mejora de la eficiencia del proceso fotosintético, mediante el incremento de las concentraciones de clorofila. Esta molécula está conformada por nitrógeno en su anillo pirrólico (Humphrey 1980), o sea que la mayor cantidad de este elemento, localizado en las hojas, se encuentra incorporado en la clorofila (Loayza *et al.* 2022). De tal forma que las concentraciones de clorofila y N (PC) se encuentran altamente relacionadas (Rincón y Ligarreto 2010; Rincón *et al.* 2019).

En cuanto a los resultados de FDA, si bien en los estudios mencionados anteriormente, el comportamiento de este parámetro tendió a incrementar conforme a la edad, ninguno de ellos alcanzó los porcentajes aquí reportados. Como ya se advirtió, esto se encuentra relacionado a la edad, la cual se expresa en la disminución de la relación hoja:tallo.

Verdecia *et al.* (2009:5), afirman que este fenómeno “tiene un marcado efecto en el rendimiento y sus componentes”. En sus estudios reportan proporciones de 84.8% de hojas y 15.1% de tallos a los 30 días después del rebrote (ddr) durante el período seco, pero a los 75 ddr estos son de 58.3% y 34.8%, respectivamente. Sobre este comportamiento, los autores sugieren que la mayor proporción de hojas en las primeras semanas se atribuye a una menor aparición de hijos y a la necesidad de la planta por fabricar sustancias empleadas en su desarrollo, mientras que a una edad mayor los tallos se han alargado y engrosado, y las hojas envejecido.

Liendo *et al.* (2019) aseguran que el alto valor nutritivo de las hojas radica en la gran cantidad de tejido parenquimatoso presente en el mesófilo, favorable a la acumulación de proteínas y carbohidratos no estructurales. Los tallos, más bien se caracterizan por una mayor proporción

de tejido vascular y de sostén conformado por carbohidratos estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina), y a medida que las plantas maduran se reduce la contribución en peso del mesófilo y aumenta el tejido vascular, el cual resulta en una alta concentración de pared celular (Almaraz-Buendía *et al.* 2019), que en este estudio se reflejó en el alto contenido de FDA y baja digestibilidad.

4.1.4. Contribución del Proyecto Cosecha de Agua a la mejora de la alimentación del ganado bovino en época seca.

Aunque se ha visto que la calidad nutricional del pasto disminuye con la edad de la planta, en contraste la producción de MS incrementa, y con ello la productividad de la pastura (Angulo-Arroyave y Rosero-Noguera 2018). De manera que, la introducción del pasto *M. maximus* cv. Mombasa por el PCA ha resultado en una mayor disponibilidad de pasto en el periodo seco, comparado con el sistema tradicional de pasturas seminaturales dominadas por *C. dactylon*.

Esto significa que, aun con un manejo agronómico susceptible de mejora, en términos absolutos las pasturas de Mombasa suministraron una alimentación 5.9 veces más rica en energía (Figura A2-8), pues aportaron en promedio 13,440 Mcal ha⁻¹ de energía metabolizable (EM) versus 2,292 Mcal ha⁻¹ del pasto seminatural. Es decir, qué a razón de un requerimiento de 1.3 ton MS animal⁻¹, el pasto mejorado proveía de EM suficiente para mantener aproximadamente 6.9 UA ha⁻¹ (1 UA=450 kg PV) durante los 180 días de la estación seca, mientras que el pasto seminatural difícilmente abastecía suficiente EM para mantener 1.21 U.A. en ese mismo periodo. Por otra parte, en términos de proteína cruda, componente esencial de su dieta (Friedman 1996), el pasto mejorado también ofreció 5.9 veces más que lo aportado por las pasturas de *C. dactylon* (562 vs 94 kg PC ha⁻¹, respectivamente).

Además, la diferencia a favor de una mayor disposición absoluta de nutrientes se amplía significativamente cuando la pastura se incorpora en un diseño de árboles dispersos en potreros. Esto confirma la viabilidad de conjugar el componente forestal en el sistema ganadero, sin perjuicios productivos y más bien con diversos beneficios socioeconómicos y ecológicos (Pezo *et al.* 2018), como puede ser en el caso del Proyecto Cosecha de Agua la protección de áreas de recarga hídrica para las obras de cosecha de agua de escorrentía y de manantial. Es más, el uso de la pastura mejorada puede ayudar a evitar la reducción del inventario ganadero, cuando falta alimento para su mantenimiento durante la estación seca, situación que a menudo se enfrenta en la zona de estudio.

Es destacable que los productores participantes del estudio mencionaron que a raíz de este ejercicio inicial con el cultivar Mombasa, pretenden invertir recursos financieros propios para la ampliación de este tipo de pasturas en sus fincas. Adicionalmente, en una especie de efecto irradiante provocado, los mismos productores reportaron el incipiente entusiasmo de otros ganaderos vecinos, no participantes del PCA, para incursionar en el uso de esta tecnología, siendo lo ideal que el pasto mejorado se establezca en un diseño de árboles dispersos en potreros.

4.2. Contribución potencial de las pasturas de *M. maximus* a la productividad animal.

Dado que en esta simulación las concentraciones de PC y digestibilidad fueron las mismas para ambos tipos de pasto, es entonces el grado de disponibilidad de biomasa en la pastura el que afecta el consumo de forraje, y por ende la productividad de carne (Do Carmo *et al.* 2019). Así lo demuestra el Cuadro A2-2, cuyos resultados en la ganancia de peso por día y por unidad de

espacio, son la consecuencia de las amplias diferencias que existen entre la oferta de alimento producida por la pastura seminatural y la producida por la pastura mejorada.

Como se observó en el análisis de la disponibilidad de pasto, *M. maximus* produce mucha mayor cantidad de biomasa en la estación seca, que *C. dactylon*. Este aspecto es determinante para explotar la capacidad de ganar peso a lo largo de la ceba, ya que el bajo o alto rendimiento del ganado está vinculado a la disponibilidad de pasto (González-Garduño *et al.* 2011), máxime en ganado de engorde donde la alimentación es el principal factor que limita su productividad (Barbosa *et al.* 2022).

La ganancia de peso diaria simulada con *M. maximus* es superior a la encontrada en ensayos por Iglesias *et al.* (2015), quienes, utilizando toretes cruzados de 18 meses alimentados por esta misma especie, alcanzaron $0.364 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$. También es superior a la producción informada por Pérez *et al.* (2008) con esta gramínea en monocultivo ($0.369 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$), pero inferior ($0.486 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$) cuando se encontró en SSP. Igualmente, es inferior a los $0.557 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$ reportados por Lamela-López *et al.* (2022).

Ahora bien, en cuanto a la productividad, entendida como producción por unidad de superficie (Figura A2-9), la mayor producción de biomasa de *M. maximus* le confiere la capacidad de soportar una mayor carga animal, que deriva en mayores ganancias de peso por hectárea. Sin embargo, más allá de las 2 UA ha^{-1} el rendimiento de carne se reduce progresivamente debido a que la tasa de crecimiento de la pastura ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) es insuficiente para satisfacer el consumo demandado, además que se limita la capacidad selectiva del animal para consumir componentes de la pastura con mayor calidad nutritiva (Costa *et al.* 2021) Esto genera entre los individuos una competencia por el poco alimento existente que conduce a una dieta inadecuada, hasta el punto en el que las tasas de crecimiento individual tienden a bajar tanto (Figura A2-10) que las ganancias de pesos corporal inician a mermar por unidad de superficie (Beck *et al.* 2020).

Adicionalmente, la alta carga animal, al no permitir la generación de suficiente tejido vegetal nuevo porque se incrementa la frecuencia/intensidad de defoliación, la remoción de meristemos apicales y de órganos de reserva, afectando así la capacidad de rebrote e incrementando el tiempo de descanso entre pastoreos (Pezo 2018a), deviene en la degradación de las pasturas. Consecuentemente, se ve reducida su capacidad de suministrar alimento al ganado de forma sostenida en el futuro (Blanco *et al.* 2022).

4.3. Evaluación de los sensores remotos y los sensores proximales.

Las evaluaciones realizadas a los modelos de predicción indican que para este estudio existen relaciones lineales y potenciales positivas, pero no lo suficientemente robustas (Cuadro A2-3 y Cuadro A2-4). Es decir que, bajo las condiciones encontradas en las pasturas estudiadas, los valores de los índices de vegetación NIR y RGB explican muy poco la variación de la disponibilidad de forraje (ton MS ha^{-1}) observado. Sin embargo, los IV en el rango visible del espectro tiene una mejor relación explicada (Cuadro A2-4).

Los IV NIR se han utilizado para predecir la disponibilidad de biomasa forrajera en diversas investigaciones. Gargiulo *et al.* (2020) trabajando con *Lolium multiflorum*, en Nueva Gales del Sur (Australia), registraron un R^2 de 0.74 para NDVI. Cisneros *et al.* (2020) evaluando la productividad de Mombasa y *U. brizantha* cv. Marandú en San Pablo (Brasil), obtuvieron un R^2 de 0.37 para NDVI. Bretas *et al.* (2021) estudiando la combinación de IV con data climática

para predecir biomasa aérea en pasturas de *Brachiaria* en Brasil, obtuvieron coeficientes de determinación de 0.73, 0.72 y 0.73 para NDVI, EVI2 y OSAVI, respectivamente. Díaz-Giraldo *et al.* (2023), estimando la disponibilidad de forraje de *U. humidicola* cv. Llanero con imágenes multiespectrales en Meta (Colombia) reportaron un R^2 de 0.74 para NDVI.

Todos los estudios previamente citados exhiben mayor confiabilidad en la predicción de la disponibilidad de forraje en función de los IV que lo obtenido en este estudio. En esta comparación, el factor días después del rebrote en que se tomaron las observaciones y se efectuaron las estimaciones, debe haber sido determinante para el resultado obtenido. Las pasturas de las investigaciones citadas fueron evaluadas con un máximo de 30 días de rebrote, es decir en etapas de crecimiento vegetativo cuando la concentración de clorofilas en las hojas es mayor (Zhang *et al.* 2007).

La clorofila es un indicador del estado fisiológico y de la etapa de desarrollo de las plantas (Li *et al.* 2019). Sus niveles de concentración actúan fuertemente sobre las propiedades ópticas de absorbancia, transmitancia y reflectancia de las hojas (Cabello-Passini y Macías-Carranza 2011). Estas propiedades sustentan el uso de los IV, específicamente en el contraste que existe entre la máxima absorción de luz roja incidente por la clorofila vegetal, y la máxima reflexión de la radiación en el infrarrojo cercano causado por la estructura celular de la hoja y su contenido de agua (Liu y Huete 1995; Asner 1998; Wu *et al.* 2008). Esto significa que una planta joven, sana (“verde”) y con células turgentes alcanzará un mayor IV que una planta en un estado de madurez muy avanzado, como fue el caso en las pasturas evaluadas en este estudio.

Las concentraciones de clorofila decrecen en función de la edad, entre 32% y 43.4% a los 90 días (Fortes *et al.* 2009), y, por el contrario, el contenido de MS se incrementa (García-Cardoso *et al.* 2009). En este sentido, la asociación esperada de un valor más alto en el índice de vegetación a un mayor rendimiento de pasto puede verse alterada por variaciones en la frecuencia de aprovechamiento, resultando en menor valor predictivo en pasturas con un período de descanso más largo. En este estudio, los pastos continuaron creciendo y acumulando materia seca y fibra, y se encontraban más allá del momento óptimo de su aprovechamiento, con una degradación cada vez mayor de sus concentraciones de clorofila. Esto podría haber incidido en el hallazgo que IV relativamente bajos estuvieran vinculados a altos rendimientos (pero de poca calidad nutritiva), mientras otros IV con valores relativamente más altos se ligaron a menores cantidades biomasa producida.

Si se analizan los resultados desde el punto de vista de los componentes nutricionales, los IV obtenidos en este estudio tampoco explican la concentración de fibra encontrada. Posada-Asprilla *et al.* (2019), evaluando con un sensor multiespectral la calidad nutricional de *Cenchrus clandestinum* en Antioquia (Colombia), encontraron un bajo valor predictivo ($R^2 = 0.28$) para predecir el contenido de FDA a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (RNDVI_{840,717}.) En cambio, Zhao *et al.* (2007), trabajando bajo condiciones totalmente controladas de invernadero (maceteras con gramíneas dentro de una caja negra, iluminación artificial uniforme, remoción de hojas senescente e inflorescencias), lograron explicar el 46% de la variación en FDA utilizando bandas del SWIR ($\rho_{1275} / \rho_{1195}$).

Lo anterior indica que la variabilidad generada por las condiciones de campo tiene un efecto muy importante en los resultados. En ese sentido, la heterogeneidad en el crecimiento de los pastos, como consecuencia del manejo particular en cada finca, puede haber sido un factor clave para llegar a los bajos valores de predicción encontrados con los modelos utilizados en este

estudio. De acuerdo con Sinde *et al.* (2020), estudiando *Cenchrus clandestinus* y *Lolium ssp* en Pichincha (Ecuador), la falta de uniformidad en el crecimiento del pasto genera distorsión en los datos, porque la concentración de pigmentos es variable de acuerdo a la etapa fenológica. Además, la vegetación arbustiva baja de la regeneración natural en SSP puede influir en la captura de datos por el sensor, generando una limitante en la estimación de IV con sensores remotos.

Por su parte, los IV calculados a partir de imágenes digitales capturadas con sensores proximales, presentaron mejores coeficientes de determinación y de eficiencia en el modelo predictivo, que los IV con sensores remotos. Esto probablemente se debe a las limitantes ópticas que tienen las imágenes satelitales en cuanto a la presencia de nubes (Marini 2021) o la lejanía de la resolución temporal con relación a las fechas de toma de datos en campo.

Lussem *et al.* (2018) y Lussem *et al.* (2019), evaluando la relación entre el rendimiento de pasturas e índices de vegetación RGB con imágenes capturada por drones, en Colonia (Alemania), obtuvieron para IV_{green} coeficientes de determinación superiores (0.61 y 0.57, respectivamente) a los encontrados en este estudio.

Es probable que el rendimiento de pasto Mombasa no haya podido ser explicado satisfactoriamente por el IV_{green} , debido a que este índice distinguió de forma insuficiente las áreas cubiertas con pastos y aquellas sin cobertura (Xu *et al.* 2022). A esto también se le puede sumar la saturación de la banda roja, es decir el no cambio de valor en la reflectancia debido a absorción de luz por los pigmentos foliares (Paz *et al.* 2014). De acuerdo con Wu *et al.* (2008), esto obedece a que la máxima absorbancia se da en 660-680 nm y tiende a saturarse con un bajo contenido de clorofila, lo que deriva en una reducción en la sensibilidad de los índices espectrales basados en esta banda. Revelo *et al.* (2020) indican que esto se traduce en una capacidad limitada para detectar variaciones dentro de la cobertura vegetal. Esto pudo observarse claramente en el potrero de la finca Comercial de CATIE, donde los valores de este índice fueron prácticamente los mismos para la MR1 (0.25) y la MR5 (0.26).

5. CONCLUSIONES

El Proyecto Cosecha de Agua en Nicaragua ha contribuido de forma efectiva a multiplicar ampliamente la oferta de pasto por unidad de superficie (ton MS ha^{-1}) en las unidades productivas ganaderas incorporadas en su esquema de atención. Esto permite a los productores disponer ahora de un importante suministro de alimentos en la época más crítica del año, y por tanto mejorar su capacidad de manutención del ganado en existencia o el potencial incremento de su inventario.

La incorporación de *M. maximus* cv. Mombasa en SSP de árboles dispersos en potreros (ADP), es una valiosa alternativa para la producción de pasto de buena calidad en la época seca, pero la calidad nutritiva de este alimento fue baja, y por extensión su eficiencia de aprovechamiento por el ganado, lo que redundó en una producción por animal pobre, a menos que se provea de suplementación estratégica a los animales.

La utilización de *M. maximus* contribuye de forma importante a la producción y productividad animal potencial en el ganado de engorde.

Los resultados de este estudio evidencian la factibilidad de desarrollar una actividad ganadera compatible con la conservación de la cobertura forestal y la restauración ecológica del sistema productivo en la sabana tropical.

Bajo las condiciones de esta investigación, los índices de vegetación, estimados a partir del uso de sensores proximales y remotos, no funcionaron como predictores del rendimiento productivo, lo que se atribuyó a la alta variabilidad en el estado fenológico de las pasturas y su manejo heterogéneo.

6. RECOMENDACIONES

Realizar estudios de disponibilidad, calidad nutricional y evaluación de sensores proximales y remotos a lo largo del año, con una mejor condición de homogeneidad fisiológica y de manejo de las pasturas objetivo, con y sin arboles dispersos en potreros.

Promover el establecimiento de pasturas mejoradas de *M. maximus* en SSP utilizando diseños de ADP con leguminosas arbóreas, a partir de la regeneración natural, para garantizar una mejor calidad nutritiva de la dieta bovina, pero también para contribuir a la conservación y restauración en la diversidad y riqueza del componente forestal en el agropaisaje de la sabana tropical, además de generar más servicios ecosistémicos.

Diseñar y ejecutar programas de asistencia técnica que concienticen a los ganaderos sobre la importancia del aprovechamiento oportuno del pasto en función de su disponibilidad y calidad nutritiva, así como las ventajas de incorporar esas pasturas en sistemas silvopastoriles, y sus efectos sobre la productividad animal y la eficiencia económica de sus sistemas de producción.

Promover la utilización de LIFE-SIM como herramienta de análisis de escenarios futuros que permitan evaluar, seleccionar y planificar con precisión las mejores alternativas de estrategias alimentarias pecuarias, en el marco de una producción ganadera sostenible.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A; Armijos, D; Zhinin, L. 2014. Evaluación de métodos de pesaje en vivo y determinación del rendimiento a la canal en bovinos manejados al pastoreo (en línea). Revista Tsafiqui. 5(5):8-16. Consultado 13 jul. 2023. Disponible en: <https://revistas.ute.edu.ec/index.php/tsafiqui/article/view/278/280>
- Almaraz-Buendía, I; García, AM; Sánchez-Santillán, P; Torres-Salado, N; Herrera-Pérez, J; Boltini-Luzardo, MB; Rojas-García, AR. 2019. Análisis bromatológico y producción de gas in vitro de forrajes utilizados en el trópico seco mexicano (en línea) Archivos de Zootecnia. 68(262):260-266. Consultado 26 jul. 2023. Disponible en: <https://www.uco.es/servicios/ucopress/az/index.php/az/article/view/4145/2486>
- Andrade, HJ; Brook, R; Ibrahim, M. 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica (en línea). Plant Soil. 308(-):11–22. Consultado 03 nov. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-008-9600-x#citeas>
- Angulo-Arroyave, R; Rosero-Noguera, R. 2018. Producción de forraje y calidad nutricional del pasto angleton climacuna (*Dichanthium annulatum*-Forssk-Stapf) para la producción de heno en La Dorada (Caldas) (en línea). Revista de Producción Animal. 30(2):10-17. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rpa/v30n2/rpa02218.pdf>
- Arias, A; Zee, J; Meyrat, A; Poveda, C; Picado, L. 2012. Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano. Países CA-4. Tomo I. (en línea). Fundación Internacional Acción Contra el Hambre (ACF) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 90 p. Honduras. Consultado 02 nov. 2023. Disponible en: <http://humanright2water.org/fr/wp-content/uploads/2020/03/1212-Corredor-Seco-Centroamericano.pdf>
- Asner, GP. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance (en línea). Remote Sensing of Environment. 64(3):234-253. Consultado 25 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425798000145>
- Barboza, D; Solórzano, J; Vásquez AP; Paniagua, J. 2022. Optimización del costo de alimentación para ganado de engorde en Guanacaste, Costa Rica (en línea). E-Agronegocios. 8(1):25–44. Consultado 28 sep. 2023. Disponible en: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/eagronegocios/article/view/5654/5806>
- Barragán-Hernández, WA; Cajas-Girón, YS. 2019. Bromatological and structural changes in *Megathyrus maximus* in four silvopastoral arrangement systems (en línea). Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 20(2):245-258. Consultado 19 jul. 2023. Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v20n2/en_0122-8706-ccta-20-02-00231.pdf

- Barro RS; Varella, AC; Lemaire, G; Medeiros, RB; Saibro, JC; Nabinger, C; Bangel, FV; Carassai, IJ. 2012. Forage yield and nitrogen nutrition dynamics of warm-season native forage genotypes under two shading levels and in full sunlight (en línea). *Revista Brasileira de Zootecnia*. 41(7):1589-1597. Consultado 04 nov. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/NZnnjWVVXf4ypmZhbHbdJNv/?format=pdf&lang=en>
- Blanco, JC; Bahamón, CE; Montilla, MA. 2022. Degradación de pasturas y carga animal, una analogía del analfabetismo ganadero (en línea). *FAGROPEC*. 14(1):123-132. Consultado 30 sep. 2023. Disponible en: <https://editorial.uniamazonia.edu.co/index.php/fagropec/article/view/432/588>
- Beck, P; Beck, M; Gunter, S; Biermacher, J; Gillen, R. 2020. Stocking rate impacts performance and economics of grazing beef steers on mixed-grass prairies of the Southern Great Plains (en línea). *Translational Animal Science*. 4(3):1-13. Consultado 29 sep. 2023. Disponible en: <https://academic.oup.com/tas/article/4/3/txaa134/5873415?login=true>
- Betancourt, H; Pezo, D; Cruz, J; Beer, J. 2007. Impacto bioeconómico de la degradación de pasturas en fincas de doble propósito en El Chal, Petén, Guatemala (en línea). *Pastos y Forrajes*. 30(1):169-175. Consultado 03 nov. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269119705005.pdf>
- Bjornlund, V; Bjornlund, H; van Rooyen, A. 2022. Why food insecurity persists in sub-Saharan Africa: A review of existing evidence. *Food Security*. 14(-):845–864. Consultado 02 oct. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12571-022-01256-1#citeas>
- Bretas, I; Valente, D; Silva, F; Chizzotti, M; Paulino, M; D'Áurea, A; Paciullo, D; Pedreira, B. 2021. Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in brachiaria pastures by combining meteorological data and satellite imagery (en línea). *Grass and Forage Science*. 76(3):340-352. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gfs.12517>
- Brown, M. 2000. Cross-Validation Methods (en línea). *Journal of Mathematical Psychology*. 44(1):108–132. Consultado 06 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022249699912798>
- Cabello-Pasini, A; Macías-Carranza, V. 2011. Optical properties of grapevine leaves: reflectance, transmittance, absorptance and chlorophyll concentration (en línea). *Agrociencia*. 45(8):943-957. Consultado 25 jul. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n8/v45n8a7.pdf>
- Calzada-Marín, J; Enríquez-Quiroz, J; Hernández-Gary, A; Ortega-Jiménez, E; Mendoza-Pedroza, S. 2014. Análisis de crecimiento del pasto maralfalfa (*Pennisetum sp.*) en clima cálido subhúmedo (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 5(2):247-260. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v5n2/v5n2a9.pdf>

- Campillo, R; Urquiaga, S; Pino, I; Montenegro, A. 2003. Estimation of biological nitrogen fixation in forage legumes using a ¹⁵N labeling methodology (en línea). *Agricultura Técnica*. 63(2):169-179. Consultado 18 jul. 2023. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072003000200006&script=sci_arttext&tlng=en
- Carangui, A; Faicán, R; Guevara, R; Narváez, J; Torres, C; Ortuño, C; Guevara, G. 2019. Efecto de la composición botánica de pastizales del trópico alto en la conducta de vacas en pastoreo y su producción de leche (en línea). *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal*. 2(3):16-24. Consultado 22 jul. 2019. Disponible en: <http://www.revistaecuatorianadecienciaanimal.com/index.php/RECA/article/view/88>
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 2018. Proyecto Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la Cosecha de Agua en Nicaragua Fase II. Documento de proyecto. Turrialba, Costa Rica. 102 p.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, Brasilia (EMBRAPA). 1999. Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina (en línea). *In* (Eds). Guimarães, E; Sanz, J; Rao, I; Amézquita, M; Amézquita, E. Cali, Colombia: CIAT; Brasilia, DF, Brasil: EMBRAPA. 313 p. Consultado 02 oct. 2023. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18515/43362_51803.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Condori, B; Hijmans, R; Quiroz, R; Ledent, JF. 2010. Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling (en línea). 119(1):135-144. Consultado 06 jun. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429010001723>
- Costa, CM; Difante, GS; Costa, ABG; Gurgel, ALC; Ferreira Jr, MA; Santos, GT. 2021. Grazing intensity as a management strategy in tropical grasses for beef cattle production: a meta-analysis (en línea). *Animal*. 15(4) p.100192. Consultado 7 nov. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731121000331>
- Costa, L; Nunes, L; Ampatzidis, Y. 2020. New visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms (en línea). *Computers and Electronics in Agriculture*. 172 (2020):105334. Consultado 05 jun. 2023. Disponible en: <https://swfrec.ifas.ufl.edu/docs/pdf/precision-ag-eng/2020-172-Ampatzidis-Computers-Electronics-Agriculture.pdf>
- De la Ossa-Lacayo, A; Trujillo-V, S; De la Ossa, J. 2016. La sabana: formación de gran valor productivo (en línea). *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 8(1):120-137. Consultado 02 oct. 2023. Disponible en: <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/view/236/277>

- Díaz-Giraldo, R; Álvarez, M; Rincón, Á; Pérez, O; Cárdenas, E; Posada, W. 2023. Estimation of forage availability and parameters associated to the nutritional quality of *Urochloa humidicola* cv Llanero based on multispectral images (en línea). *Tropical Grasslands-Forrajés Tropicales*. 11(1):61–74. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/view/1202/557>
- Di Rienzo J; Casanoves F; Balzarini M; González L; Tablada M; Robledo C. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Do Carmo, M; Cardozo, G; Jaurena, M; Soca, P. 2019. Demonstrating control of forage allowance for beef cattle grazing Campos grassland in Uruguay to improve system productivity (en línea). *Tropical Grasslands-Forrajés Tropicales*. 7(1):35–47. Consultado 18 sep. 2023. Disponible en: <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/view/391/288>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2018. The State of the World's Forests 2018 - Forest pathways to sustainable development (en línea). Rome. 119 p. Consultado 02 oct. 2023. Disponible en: <https://www.fao.org/3/I9535EN/i9535en.pdf>
- Fortes, D; Herrera, RS; González, S; García, M; Romero, A; Cruz, A. 2009. Comportamiento de los pigmentos fotosintéticos, según la edad de rebrote después del pastoreo de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115 en la estación poco lluviosa (en línea). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 43(2):183-186. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193015425015.pdf>
- Friedman, M. 1996. Nutritional value of proteins from different food sources. A Review (en línea). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 44(1):6-29. Consultado 22 jul. 2023. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jf9400167>
- Galindo, F; Buzetti, S; Teixeira Filho, M; Dupas, E; Ludkiewicz, M. 2017. Application of different nitrogen doses to increase nitrogen efficiency in Mombasa guinea grass (*Panicum maximum* cv. Mombasa) at dry and rainy seasons (en línea). *Australian Journal of Crop Science*. 11(12):1657-1664. Consultado 17 jul. 2023. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/FullTextPDF/2019/20193283056.pdf>
- Galindo, F; Buzetti, S; Teixeira Filho, M; Dupas, E. 2019. Rates and sources of nitrogen fertilizer application on yield and quality of *Panicum maximum* cv. Mombasa (en línea). *IDESIA*. 37(2): 67-73. Consultado 19 jul. 2023. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-34292019000200067&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- García-Cardoso, C; Martínez, R; Tuero, R; Cruz, A M; Romero, A; Estanquero, L; Noda, A; Torres, V. 2009. Evaluación de *Panicum maximum* cv. Mombaza y modelación de indicadores agronómicos durante tres años en un suelo ferralítico rojo típico de la provincia La Habana (en línea). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 43(3):297-306. Consultado 25 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193015481014.pdf>

- García, E; Siles, P; Eash, L; Van Der Hoek, R; Kearney, S; Smukler, S. Fonte, S. 2019. Participatory evaluation of improved grasses and forage legumes for smallholder livestock production in Central America (en línea). *Experimental Agriculture*. 55(5):776-792. Consultado 03 oct. 2023. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/participatory-evaluation-of-improved-grasses-and-forage-legumes-for-smallholder-livestock-production-in-central-america/F27B0AA2543DD6A0996D38B375C7B014>
- Gargiulo, J; Clark, C; Lyons, N; de Veyrac, G; Beale, P; Garcia, S. 2020. Spatial and temporal pasture biomass estimation integrating Electronic Plate Meter, Planet CubeSats and Sentinel-2 Satellite data (en línea). *Agronomy*. 10(5):711. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/19/3222>
- Garzón, EF; Mora, J. 2014. Análisis multicriterio del estado de las pasturas de la hacienda ganadera García Abajo en Corinto (Cauca, Colombia) (en línea). *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*. 61(1):64-82. Consultado 23 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=407639239005>
- Gitelson, A; Kaufman, Y; Stark, R; Rundquist, D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction (en línea). *Remote Sensing of Environment*. 80(1):76–87. Consultado 05 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425701002899>
- Gotlieb, Y; Pérez-Briceño, P; Hidalgo, H; Alfaro, E. 2019. The Central American Dry Corridor: A consensus statement and its background (en línea). *Revista Yu'am*. 3(5):42-51. Consultado 10 may. 2023. Disponible en: <https://www.revistayuam.com/wp-content/uploads/2019/02/Corredor-seco-250219.pdf>.
- Hare, MD; Phengphet, S; Songsiri, T; Sutin, N; Stern, E. 2013. Effect of cutting interval on yield and quality of two *Panicum maximum* cultivars in Thailand (en línea). *Tropical Grasslands – Forrajes Tropicales*. 1(1):87–89. Consultado 18 jul. 2023. Disponible en: <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/view/54/27>
- Hernández-Melchor, G; Hernández-Hernández, M; Sol-Sánchez, A; Rosales-Martínez, F; Hernández-Salinas, G. 2023. Importancia forrajera y nutricional de *Leucaena leucocephala* en sistemas silvopastoriles. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.* 9(17):2140–2152. Consultado 19 jul. 2023. Disponible en: <https://www.camjol.info/index.php/RIBCC/article/view/16400>
- Holdridge, L. 1978. Ecología basa en zonas de vida (en línea). Consultado en 30 may. 2023. San José, Costa Rica. 216 p. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7936/BVE19040225e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Humphrey, A. 1980. Chlorophyll (en línea). *Food Chemistry*. 5(1):57-67. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0308814680900643>

- Iglesias, JM; García, L; Toral, OC. 2015. Comportamiento productivo de diferentes genotipos bovinos en una finca comercial. Ceba final (en línea). Pastos y Forrajes. 38(2): 185-193. Consultado 28 sep. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269139251006>
- Iglesias-Gómez, J; Domínguez-Escudero, J; Wencomo-Cárdenas, Hilda; Olivera-Castro, Y; Toral-Pérez, O; Milera-Rodríguez, M. 2022. Comportamiento agronómico y nutricional de especies mejoradas en un sistema de pastoreo racional Voisin, en Panamá (en línea). Pastos y Forrajes. 45 (E10):1-9. Consultado 18 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/2691/269173684010/html/>
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). 2005. Atlas climático de Nicaragua. Managua, Nicaragua (en línea). Consultado 16 may. 2023. Disponible en: <https://webserver2.ineter.gob.ni/mapas/Nicaragua/clima/atlas/index.html>
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). 2021. 1^{er} Atlas nacional de suelos de la República de Nicaragua 2021 (en línea). Consultado 24 may. 2023. Disponible en: <https://www.ineter.gob.ni/flipatlassuelo-Ord/publicacionflip/atlassuelo.html>
- Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE); Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). 2013 a. IV Censo Nacional Agropecuario. Departamento de Estelí y sus municipios: uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario (en línea). Managua, Nicaragua. 52 p. Consultado 29 may. 2023. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/38160371/esteli-magfor>
- Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE); Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). 2013 b. IV Censo Nacional Agropecuario. Departamento de Madriz y sus municipios: uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario (en línea). Managua, Nicaragua. 71 p. Consultado 29 may. 2023. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/46823639/departamento-de-madriz-y-sus-municipios-magfor>
- Jarma-Orozco, A; Cordero-Cordero, C; Cleves-Leguízamo, J. 2022. Pigmentos fotosintéticos en *Stevia rebaudiana* Bert. en condiciones diferenciales de luz solar y fertilización nitrogenada en invernadero (en línea). Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 13(1):75-88. Consultado 20 jul. 2023. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8202372>
- Jiang, Z; Huete, A; Didan, K; Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band (en línea). Remote Sensing of Environment. 112(10):3833-3845. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425708001971>
- Kumar, L; Mutanga, O. 2018. Google Earth Engine Applications since inception: usage, trends, and potential (en línea). Remote Sensing. 10(10):1509. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1509>

- Lacerda, M; Freitas, K; Silva, J. 2008. Determinação da matéria seca de forrageiras pelos métodos de microondas e convencional (en línea). *Bioscience Journal*. 25(3):185-190. Consultado 20 may. 2023. Disponible en: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6901/4569>
- Lamela-López, L; Amechazurra-Rodríguez, LR; Montejo-Sierra, IL; García-Fernández, D; Lay-Ramos, MT. 2022. Producción de carne bovina a partir de pastos naturales y suplementación con concentrados de harina de plantas proteicas (en línea). *Pastos y Forrajes*. 45(5):1-9. Consultado 28 sep. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269173684005>
- Lemus, R.; Van Der Hoek, R; Newman, YC; Mena, M; Albrecht, KA. 2021. Effects of maturity and drying method on the nutritive value of tropical grasses in Nicaragua (en línea). *In The International Grassland & International Rangeland Kenya 2021 Virtual Congress*, 25-29 October 2021. 4 p. Consultado 03 oct. 2023. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/115977>
- León-Velarde, C; Quiroz, R; Cañas, R; Osorio, J; Guerrero, J; Pezo, D. 2006. LIFE - SIM: Livestock Feeding Strategies Simulation Models. BEEF v.15.1 (en línea). International Potato Center (CIP). Perú. Consultado 25 sep. 2023. Disponible en: <https://cipotato.org/site/inrm/home/downloadmod.htm>
- Liendo, ME; González, AA; Olea, LE; Alegre, A; Suárez, L; Guerineau; Martín, GO; Toll, JR. 2019. Relación Hoja-Tallo en el estado fenológico de floración, en gramíneas naturales y cultivadas del Chaco Occidental Semiárido del departamento Trancas, Tucumán, Argentina (en línea). *Rev. Agron. Noroeste Argent*. 39(1):45-51. Consultado 27 jul. 2023. Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/ranar/v39n1/v39n1a05.pdf>
- Li, W; Sun, Z; Lu, S; Omasa, K. 2019. Estimation of the leaf chlorophyll content using multiangular spectral reflectance factor (en línea). *Plant, Cell & Environment*. 42(11):2945-3165. Consultado 25 jul. 2023. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/pce.13605>
- Liu, H; Huete, A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise (en línea). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 33(2):457-465. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8746027>
- Loayza, H; Calderón, A; Gutiérrez, R; Céspedes, E; Quiroz, R. 2022. Estimación de las concentraciones relativas de clorofila en folíolos de papa (*Solanum tuberosum* L.) utilizando técnicas de reflectancia de la vegetación (en línea). *Ecología Aplicada*. 21(2):91-101. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/341/34174062001/34174062001.pdf>
- Lucero, A; Muñoz, F; Cancino, J; Sotomayor, A; Dube, F; Sáez, K; Villarroel, A; Navarrete, M. 2019. La cobertura arbórea de *Acacia caven* sobre la calidad de la pradera y microclima en un sistema silvopastoril de Chile central (en línea). *Madera y bosques*. 25(2):1-17. Consultado 18 jul. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v25n2/2448-7597-mb-25-02-e2521811.pdf>

- Lussem, U; Bolten, A; Gnyp, M; Jasper, J; Bareth, G. 2018. Evaluation of rgb-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland (en línea). ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 42(3):1215-1219. Consultado 03 ago. 2023. Disponible en: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-3/1215/2018/isprs-archives-XLII-3-1215-2018.pdf>
- Lussem, U; Bolten, A; Menne, J; Gnyp, M; Bareth, G. 2019. Ultra-High spatial resolution UAV-based imagery to predict biomass in temperate grasslands (en línea). ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 42(2):443-447. Consultado 03 ago. 2023. Disponible en: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W13/443/2019/isprs-archives-XLII-2-W13-443-2019.pdf>
- Mahecha, L; Angulo, J; Manrique, L. 2002. Predicción del peso vivo a través del perímetro torácico en la raza bovina Lucerna. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias (en línea). 15(1):88-91. Consultado 13 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2950/295026068009.pdf>
- Marini, F. 2021. Discriminación de trigo y cebada empleando imágenes satelitales ópticas y radar. Estudio de caso: partido de Coronel Rosales (Argentina) (en línea). Investigaciones Geográficas. (104)e60173. Consultado 01 ago. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n104/2448-7279-igeo-104-e60173.pdf>
- Molano, M. 2012. Caracterización nutricional de forrajes tropicales usando espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) (en línea). Tesis MSc. Palmira, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 148 p. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20133/7409506.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mwendia, SW; Ohmstedt, U; Nyakundi, F; Notenbaert, A; Peters, M. 2022. Does harvesting *Urochloa* and *Megathyrsus* forages at short intervals confer an advantage on cumulative dry matter yields and quality? (en línea). Journal of The Science of Food and Agriculture. 102(2):750-756. Consultado 18 jul. 2023. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jsfa.11407>
- Noor, M; Fan, J; Zhang, J; Zhang, C; Sun, S; Gan, L; Yan, X. 2023. Effects of shade stress on growth and responsive mechanisms of Bermudagrass (*Cynodon dactylon* L.) Journal of Plant Growth Regulation. 42(7):4037-4047. Consultado 23 jul. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00344-023-10920-5>
- Obispo, N; Espinoza, Y; Gil, J; Ovalles, F; Rodríguez, M. 2008. Efecto del sombreado sobre la producción y calidad del pasto guinea (*Panicum maximum*) en un sistema silvopastoril (en línea). Zootecnia Tropical. 26(3):285-288. Consultado 20 jul. 2023. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000300027

- Ospina, S; Rush, G; Ibrahim, M; Finegan, B; Casanoves, F. 2009. Composición de los pastizales seminaturales en el sistema silvopastoril de Muy Muy, Nicaragua (en línea). *Agroforestería en las Américas*. 47(-):68-75. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5927/Composicion_de_los_pastizales_seminaturales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Paz, F; Romero, M; Palacios, E; Bolaños, M; Valdez, J; Aldrete, A. 2014. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico (en línea). *Terra Latinoamericana*. 32(3):177-194. Consultado 02 ago. 2023. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v32n3/2395-8030-tl-32-03-00177.pdf> ,
- Pérez, E; Soca, M; Díaz, L; Corzo, M. 2008. Comportamiento etológico de bovinos en sistemas silvopastoriles en Chiapas, México (en línea). *Pastos y Forrajes*. 31(2):161-171. Consultado 28 sep. 2023. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v31n2/pyf06208.pdf>
- Pérez-Cutillas, P; Pérez-Navarro, A; Conesa-García, C; Zema, D; Amado-Álvarez, J. 2023. What is going on within google earth engine? A systematic review and meta-analysis (en línea). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 29(-):100907. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938522002154>
- Pezo, D. 2018 a. Establecimiento y manejo de sistemas intensivos de pastoreo rotacional (en línea). CATIE. Serie técnica – Boletín técnico no. 96. 56 p. 1era. Ed – Turrialba, Costa Rica. Consultado 19 may. 2023. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9226/Establecimiento_y_manejo_de_sistemas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pezo, D. 2018 b. Los pastos mejorados: su rol, usos y contribuciones a los sistemas ganaderos frente al cambio climático (en línea). Serie técnica. Boletín técnico / CATIE No. 91. 58 p. 1^{era} Ed. Turrialba. Consultado 16 jul. 2023. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8753>
- Pezo, D; Ríos, N; Ibrahim, M; Gómez, M. 2018. Silvopastoral Systems for intensifying cattle production and enhancing forest cover: The case of Costa Rica (en línea). Program on Forest. The World Bank. Washington. 77 p. Consultado 10 may. 2023. Disponible en: https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Silvopastoral%20systems_Case%20Study_LEAVES_2018.pdf
- Pham-Duc, B; Nguyen, H; Phan, H; Tran-Anh, Q. 2023. Trends and applications of google earth engine in remote sensing and earth science research: a bibliometric analysis using scopus database (en línea). *Earth Sci Inform*.16(-)2355–2371. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-023-01035-2>
- Posada-Asprilla, W; Medina-Sierra, M; Cerón-Muñoz, M. 2019. Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Morrone) usando imágenes multiespectrales (en línea). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 22(1):1-10. Consultado 27 jul. 2023. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v22n1/0123-4226-rudca-22-01-e1195.pdf>

- Quiroz, R; Loayza, H; Barreda, C; Gavilán, C; Posadas, A; Ramírez, D. 2017. Linking process-based potato models with light reflectance data: Does model complexity enhance yield prediction accuracy? (en línea). *European Journal of Agronomy*. (Netherlands). ISSN 1161-0301. 82 (Part A):104-112. Consultado 06 jun. 2023 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030116302015>
- Ramírez-Ordoñez, S; Rueda, JA; Antonio-Cisneros, CM; Sánchez-Hernández MA; Hernández-Bautista, J. 2022. Yield and quality of Guinea grass cv. Mombasa according to plant spacing and season of the year (en línea). *Agro Productividad*. 15(9):195-203. Consultado 19 jul. 2023. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/FullTextPDF/2022/20220529349.pdf>
- Ramírez, R; Ramírez, RG; López, F. 2002. Factores estructurales de la pared celular del forraje que afectan su digestibilidad (en línea). *Ciencia UANL*. 5(2):180-189. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/76583705>
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Revelo, D; Mejía, J; Montoya-Bonilla, B; Hoyos, J. 2020. Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*) (en línea). *Ingeniería y Desarrollo*. 38(2):298-312. Consultado 02 ago. 2023. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v38n2/2145-9371-inde-38-02-298.pdf>
- Rincón Á; Ligarreto, G. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano (en línea). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 11(2):122-128. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945029003.pdf>
- Rincón, Á; Álvarez, M; Pardo O; Amaya, M; Díaz, R. 2019. Estimating chlorophyll concentration and its relationship with crude protein concentration in three species of *Urochloa*- in the Piedemonte Llanero, Colombia (en línea). *Tropical Grasslands-Forrajeros Tropicales*. 7(5):533-537. Consultado 21 jul. 2023. Disponible en: <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/view/440/373>
- Ríos, L. 2021. Evaluación del rendimiento y calidad de pastos mejorados en asocio con árboles dispersos de *Guazuma ulmifolia* en sistemas doble propósito, Los Santos, Panamá (en línea). Tesis MSc. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Consultado 05 nov. 2023. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/11544/Evaluaci%c3%b3n_del_rendimiento_y_calidad_de_pastos_mejorados.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Ruiz, V; Savé, R; Lanuza, O; Herrera, A; Benavidez, K; Rodríguez, J. 2021. Evolución de la temperatura y precipitación en cuatro estaciones meteorológicas, ubicadas en la región Norcentral de Nicaragua, Centroamérica (en línea). *Revista Científica de FAREM-Estelí Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*. 10(38):197-212. Consultado 16 may 2023. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8845388>

- Santiago-Hernández, F; López-Ortiz, S; Ávila-Reséndiz, C; Jarillo-Rodríguez, J; Pérez-Hernández, P; Guerrero-Rodríguez, J. 2016. Physiological and production responses of four grasses from the genera *Urochloa* and *Megathyrsus* to shade from *Melia azedarach* L (en línea). *Agroforestry Systems*. 90(2):339-349. Consultado 19 jul. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-015-9858-y>
- Schneider-Canny, R; Chekhosvkiy, K; Muñoz, P; Kwon, S; Saha, M. 2019. Characterization of bermudagrass (*Cynodon dactylon* L.) germplasm for nitrogen use efficiency (en línea). *Euphytica*. 215(40):1-14. Consultado 23 jul. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-019-2347-z>
- Silveira Júnior, O; dos Santos, AC; Días, M; Dias, MO; Martins, N. 2017. Productive efficiency of mombasa grass in silvopastoral system under pasture deferment and nitrogen fertilizer (en línea). *Semina: Ciências Agrárias*. 38(5):3307-3318. Consultado 17 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4457/445753229039.pdf>
- Sinde, I; Yáñez, D; Grefa, JL; Arza, M; Gil-Docampo, M. 2020. Estimación del rendimiento del pasto mediante NDVI con imágenes multiespectrales de vehículos aéreos no tripulados (UAV) (en línea). *Revista GEOSPACIAL*. 17(1):25-38. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1640/1357>
- Tassone, S; Mabrouki, S; Barbera, S; Glorio Patrucco, S. 2022. Laboratory analyses used to define the nutritional parameters and quality indexes of some unusual forages (en línea). *Animals*. 12(18):2320. Consultado 01 nov. 2023. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-2615/12/18/2320>
- Van Soest, P. 1994. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd ed. (en línea). Cornell University Press. Ithaca. 476 p. Consultado 16 oct. 2023. Disponible en: https://books.google.co.cr/books/about/Nutritional_Ecology_of_the_Ruminant.html?id=-mwUu6PL1UgC&redir_esc=y
- Velasco, M; Hernández, A; Vaquera, H; Martínez, J; Hernández, P; Aguirre, J. 2018. Growth analysis of (*Panicum maximum* Jacq.) Cv. Mombasa (en línea). *Revista MVZ Córdoba*. 23(S):6951-6963. Consultado 17 jul. 2023. Disponible en: <https://revistamvz.unicordoba.edu.co/article/view/1415/pdf>
- Ventura, J; Santiago, M; Barrera-Martínez, I; Álvarez, P; Carrillo, P; Honorato, J. Caracterización del pasto Mombasa como materia prima para producir bioetanol (en línea). *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*. 12(2):235-46. Consultado 20 jul. 2023. Disponible en: <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2441>
- Verdecia, DM; Ramírez, JL; Leonard, I; García, F. 2009. Potencialidades agroproductivas de dos cultivares de *Panicum maximum* (c.v Mombasa y Uganda) en la provincia Granma (en línea). *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*. 10(5):1-9. Consultado 26 jul. 2023. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/636/63611393003.pdf>

- Villalobos, L; WingChing-Jones, R. 2019. Los pastos estrella africana, kikuyo y “rye grass” en Cartago, Costa Rica: biomasa, composición botánica y nutrientes (en línea). UNED Research Journal. 12(1):e2811. Consultado 22 jul. 2023. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5156/515663758007/html/>
- Walker, BH; Huntley, BJ. 1982. Ecology of tropical savannas (en línea). B.J. Huntley and B.H. Walker (Eds). Berlin; New York: Springer-Verlag. 670 p. Consultado 02 oct. 2023. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ER7yCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=tropical+savannas&ots=GTykMZG2EH&sig=y1fEDi7DsPVMt_MzDvNzUOSzO1U#v=onepage&q=tropical%20savannas&f=false
- Willmott, CJ; 1982. Some comments on the evaluation of model performance (en línea). Bull. Am. Met. Soc. 63(-)1309–1313. Consultado 05 jun. 2023. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/63/11/1520-0477_1982_063_1309_scoteo_2_0_co_2.xml
- Wilson, JR. 1996. Shade-stimulated growth and nitrogen uptake by pasture grasses in a subtropical environment. Australian Journal of Agricultural Research. 47(7):1075-1093. Consultado 20 jul. 2023. Disponible en: <https://www.publish.csiro.au/cp/AR9961075>
- Wu, C; Niu, Z; Tang, Q; Huang, W. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation (en línea). Agricultural and Forest Meteorology. 148(8-9):1230–1241. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192308000920>
- Xavier, D; da Silva, F; Paciullo, D; Urquiaga, S; Alves, B; Boddey, R. 2014. Nitrogen cycling in a Brachiaria-based silvopastoral system in the Atlantic forest region of Minas Gerais, Brazil (en línea). Nutrient Cycling in Agroecosystems. 99(-):45-62. Consultado 20 jul. 2023. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-014-9617-x>
- Xu, X; Liu, L; Han, P; Gong, X; Zhang, Q. 2022. Accuracy of Vegetation Indices in assessing different grades of grassland desertification from UAV (en línea). Int. J. Environ. Res. Public Health. 19(24):16793. Consultado 01 ago. 2023. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9779174/pdf/ijerph-19-16793.pdf>
- Zhang, L; Xing, D; Wang, J; Li, L. 2007. Rapid and non-invasive detection of plants senescence using a delayed fluorescence technique (en línea). Photochemical & Photobiological Sciences. 6(6):635-41. Consultado 24 jul. 2023. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2007/pp/b617893f/unauth>
- Zhao, D; Starks, P; Brown, M; Phillips, W; Coleman, S. 2007. Assessment of forage biomass and quality parameters of bermudagrass using proximal sensing of pasture canopy reflectance (en línea). Grassland Science. 53(1):39-49. Consultado 27 jul. 2023. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1744-697X.2007.00072.x>

Zorogastúa-Cruz, P; Quiroz, R; Garatuza-Payan, J. 2012. Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano-boliviano (en línea). Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 8(2):63-75. Consultado 06 jun. 2023. Disponible en: <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/202/137>

8. ANEXOS

Anexo 1. Productores atendidos por el PCA participantes del estudio.

No.	Nombre	X	Y	Altitud (msnm)	Mombasa (ha)	Seminatural (ha)
1	Sodelva María Oyes Centeno	548044	1476466	725	1	1.65
2	Ricardo Antonio Acuña López	562574	1474493	620	0.25	-
3	Juan Carlos Acuña López	562508	1475049	573	0.31	0.36
4	Pedro Arístides Calero Caballero	561616	1469002	812	0.2	0.38
5	José Ramón Canales Suárez	548599	1477557	725	0.17	0.35
6	Ángel Felipe Osorio Umazor	548286	1477823	720	1.52	0.65
7	Marling Azucena Tercero Morales	558433	1481523	628	0.61	0.19
8	José Andrés Morales Bellorín	558832	1481140	647	0.46	0.25
9	Juan Antonio González Hernández	563198	1475504	579	1.1	-
10	Darling Ramona Valdivia Martínez	551558	1477480	650	0.6	0.3
11	Francisco Javier Centeno Corea	548960	1475459	694	0.54	0.7
12	Endosa Calero Zeledón	558956	1475160	861	0.32	-
13	José Orlando Talavera Olivas	564232	1467409	965	0.44	-
					7.52	4.83

Anexo 2. Número de familias, de especies y de individuos registrados en el estudio.

No.	Familia	No.	Especie	Individuos
1	Anacardiaceae	1	<i>Spondias mombin</i> L.	2
2	Anonaceae	2	<i>Annona squamosa</i> L.	1
3	Bignoniaceae	3	<i>Crescentia alata</i> Kunth	8
		4	<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	2
		5	<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) Nichols	2
4	Bombacaceae	6	<i>Bombacopsis quinata</i> (Jacq.) Dugand	1
		7	<i>Ceiba pentandra</i> L. Gaertn.	1
5	Boraginaceae	8	<i>Cordia collococa</i> L.	2
		9	<i>Cordia dentata</i> poir	3
		10	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pavon)	29
6	Burseraceae	11	<i>Bursera simaruba</i> L. (Sarg)	48
7	Euphorbiaceae	12	<i>Sapium macrocarpum</i> J. Müller Argoviensis	4
8	Fabaceae	13	<i>Acacia pennatula</i> (Schltdl. & Cham.) Benth.	32
		14	<i>Albizia saman</i> (Jacq.) Merr.	13
		15	<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standley	184
		16	<i>Cassia grandis</i> L. f.	28
		17	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	29
		18	<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.)	4
		19	<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	47
		20	<i>Haematoxylum brasiletto</i> Karsten	7
		21	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i> Donn.Sm	3

No.	Familia	No.	Especie	Individuos
		22	<i>Lysiloma auritum</i> (Schltdl.) Benth.	5
		23	<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	1
		24	<i>Senna papillosa</i> (Britton & Rose) H. S. Irwin & Barneby	7
		25	<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H. S. Irwin & Barneby	1
9	Meliaceae	26	<i>Cedrela odorata</i> L.	15
10	Moraceae	27	<i>Ficus insipida</i> Willd	1
11	Myrtaceae	28	<i>Psidium guajava</i> L.	1
12	Picramniaceae	29	<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm	63
13	Polygonaceae	30	<i>Neomillspaughia paniculata</i> (Donn.Sm.) S.F.Blake	2
14	Rhamnaceae	31	<i>Karwinskia calderonii</i> Standley	52
15	Rubiaceae	32	<i>Genipa americana</i> L.	1
16	Rutaceae	33	<i>Zanthoxylum belicense</i> Lundell	2
17	Salicaceae	34	<i>Salix babylonica</i> L.	6
18	Simaroubaceae	35	<i>Simarouba amara</i> L.	2
19	Sterculiaceae	36	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam	25
			Total general	634

Anexo 3. Parámetros de la estructura horizontal de los SSP.

Especie	N/ha	AR _i	FR _i	DR _i	IVI
<i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standley	15.21	29.02	6.48	23.31	19.60
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb	2.40	4.57	7.41	12.01	8.00
<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm	5.21	9.94	8.33	5.36	7.88
<i>Karwinskia calderonii</i> Standley	4.30	8.20	5.56	5.87	6.54
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam	2.07	3.94	6.48	8.57	6.33
<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	3.88	7.41	7.41	4.02	6.28
<i>Bursera simaruba</i> L. (Sarg)	3.97	7.57	6.48	2.57	5.54
<i>Acacia pennatula</i> (Schltdl. & Cham.) Benth.	2.64	5.05	5.56	4.08	4.89
<i>Cassia grandis</i> L. f.	2.31	4.42	4.63	4.44	4.50
<i>Cedrela odorata</i> L.	1.24	2.37	1.85	6.79	3.67
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pavon)	2.40	4.57	4.63	1.59	3.60
<i>Albizia saman</i> (Jacq.) Merr.	1.07	2.05	2.78	4.24	3.02
<i>Crescentia alata</i> Kunth	0.66	1.26	1.85	2.96	2.03
<i>Salix babylonica</i> L.	0.50	0.95	0.93	3.15	1.67
<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.)	0.33	0.63	0.93	3.33	1.63
<i>Haematoxylum brasiletto</i> Karsten	0.58	1.10	1.85	0.63	1.20
<i>Senna papillosa</i> (Britton & Rose)H.S.Irwin&Barneby	0.58	1.10	1.85	0.52	1.16
<i>Lonchocarpus minimiflorus</i> Donn.Sm	0.25	0.47	2.78	0.15	1.13
<i>Cordia collococa</i> L.	0.17	0.32	1.85	1.08	1.08
<i>Cordia dentata</i> poir	0.25	0.47	1.85	0.44	0.92
<i>Sapium macrocarpum</i> J. Müller Argoviensis	0.33	0.63	1.85	0.19	0.89
<i>Ficus insipida</i> Willd	0.08	0.16	0.93	1.50	0.86
<i>Simarouba amara</i> L.	0.17	0.32	1.85	0.20	0.79

Especie	N/ha	AR_i	FR_i	DR_i	IVI
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) Nichols	0.17	0.32	1.85	0.09	0.75
<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	0.17	0.32	1.85	0.04	0.74
<i>Ceiba pentandra</i> L. Gaertn.	0.08	0.16	0.93	1.03	0.70
<i>Lysiloma auritum</i> (Schltdl.) Benth.	0.41	0.79	0.93	0.32	0.68
<i>Psidium guajava</i> L.	0.08	0.16	0.93	0.57	0.55
<i>Zanthoxylum belicense</i> Lundell	0.17	0.32	0.93	0.37	0.54
<i>Spondias mombin</i> L.	0.17	0.32	0.93	0.31	0.52
<i>Neomillspaughia paniculata</i> (Donn.Sm.) S.F.Blake	0.17	0.32	0.93	0.01	0.42
<i>Bombacopsis quinata</i> (Jacq.) Dugand	0.08	0.16	0.93	0.07	0.39
<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H. S. Irwin & Barneby	0.08	0.16	0.93	0.07	0.38
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	0.08	0.16	0.93	0.06	0.38
<i>Genipa americana</i> L.	0.08	0.16	0.93	0.03	0.37
<i>Annona squamosa</i> L.	0.08	0.16	0.93	0.02	0.37
Total		100.00	100.00	100.00	100.00