

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA E INORGÁNICA SOBRE LA
PRODUCTIVIDAD, VALOR NUTRICIONAL, EMISIONES DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO Y DESARROLLO DEL PASTO ESTRELLA (*CYNODON*
NLEMFUENSIS VANDERYST) EN COSTA RICA.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrados
en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Doctorado
Académico en Ciencias Agrícolas

MARVIN JAROHT SOLANO LÓPEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2024

DEDICATORIA

A mi esposa, Mildred Sandoval, y a mis hijos, Mauriel Jaroth y Maureth Ariana, por ser siempre una fuente inagotable de apoyo e inspiración a lo largo de todo este proceso.

A mis padres Maura López, Marvin Solano y mi hermano Mauriel Solano por siempre brindarme el apoyo y la guía para lograr conseguir las metas propuestas

A mi tía Rosa, mi abuelo Daniel y mis primos, por siempre estar pendiente para apoyarme en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Luis Villalobos por ser un excelente guía y amigo a lo largo de todo el programa doctoral.

A los profesores Danilo Pezo y Jorge Elizondo por su guía como lectores y guías durante la elaboración de la tesis

Al profesor Javier Monge, la profesora Catalina Salas, por su apoyo durante todo este proceso.

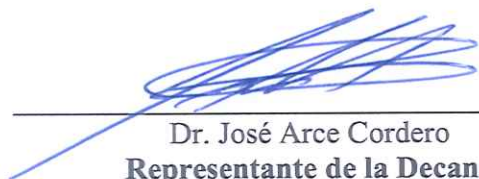
Al profesor Roberto Quiroz, por su apoyo durante la pasantía realizada en CATIE, por su guía y consejos.

Al servicio alemán de intercambio académico (DAAD), por su apoyo incondicional con la beca otorgada para cursar el programa de doctorado, quienes hacen una labor que ayuda a formar profesionales que impactan de forma positiva en el mundo.

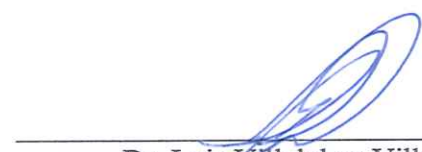
Al Sistema de Estudios de Posgrado y al Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas por abrirme la posibilidad de cursar el Doctorado.

A la Escuela de Zootecnia de la Universidad de Costa Rica y a la Estación Experimental de Ganado Lechero Alfredo Volio Mata y al Centro Investigación Nutrición Animal por haberme permitido usar sus equipos, áreas e instalaciones para la realización de la tesis.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Doctorado Académico en Ciencias Agrícolas



Dr. José Arce Cordero
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**



Dr. Luis Villalobos Villalobos
Director de Tesis



Dr. Danilo Pezo Quevedo
Asesor



Dr. Jorge Alberto Elizondo Salazar
Asesor



Dra. Catalina Salas Durán
Directora

Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales



Marvin Jaroht Solano López
Candidato

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Situación ganadera en Costa Rica.....	4
3.2 Pasturas en Costa Rica.....	6
3.3 Fertilización en pasturas	10
3.4 Uso de abonos orgánicos en pasturas.....	12
3.5 Uso de biofertilizantes en pasturas.....	14
3.6 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en ganadería	15
5. CAPÍTULO 1. RESPUESTA FENOLÓGICA Y PRODUCTIVA DEL PASTO ESTRELLA AFRICANA (CYNODON NLEMFUENSIS VANDERYST.) A LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA E INORGÁNICA	18

6. CAPÍTULO 2. VALOR NUTRICIONAL DEL PASTO ESTRELLA AFRICANA FERTILIZADA CON FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS	56
7. CAPÍTULO 3. EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN PASTO ESTRELLA AFRICANA TRATADO CON FERTILIZACIÓN ORGÁNICA O INORGÁNICA.....	91
8. DISCUSIÓN.....	132
9. CONCLUSIONES.....	141
10. BIBLIOGRAFÍA	143

RESUMEN

Introducción: La fertilización es utilizada para mejorar los índices productivos de las especies forrajeras para la alimentación animal, con miras a lograr niveles de producción de leche y carne acordes al sistema productivo. **Objetivo:** Analizar el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre la productividad, valor nutricional, emisiones de gases de efecto invernadero y desarrollo del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en Costa Rica. **Área de estudio:** El estudio se realizó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en el Alto de Ochomogo en la provincia de Cartago (9°55'10' N, 83°57'20''O), a una altitud de 1542 m.s.n.m., con una precipitación media anual de 2050 mm (distribuida de mayo a octubre), temperatura media anual de 19,1°C (máxima 23,6 °C y mínima 14,5 °C) y humedad relativa media de 84%. **Metodología:** Se utilizó un diseño en 3 bloques completos aleatorizados (DBCA), fue analizado mediante un modelo lineal generalizado que incluyó días de rebrote, año y fertilización como factores principales. Además, se analizó la producción de gas *in vitro* mediante la construcción de modelos de regresión lineal múltiple y se estimó CH₄ entérico y nitrógeno excretado utilizando el simulador LIFE-SIM. **Resultados:** Los fertilizantes evaluados no afectaron ($p > 0,05$) las variables analizadas, pero se observó un comportamiento positivo a favor de los tratamientos inorgánicos en algunos indicadores. La urea protegida con azufre resultó generó mayor producción de biomasa fresca (15 813 kg ha⁻¹) y seca (3 649 kg ha⁻¹) y mayor altura de la planta (47,29 cm). El tratamiento de purines presentó mayor número de hojas promedio (7,17 hojas planta⁻¹) y el nitrato de amonio mostró mayor capacidad de cobertura (571,83 rebrotes m⁻²), mayor proporción de hojas (56%), menor proporción de tallos y material senescente (36 % y 9%, respectivamente). El tipo de fertilizante no afectó ($p > 0,05$) las variables de calidad nutritiva de la pastura. En cambio, la edad de rebrote no incidió en las variables productivas y nutricionales, mostrando significancia ($p < 0,05$) para el contenido de materia seca (MS), proteína cruda (PC) y digestibilidad *in vitro* de la MS (DIVMS), con valores más altos para la edad de rebrote de 45 días. Las variables α FDN, FDA, LDA, ED, EM y EN_L aumentaron conforme aumentó la edad de rebrote y las variables DIVFDN y TDN disminuyeron al aumentarse dicho factor. La producción de gas *in vitro* no mostró diferencias entre los tratamientos de fertilización ($p > 0,05$), el modelo de regresión lineal identificó un efecto lineal positivo para las variables α FDN, MS, el fertilizante y negativas para DIVMS y la edad de rebrote. Con relación a los flujos de CH₄ y CO₂, no se evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). Las simulaciones con LIFE-SIM indicaron que el tratamiento de *Azospirillum* produjo mayor producción de CH₄ entérico. **Conclusión:** Los fertilizantes evaluados mostraron efectos diversos con relación a las variables nutricionales, productivas y de emisión de gases; en cambio, la edad de rebrote fue el factor con mayor influencia sobre diferentes características de las pasturas.

ABSTRACT

Introduction: Fertilization is used to improve the productivity of forage species for animal feed, thus achieving milk and meat production with the production system accordingly.

Objective: To analyze the effect of organic and inorganic fertilization on forage mass, nutritional value, greenhouse gas emissions and development of African Stargrass (*Cynodon nlemfuensis*) in Costa Rica.

Study area: The study was conducted at the Alfredo Volio Mata Experimental Station (EEAVM) of the University of Costa Rica, located in Alto de Ochomogo, Cartago province (9°55'10' N, 83°57'20"W), at an altitude of 1542 m.a.s.l. The average annual rainfall is 2050 mm (from May to October), the average annual temperature 19.1 °C (maximum 23.6 °C and minimum 14.5 °C) and average relative humidity of 84%.

Methodology: A randomized complete block design (RCBD) was used and was analyzed using a generalized linear model that included days of regrowth, year, and fertilizer as main factors. In addition, *in vitro* gas production was analyzed by constructing multiple linear regression models. Enteric CH₄ production and nitrogen excretion were estimated using the LIFE-SIM simulator.

Results: Fertilizer treatments did not affect ($p > 0.05$) the variables, but there was a positive behavior in favor of inorganic treatments in some indicators. Sulfur-protected urea showed higher fresh (15,813 kg ha⁻¹) and dry forage biomass yields (3,649 kg ha⁻¹) and greater plant height (47.29 cm). Plants receiving slurry showed a higher number of leaves (7.17 leaves plant⁻¹) and ammonium nitrate showed higher cover capacity (571.83 shoots m⁻²), higher proportion of leaves (56%), and lower proportion of stems and senescent material (36% and 9%, respectively). The results indicate that there was no effect of fertilizer type ($p > 0.05$) on pasture nutritional variables. Days of regrowth, however, had significant ($p < 0.05$) effects on productive and nutritional variables; showing higher dry matter (DM), crude protein (CP) and *in vitro* DM digestibility (IVDMD) values when harvested at 45 days of regrowth. α NDF, ADF, ADL, DE, ME and NEL increased with days of regrowth, whereas fiber digestibility (NDFD) and total digestible nutrients (TDN) showed the opposite trend. *In vitro* gas production showed no differences due to fertilization treatments ($p > 0.05$), with positive linear correlations between α NDF and DM with fertilizers, and negative correlations between IVDMD and days of regrowth. In relation to CH₄ and CO₂ fluxes, there were no statistical differences between treatments ($p > 0.05$). LIFE-SIM simulations indicated that the *Azospirillum* treatment produced higher enteric CH₄ emissions ($p < 0.05$).

Conclusions: Fertilizer treatments showed diverse effects in relation to nutritional and productive variables and gas emissions; whereas days of regrowth was the most influential factor on the different pasture characteristics evaluated.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición nutritiva de pasto estrella en diferentes países	9
 Capítulo 1. Respuesta fenológica y productiva del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) a la fertilización orgánica e inorgánica.	
Cuadro 1. 1. Análisis químico de suelo realizado en el área experimental previo al inicio de los muestreos en 2019 y 2021.....	25
Cuadro 1. 2. Fechas y días de rebrote a la cosecha del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) en Cartago (Costa Rica).....	26
Cuadro 1. 3. Producción de biomasa fresca y seca, número de hojas, altura del dosel y densidad de rebrotes del pasto Estrella Africana	29
 Capítulo 2. Valor nutricional del pasto estrella africana con fuentes de fertilización orgánica e inorgánica	
Cuadro 2. 1. Fechas y días de rebrote a la cosecha del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) en Cartago (Costa Rica).....	62
Cuadro 2. 2. Materia seca (MS), proteína cruda (PC), carbohidratos no fibrosos (CNF), total de nutrimentos digestibles (TDN) y cenizas (Cen) del del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) tratado con cinco fertilizantes.....	65
Cuadro 2. 3. Lignina, fibra (ácida y neutra), digestibilidades y componentes energéticos del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) tratado con cinco fertilizantes. ...	66
Cuadro 2.4. Componentes nutricionales del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) por edades de rebrote.....	67

Cuadro 2. 5. Digestibilidades y expresiones de energías del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) por edades de rebrote68

Capítulo 3. Emisión de gases de efecto invernadero en pasto estrella africana tratado con fertilización orgánica inorgánica

Cuadro 3. 1. Fechas y días de rebrote a la cosecha del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) en Cartago (Costa Rica).....97

Cuadro 3. 2. Datos del tipo racial y parámetros productivos utilizados en el LIFE-SIM .104

Cuadro 3. 3. Datos de la dieta complementaria usada en LIFE-SIM 105

Cuadro 3. 4. Emisiones (kg ha⁻¹) biomasa, emisión de CO₂, CH₄, N₂O tasa de emisión CO₂eq (kg CO₂eq kg MS⁻¹) según fuente de fertilización para el pasto estrella africana 108

Cuadro 3. 5. Estimación de la emisión de CH₄ (kg) y el nitrógeno excretado (kg) por lactancia de 305 días, para cada uno de los tratamientos de fertilización en pasto estrella, utilizando el modelo LIFE-SIM..... 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1. Respuesta fenológica y productiva del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) a la fertilización orgánica e inorgánica

Figura 1. 1. Biomasa fresca del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes.31

Figura 1. 2. Biomasa seca del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes32

Figura 1. 3. Altura del dosel en pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes.33

Figura 1. 4. Número de hojas por rebrote del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes.....34

Figura 1. 5. Densidad de rebrotes del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes.....35

Figura 1. 6. Componentes estructurales del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes.....36

Capítulo 3. Emisión de gases de efecto invernadero en pasto estrella africana tratado con fertilización orgánica inorgánica

Figura 3. 1. Anillo empleado para el acople de las cámaras de los equipos LI-8100 ® y LI-7810 ®.98

Figura 3. 2. Cámara cerrada sobre anillo en parcela experimental.99

Figura 3. 3. Tasa de emisión (kg CO₂eq kg MS⁻¹) con cinco fertilizantes. 109

Figura 3. 4. Producción de gas in vitro (ml/g MS) del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.) con cinco fertilizantes.....	110
Figura 3. 5. Producción de gas in vitro (ml/g MS) del pasto estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.)	111
Figura 3. 6. Relación entre las variables: Edad de rebrote, materia seca (MS), fibra detergente neutra tratada con amilasa (α FDN), digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) y la producción de gas in vitro (ml/g MS).....	112

LISTA DE ABREVIATURAS

1. CH₄: Metano
2. Cen: Cenizas
3. CNF: Carbohidratos no fibrosos
4. CO₂: Dióxido de carbono
5. CO₂eq: Carbono equivalente
6. DIVMS: Digestibilidad in vitro de la materia seca
7. ED: Energía digestible
8. EM: Energía metabolizable
9. ENL: Energía neta de lactancia
10. FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
11. FDA: Fibra detergente ácida
12. FDN: Fibra detergente neutra
13. GEI: Gases de efecto invernadero
14. IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
15. LDA: Lignina detergente ácido
16. LIFE-SIM: Modelo de simulación de estrategias de alimentación del ganado
17. MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería
18. MS: Materia seca
19. N₂O: Óxido nitroso
20. PC: Proteína cruda

I. INTRODUCCIÓN

La actividad pecuaria constituye un rubro fundamental en la economía de los países, ya que aporta cerca del 46% en relación con el producto interno bruto agropecuario, con una tasa anual de crecimiento del 3,7%, superior a la tasa promedio mundial (FAO, 2021, 2023). Sin embargo, esta actividad se ve afectada por la baja productividad de los sistemas de producción ganaderos, los cuales presentan baja disponibilidad y calidad de los forrajes, además de problemas de degradación del suelo, lo cual conlleva a tener sistemas ganaderos menos competitivos y a un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) proveniente del sector (Rojas et al., 2011).

Los problemas que enfrenta el sector ganadero han promovido la necesidad de realizar transformaciones en los sistemas productivos, debiendo enfocarse en la aplicación de principios agroecológicos, que integren distintos componentes para optimizar su desarrollo. Este enfoque resalta la importancia de la dinámica del ecosistema pastura, así como las interacciones entre los componentes suelo, ganado y clima con las emisiones de GEI (Salas y Cabalceta, 2014; Silva y Jaramillo, 2022).

En Costa Rica los sistemas de producción lechera son mayormente de tipo intensivo, que dependen de la producción de biomasa forrajera y de concentrados para alimentar a las vacas lecheras (Holmann *et al.*, 2007; Vargas-Leitón *et al.*, 2013). En el país existen zonas con capacidad de producir alimento durante todo el año, siempre que exista un buen régimen de precipitación y cambios de poca intensidad a lo largo del año, esto hace del país un lugar con

condiciones adecuadas para producir alimento y cubrir las necesidades de materia seca del hato (Villalobos *et al.*, 2015).

Para asegurar la productividad de las pasturas en el largo plazo es necesaria la utilización de fertilizantes, entre los que se destaca el uso de nitrógeno (N) y fósforo (P), nutrientes que pueden perderse y fijarse en el suelo, afectando la rentabilidad de las explotaciones agropecuarias y causando diversos daños al ecosistema de producción (Rojas *et al.*, 2011; Gutiérrez *et al.*, 2023).

A pesar de la importancia del uso de fertilizantes y que su uso en las pasturas es una práctica común en el país, existe poca información sobre el uso de diferentes tipos de fertilización , es por ello que esta investigación se enfocó en determinar el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica y la edad de rebrote sobre la productividad, fenología, valor nutricional y emisiones de gases de efecto invernadero en el pasto estrella africana bajo un sistema de corte y acarreo en la Estación Experimental de Ganado Lechero Alfredo Volio Mata de la Universidad de Costa Rica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica y edad de rebrote sobre el desarrollo, productividad, valor nutricional y emisión de gases de efecto invernadero en pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst.*) en Costa Rica.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del tipo de fertilización y edad de rebrote sobre la producción de biomasa del pasto Estrella Africana.
- Analizar el efecto del tipo de fertilización y edad de rebrote sobre el desarrollo de la planta basado en la estructura, morfología, fenología y la capacidad de rebrote de pasto estrella africana.
- Analizar el efecto del tipo de fertilización y edad de rebrote sobre el valor nutricional del pasto estrella africana.
- Estudiar el efecto del tipo de fertilización y edad de rebrote sobre el potencial de emisiones de gases de efecto invernadero (N₂O y CH₄) en el pasto estrella africana.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

En el último medio siglo, la población humana ha aumentado significativamente, lo que ha ocasionado un aumento de la demanda global de productos pecuarios, particularmente leche y carne bovina, además se estima que esta, puede aumentar hasta en un 70% para el 2050, lo que indica que el sector pecuario debe mejorar sus procesos productivos para satisfacerla. Este incremento en la producción implica que los sistemas agropecuarios deben optimizar su productividad, para satisfacer la demanda y aportar a la seguridad alimentaria y a la economía del sector, sin tener que expandir las áreas en pasturas a expensas del bosque (FAO, 2009; Hanrahan *et al.*, 2018; Pezo *et al.*, 2018).

Los sistemas de producción de leche representan un gran aporte en la nutrición y medios de vida de millones de personas, además, realizan un aporte importante a la economía de las familias productoras y son cruciales en la generación de productos que dinamizan las economías locales (OCDE-FAO, 2023). En los sistemas de producción ganadera, la alimentación basada en el pastoreo es la forma más eficiente y económica de convertir materia vegetal en productos de gran valor, como leche, carne y sus derivados (FAO, 2011).

3.1 Situación ganadera en Costa Rica

En Costa Rica, la producción lechera cuenta con más de 60 años de desarrollo continuo y actualmente se caracteriza por haber alcanzado un alto grado de tecnificación. A nivel de producción primaria, los productores de leche desde hace muchos años han venido mejorando

la calidad genética del hato lechero, el manejo de pastos y han implementado el uso tecnologías apropiadas para el ordeño (FAO, 2011).

En el país, el consumo per cápita de leche para el 2016 fue estimado en 217,15 litros, con una producción anual de 1 138 toneladas métricas de leche, lo que además ha resultado en un incremento en las exportaciones, las que llegaron a 92,30 miles de toneladas y 142,32 millones de dólares para el año 2016 (Coto, 2018).

Holmann et al. (2007) reportó que, en un lapso de 20 años, la producción de leche se había incrementado a una tasa anual promedio de 2,5%, mientras que la ganadería cárnica había decrecido a una tasa del 0,1% durante el mismo periodo, datos más recientes (FAOSTAT, 2023) evidencian que esas tendencias se han mantenido en los últimos años. Esta producción de leche proviene de diferentes regiones del país, siendo de mayor importancia la Huetar Norte, Chorotega y Central. Las razas lecheras más utilizadas en el país son Holstein y Jersey, ambas suman el 80% del hato lechero especializado. No obstante, también hay presencia de las razas Guernsey y Pardo Suizo (MAG, 2007).

En el país existen 37 171 fincas ganaderas, siendo la provincia de Alajuela donde se concentra la mayor cantidad, cuya actividad principal es el ganado vacuno, con un total de 7 933 fincas (INEC, 2015). El hato nacional es de 1 509 011 cabezas de ganado vacuno, de las cuales el 61,7% es ganado de carne, 22,4% ganado doble propósito, 15,8% ganado de leche y 0,1% de bovinos destinado para trabajo (INEC, 2022).

La región Huetar Norte es la primera productora de leche del país, y la segunda en términos de población, concentrando la mayor cantidad de ganado a nivel nacional. En esta región, un 54% de las explotaciones se dedican solamente a la producción de carne, un 12% solamente a leche y el 34% restante a la ganadería de doble propósito. La actividad pecuaria enfocada a la producción de carne y leche bovina representan el 1,3% del Producto Interno Bruto (PIB) y aportan el 17,6% del valor agregado de la producción agropecuaria, siendo el tercer rubro de mayor importancia en el país (MAG, 2007; Vargas-Leitón et al., 2013).

La actividad lechera aporta unos 30 000 empleos directos en la fase primaria de la agro cadena, 3720 en la fase industrial y cuenta con 5 000 proveedores para un total de 38 720 empleos directos a lo largo de la cadena, sin contar la distribución y venta de leche; pero además genera aproximadamente 143 550 empleos indirectos (Barrientos y Villegas, 2010).

La mayoría de los productores con sistemas de lechería especializada, ya sean pequeños, medianos o grandes, forman parte del sector formal (industrias lácteas), cuentan con ordeño automático y aplican técnicas higiénicas de producción, suplementación alimenticia y uso de pasturas mejoradas; mientras que muchos lecheros medianos y pequeños del denominado sector informal aún realizan el ordeño de forma manual, y por lo general aplican prácticas de manejo tradicional (Barrientos y Villegas, 2010).

3.2 Pasturas en Costa Rica

El pasto es un componente fundamental en las fincas lecheras, y se puede aumentar la productividad de la finca con el uso de prácticas de manejo y fertilización eficientes

(Hanrahan et al., 2018). En general, las pasturas cultivadas en el trópico contienen valores nutricionales inferiores a las de zonas templadas, y durante el período seco presentan un contenido proteico típicamente bajo y una proporción de pared celular alta que limitan la producción de proteína microbiana en el rumen y el consumo voluntario (Pérez *et al.*, 2001; Villarreal et al., 2006).

En América Central se estima que el 46% del área se encuentra en pasturas (18,4 millones ha), siendo el uso de tierra más importante en la región (Muerguitio y Ibrahim, 2001). En Costa Rica se han implementado políticas que promueven incentivos forestales y la concientización del sector en torno al cambio climático, lo cual ha impulsado el aumento de las áreas forestales y la intensificación del uso de las áreas dedicadas a la ganadería, enfocando sus prácticas en establecer sistemas ganaderos sostenibles, esto ha impactado sobre la disminución de áreas de pasturas en el país en los últimos años (Pezo *et al.*, 2018), se estima que el 43,4% del área de las fincas del país, se encuentran cubiertas por pastos, lo que equivale a 1 044 909,7 ha⁻¹. De este total, el 53,3% corresponde a pasturas naturalizadas, el 44,6% pasturas mejoradas y 2,1 % a pastos usados para corte (INEC, 2015).

En Centroamérica, se estima que entre el 50 y 80% de total de pasturas están degradadas (CATIE, 2002), con una tasa anual de degradación del 12% y la tasa anual de renovación del 5%. La degradación conduce a problemas ecológicos, pues se reduce la capacidad para capturar y acumular carbono, aumenta la emisión de CH₄ por kilogramo de producto animal, promueve la pérdida de biodiversidad y se incrementa la erosión y la compactación de suelos (Holmann et al., 2004; Betancourt, 2006; Betancourt et al., 2007; Pezo, 2017). Este proceso

se da cuando se usan cargas mayores a las que soporta la pastura y consecuentemente se manifiestan problemas de sobrepastoreo, erosión, pérdida de capacidad productiva de biomasa, ocasionando incremento de pasturas degradadas, esto ejerce impactos negativos sobre el balance hídrico del suelo, reduce la infiltración de agua por la compactación, incrementa la erosión y tiene efectos negativos sobre la capacidad de retención de humedad en el suelo (Pomareda y Steinfeld, 2000; Holmann *et al.*, 2004; Acosta *et al.*, 2014).

El uso de pastos para la producción de leche es fundamental, ya que es una fuente económica de nutrientes (Gutiérrez, 2017). En Costa Rica, por muchos años la ganadería de leche, especialmente en zonas intermedias y altas, ha estado basada en pasturas perennes de especies como estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) y Kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*), distribuidos en potreros pequeños (desde 300 metros cuadrados), usando diferentes arreglos para los sistemas de rotación de pasturas (MAG, 2007).

El pasto estrella africana es uno de los pastos de mayor importancia para la producción láctea en el país, por su adaptabilidad a climas tropicales y subtropicales (0 a 2000 m.s.n.m) y tolerancia a pH del suelo de hasta 4,5 (Peters *et al.*, 2011; Tropical Forages, 2023). Este pasto se caracteriza por ser perenne, con hábito de crecimiento estolonífero. El crecimiento de sus estolones se realiza a nivel del suelo y emiten tallos aéreos, suaves, robustos y delgados, sus hojas son simples y alternas, su inflorescencia es un verticilo de espigas delgadas y flexibles de colores verdes manchadas de rojo o púrpura (Nilsson *et al.*, 2005). Esta gramínea no es exigente en cuanto a la humedad y tolera la sequía siempre que no sea superior a los cuatro

meses y se adapta bien a condiciones de precipitación de hasta 4500 mm anuales (Rodríguez y Elizondo, 2012).

En el Cuadro 1, se observa datos relacionados a las propiedades nutricionales del pasto estrella africana en diferentes países de América Latina. Se evidencia una variación de los porcentajes en función del país; sin embargo, muchas de las diferencias pueden atribuirse a factores como condiciones climáticas, manejo, fertilización y edad de rebrote.

Cuadro 1. Composición nutritiva de pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) en diferentes países.

País	PC %	MS %	DIVMS %	FDN %	FDA %	EM Mcal Kg ⁻¹	Ca g/kg	P g/kg
México	16,90		61,30	45,40	35,51	1,81		
Cuba	12,21	21,26		63,04	47,26		0,30	0,34
Costa Rica	20,27	23,57	68,02	64,21	34,95	0,78		
Costa Rica	15,35	22,35		71,55	39,95			
Colombia	14,40		63,3	66,20	35,50	1,70		
Colombia	11,90			65,78	32,02	2,22		
Colombia	17,17	22,97		68,91	38,65			
Venezuela	13,83							
Brasil	13,95	16,46		69,34	33,36			
Promedio	14,46	22,53	64,20	63,58	37,69	1,62	0,30	0,34

Fuentes: (Sánchez y Soto, 1998; Maya *et al.*, 2004; Favoreto *et al.*, 2008; Diaz *et al.*, 2009; Borges *et al.*, 2012; Villalobos y Arce, 2014; Gómez y Campos, 2016).

3.3 Fertilización en pasturas

Solano-López y Villalobos-Villalobos (2022) investigaron sobre el uso de la fertilización nitrogenada y orgánica sobre la producción y calidad de pastos del género *Cynodon*, encontrando que con más frecuencia se usa fuentes nitrogenadas como fertilizante principal; también indican que se utilizan fertilizantes orgánicos como compost, purines y vermicompost, así como bacterias del género *Azospirillum*, las cuales fijan nitrógeno en las pasturas. Se evidenció que el uso de fertilizante nitrogenado oscila entre 25 hasta 400 kg de N ha⁻¹, así mismo reportan efectos variados en relación con el uso de las distintas fuentes de fertilización, las cuales presentan comportamientos diversos tanto en la producción de biomasa, como en la composición nutricional de la pastura.

En Argentina, Méndez *et al.* (2019) analizando el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y composición de *Cynodon plectostachyus*, usando tratamiento control sin fertilización y dos tratamientos con aplicaciones de 40,5 y 81,0 kg de N ha⁻¹, observaron que la biomasa seca fue mayor hasta en un 40% por el uso de nitrógeno en la pastura y 20% para el caso de la proteína en relación al tratamiento control; en cambio, la fibra detergente neutra no fue afectada por la fertilización nitrogenada.

Arteaga *et al.* (2019) evaluaron la eficiencia agronómica del nitrógeno en la producción de *Cynodon plectostachyus* (*K. Schum.*) Pilg. usando cuatro dosis de fertilización (50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹) y dos edades de cosecha (40 y 45 días). Ellos obtuvieron una mayor producción de materia seca (kg ha⁻¹), cuando usaron 200 kg N ha⁻¹ y una edad de cosecha de 45 días.

Villarreal *et al.* (2006) analizaron cuatro dosis de fertilización nitrogenada (0, 250, 500 y 750 kg N ha⁻¹) en pasto estrella africana, encontrando que con altas dosis de nitrógeno se obtienen menores porcentajes de materia seca, pared celular y nitrógeno insoluble en la planta, pero aumentó la digestibilidad.

En Cuba se estudió el efecto de la fertilización nitrogenada (0 y 50 kg N ha⁻¹ ciclo⁻¹) en el crecimiento y desarrollo de los componentes morfológicos del pasto estrella africana en ambas estaciones del año, con mediciones semanales del rendimiento de materia seca de hojas y tallos. En ambas épocas del año, no se detectó significancia para la interacción fertilización x edad. Se observó valores más altos de rendimiento en la 11^a y 12^a semanas, con 1,18 y 2,90 t de MS ha⁻¹ en época seca y 2,73 y 5,37 t de MS ha⁻¹ en época lluviosa, además se observó que el largo de la hoja, ancho, área, largo del entrenudo y diámetro aumentaron ($p < 0,05$) cuando se suministró nitrógeno y se aumentó la edad de rebrote (Del Pozo *et al.*, 2004).

Echeverri *et al.* (2010) realizaron evaluación de parámetros productivos y agronómicos del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, ahora *Kikuyuochloa clandestina*) evaluando tres combinaciones de fertilización (50 kg N ha⁻¹ de fertilizante inorgánico; 25 kg N ha⁻¹ más 200 Kg ha⁻¹ de fertilizante orgánico y 25 kg N ha⁻¹ más 300 kg ha⁻¹ de fertilizante orgánico), no encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$), para la producción de forraje verde y relación hoja-tallo, entre los tres tratamientos de fertilización.

3.4 Uso de abonos orgánicos en pasturas

En Costa Rica, Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021) investigaron sobre el uso de purines como una alternativa de fertilización orgánica en pasto estrella africana, y analizaron el uso de compost, purines y urea (46 % de N) con dosis constante de 250 kg ha⁻¹, indicando que el rendimiento de forraje verde fue similar entre los tratamientos control y compost, (3,8 y 3,9 t ha⁻¹ respetivamente), tratamientos de purines y urea presentaron mayores producciones (5,7 y 7,5 t ha⁻¹, respetivamente). Cuando se consideró el rendimiento de materia seca, la urea presentó rendimientos mayores (1,2 t ha⁻¹).

Chacón *et al.* (2014) investigaron el efecto de sustancias húmicas en la producción de biomasa del pasto estrella africana, usando sustancias húmicas extraídas lombriz roja californiana y turba canadiense, más el tratamiento control (sin fertilización), en donde se evidenció un aumento de la producción de forraje verde y seco de 54% en comparación con el tratamiento control. Con el extracto de turba canadiense se obtuvo mayor contenido de materia seca (33,06%) que con el extracto de lombriz roja californiana (lombricomposta), el cual presentó 31,71%.

En México se investigó la respuesta a la aplicación de fertilizante orgánico (28 Mg ha⁻¹ de estiércol ovino), inorgánico (0,434 Mg ha⁻¹ de superfosfato triple) y la combinación (14 Mg ha⁻¹ de estiércol ovino y 0,217 Mg ha⁻¹ de superfosfato triple) en la producción de alfalfa (*Medicago sativa*) y su efecto en las características químicas del suelo. Los resultados indicaron que la producción promedio anual de materia seca fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en los tratamientos aplicados (testigo 19,9±0,062 Mg ha⁻¹, fertilizante orgánico

28,8±0,090 Mg ha⁻¹, fertilizante inorgánico 29,2±0,095 Mg ha⁻¹ y el fertilizante combinado 32,7±0,108 Mg ha⁻¹). Se determinó la eficiencia en la producción de fósforo de 23,1% para el fertilizante orgánico, 37% el inorgánico y 64% para el combinado (Flores et al., 2012).

Jiménez *et al.* (2010) analizaron el efecto de época del año; tipo de fertilizante (sin fertilizante, fertilizante inorgánico y orgánico); edad de corte (21, 28 y 35 días) y sus interacciones en pasto *Brachiaria humidicola* (*Urochloa humidicola*) que crecía en un suelo ácido. Las variables estudiadas fueron los contenidos de proteína cruda y de fibra detergente neutro, así como la digestibilidad *in situ* de la materia seca y de la fibra detergente neutro. Los factores estudiados y sus interacciones afectaron ($p < 0,001$) los valores de proteína cruda y digestibilidad *in situ* de la materia seca. La fibra detergente neutra resultó afectada ($p < 0,005$) solo por la época del año. En cambio, la aplicación de fertilizante orgánico no incrementó el valor nutritivo del pasto con respecto a lo observado con la aplicación del fertilizante inorgánico, tanto a lo largo de todo un año como para las diferentes edades de corte.

En Venezuela se analizó el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre variables productivas y composición química del pasto estrella, usando los siguientes tratamientos: sin fertilización (testigo), fertilización inorgánica en base a 200 kg N ha⁻¹ + 85 kg P ha⁻¹, y fertilización orgánica con 2000 kg ha⁻¹ de compostaje elaborado en base a excretas bovinas y bagazo de caña. Las evaluaciones se hicieron a los 21, 35, 49 y 63 días post-fertilización. Las variables de respuesta evaluadas fueron: altura de planta, producción de biomasa verde y seca, materia seca acumulada, rendimientos de materia seca en hojas y rendimientos de

materia seca en tallos, tasa de crecimiento diario, relación hoja-tallo, y los contenidos de proteína cruda, cenizas totales, macro y microelementos presentes. La fertilización inorgánica tuvo efecto sobre la mayoría de las variables, excepto la materia seca acumulada y la tasa de crecimiento diario, para las cuales la fertilización orgánica mostró mejores resultados (Borges et al., 2012).

3.5 Uso de biofertilizantes en pasturas

La inoculación con bacterias rizosféricas en cultivos y pasturas, es una práctica que ha tomado mucho auge, como una alternativa para reducir el uso de fertilizantes sintéticos y otros productos químicos y por consiguiente, reducir su impacto sobre los costos de producción, la contaminación del suelo y la emisión de GEI (Parra y Cuevas, 2001).

En México se analizó el efecto de tres cepas de *Azospirillum spp* (SRGM2, SRGM3 y SRGM4), en el crecimiento y desarrollo de plantas de pasto Guinea (*Megathyrsus maximus*). Se analizaron las variables germinación, peso foliar fresco y seco, peso radical fresco y seco, fósforo y proteína foliar. Los resultados obtenidos evidenciaron que la inoculación simple o combinada promovió la germinación de semillas del pasto Guinea ($p \leq 0,05$) con respecto al tratamiento sin inoculación (testigo absoluto). Además, se observó aumentos de hasta 26,80% en proteína cruda, y 45,67% en el peso seco foliar, comparada con las plantas tratadas con 100% de fertilización nitrogenada (Cardenas et al., 2014).

En otro estudio realizado en México (García et al., 2012), en que se evaluó el efecto de *Azospirillum brasilense* (cepa UAP154) versus no inoculación, sobre el rendimiento de grano

de maíz, no se detectaron diferencias significativas ($p > 0,05$) debidas a los tratamientos, pero se identificó un incremento en el rendimiento de grano debido a la inoculación; y este resultó además en un incremento del 56% en la relación beneficio-costos, cuando se comparó con el testigo no fertilizado ni inoculado.

En Costa Rica se evaluó el uso de *Azospirillum spp.*, como biofertilizante en pasto estrella africana (WingChing-Jones *et al.*, 2016), donde se comparó tres cepas de la misma bacteria (PCJ1, PCJ2 y PCJ3) y la combinación de las mismas con vermicompost y la fertilización química (78 kg N ha^{-1}), además en esta investigación se evaluó el potencial para sustituir el fertilizante químico (78 kg N ha^{-1}) en proporciones sustitución del 25, 50 y 75% comparado con una dosis de 5 L ha^{-1} (10^8 UFC.ml^{-1}) de *Azospirillum*. En relación a la comparación de las cepas y el vermicompost y el fertilizante químico, las cepas y su combinación produjeron una cantidad similar de biomasa forrajera ($3,65$ a $4,12 \text{ t ha}^{-1}$) a la obtenida con el fertilizante químico ($4,16 \text{ t ha}^{-1}$). La fertilización con humus de lombriz resultó en el rendimiento más bajo ($3,66 \text{ t ha}^{-1}$). En relación al efecto de sustitución de fertilizante químico por el biofertilizante no se encontraron diferencias significativas en los rendimientos de biomasa para los tratamientos con *Azospirillum* o fertilizantes químicos, lo que sugiere que el uso de los biofertilizantes es una alternativa viable para pasturas.

3.6 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en ganadería

Los gases de efecto invernadero son los componentes que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie

del planeta, la atmósfera y las nubes. Los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) (Benavides y León, 2007).

La ganadería bovina a nivel mundial contribuye con aproximadamente 4,5 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (FAO, 2021) las cuales provienen de emisiones de metano (CH₄) que son parte natural del proceso de digestión de los rumiantes, óxido nitroso (NO₂) producto de la descomposición de las excretas y fertilizantes químicos y el dióxido de carbono (CO₂) asociado principalmente al cambio en el uso de la tierra de bosques a pasturas (Herrero *et al.*, 2011; FAO, 2015).

La contribución de la actividad ganadera a las emisiones totales de GEI a nivel global es de un 18%. Así mismo se estima que la ganadería contribuye el 9% del total de emisiones de CO₂, el 37% de CH₄ como producto de la fermentación entérica y del estiércol y el 65% de las emisiones globales de N₂O (Gerber *et al.*, 2013; Saynes *et al.*, 2016).

La principal fuente de las emisiones de N₂O en sistemas ganaderos es la fertilización nitrogenada, la cual genera este gas como resultado de procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación que tienen lugar en el sitio de deposición del fertilizante, seguido por procesos de volatilización y lixiviación (FAO, 2015; Gonzales y Camacho, 2018).

La emisión de CH₄ en los sistemas de producción pecuaria, en gran medida se deriva de manera natural por la fermentación del alimento en el tracto digestivo de los rumiantes. El

85 al 95% del CH₄ se genera en el rumen y el 5-15% restante se produce en el intestino grueso (Tigmasa, 2018). La producción de CH₄ es afectada por el nivel de consumo de alimentos, la composición de la dieta, su digestibilidad y la frecuencia de alimentación, entre otros factores. El CH₄ es producido en el rumen por un grupo altamente especializado de microorganismos, los cuales son anaerobios obligados, para los cuales el CH₄ es un subproducto del proceso de fermentación de los alimentos consumidos por los rumiantes (Cárdenas y Flores, 2012; FAO, 2015).

5. CAPÍTULO 1. RESPUESTA FENOLÓGICA Y PRODUCTIVA DEL PASTO ESTRELLA AFRICANA (*CYNODON NLEMFUENSIS VANDERYST.*) A LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA E INORGÁNICA

<https://doi.org/10.53588/alpa.320103>

Resumen

La fertilización es utilizada para mejorar los índices productivos de las especies forrajeras con miras a lograr niveles de producción de leche y carne acordes al sistema productivo. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta fenológica y productiva del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) a la aplicación de cinco fuentes de fertilización y tres edades de rebrote. El experimento se realizó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata ubicada en El Alto de Ochomogo en la provincia de Cartago, Costa Rica, durante los meses de mayo a noviembre de 2019 y 2021. Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) y fue analizado mediante un modelo lineal generalizado que incluyó edad de rebrote, año y fertilizante como factores principales. La edad de rebrote afectó ($p < 0,05$) la producción de biomasa fresca y seca, la altura y edad fenológica de la pastura. Los fertilizantes evaluados no afectaron ($P > 0,05$) las variables analizadas, aunque en algunos indicadores se evidenciaron tendencias a favor de los tratamientos inorgánicos. La urea protegida con azufre resultó en mayor producción de biomasa fresca ($15\ 813\ \text{kg ha}^{-1}$) y seca ($3\ 649\ \text{kg ha}^{-1}$) y mayor altura de planta (47,29 cm). El tratamiento de purines presentó mayor número de hojas promedio (7,17 hojas planta⁻¹) y el nitrato de amonio resultó en mayor cobertura ($571,83\ \text{rebotes m}^{-2}$) y mayor

proporción de hojas (56%), pero menor proporción de tallos y material senescente (36 y 9%, respectivamente). La edad de rebrote fue el factor que influyó más sobre las variables productivas de la pastura, mientras que los fertilizantes evaluados no mostraron efectos consistentes ni concluyentes para escoger una fuente en particular; por tanto, los ganaderos pueden considerar una combinación de diferentes fertilizantes según su sistema de manejo y disponibilidad de recursos

Palabras clave: Pastura, fertilización, fecha de corte, biomasa, fenología.

Abstract

Pasture fertilization is aimed for enhancing forage species productivity as means to improve milk and meat in livestock production systems. The objective of this study was to evaluate the productive and phenological responses of African Star grass (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) to five fertilizers and three ages of regrowth. The experiment was carried out at the Alfredo Volio Mata Experimental Station, located in El Alto de Ochomogo in the province of Cartago, Costa Rica, from May through November in 2019 and 2021. A completely randomized block design (CRBD) was used and analyzed using a generalized linear model that included days at harvest, year, and fertilizer as the main factors. The age of regrowth had a significant effect ($p < 0,05$) on both fresh and dry biomass yield, as well as on plant height and phenological stage. The fertilizers evaluated did not affect ($P > 0,05$) the variables analyzed, although in some indicators they showed trends in favor of the inorganic treatments. Sulphur coated urea was the treatment with the highest fresh ($15\ 813\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$) and dry biomass yields ($3\ 649\ \text{kg}\ \text{ha}^{-1}$), as well as pasture height (47,29 cm). Slurry application resulted in a higher number of green leaves (7.17 leaves shoot⁻¹); whereas, greater soil cover ($571.83\ \text{shoots}\ \text{m}^{-2}$), a higher proportion of leaves (56%) and lower of stems and senescent material (36 and 9%, respectively) was obtained with ammonium nitrate applications. The age of regrowth was the factor that affected the most the evaluated pasture variables; whereas the effects of fertilizers were neither consistent nor conclusive. Hence, livestock producers may combine the use of different fertilizer sources according to their management system and resource availability.

Key words: Pasture, fertilization, cutting date, biomass, phenology.

Introducción

Los pastos y forrajes son la fuente principal de nutrientes y alimentos para la ganadería en el trópico, son cultivados en suelos de media y baja fertilidad, lo cual limita su rendimiento, valor nutricional y, consecuentemente, la productividad animal (Cook *et al.*, 2005).

El uso eficiente de pastos constituye una herramienta básica y fundamental para la alimentación de los rumiantes. El realizar la cosecha de forrajes en un periodo de crecimiento óptimo, contribuye a mejorar la capacidad de estos para suministrar el alimento necesario para el crecimiento, desarrollo y producción de los animales (Berone *et al.*, 2022).

En Costa Rica, la ganadería se basa en el uso de pasturas perennes tropicales; entre ellas, el pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst.*) el que sobresale como uno de los más usados por su versatilidad y potencial productivo, ya que se puede establecer en potreros pequeños (desde 300 m²), y utilizarse con diferentes arreglos para los sistemas de rotación de pasturas (MAG, 2007). El pasto estrella africana es usado en sistemas de producción láctea debido a su adaptabilidad a climas tropicales y subtropicales (0 a 2000 m.s.n.m) y su tolerancia a suelos ligeramente alcalinos y ácidos (pH 4,5–8,0), siempre que no haya problemas de toxicidad de aluminio (Peters *et al.*, 2010).

La fertilidad de los suelos es un factor clave para el crecimiento de las plantas y tiene una gran influencia sobre la productividad y la calidad del forraje (Moya *et al.*, 2016). La fertilización en pasturas buscan restituir los nutrientes que se extraen del suelo, de los cuales

el nitrógeno es el más común usado por los productores, para mejorar la productividad de biomasa y el valor nutricional del pasto estrella (Arteaga *et al.*, 2019).

En ese contexto, el sector lácteo costarricense se ha vuelto dependiente de la utilización de diferentes tipos de fertilizantes, para lograr el incremento de la productividad. Las fuentes usadas para fertilización son sintéticas ricas en nitrógeno; orgánicas como los purines, compost, vermicompost, lombriabono; y biológicas, como el uso de bacterias fijadoras de nitrógeno. Todas ellas han demostrado ser una alternativa para incorporar al sistema los nutrientes necesarios para mejorar el desarrollo de las pasturas (Méndez *et al.*, 2019; Solano-López y Villalobos-Villalobos, 2022).

La fertilización de pasturas es una práctica de importancia en la gestión de las explotaciones ganaderas, por lo que conocer la respuesta productiva de los forrajes a distintos tipos de fertilizantes (orgánicos e inorgánicos) permitirá identificar opciones novedosas de manejo y realizar una gestión efectiva de los recursos de las fincas. En este estudio se evaluó la morfología, la biomasa del pasto estrella africana y su respuesta en función de cinco tratamientos de fertilización con fuentes orgánicas e inorgánicas, bajo diferentes edades de rebrote.

Materiales y métodos

Conducción del experimento

El estudio se realizó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en el Alto de Ochomogo, provincia de Cartago (9°55'10' N, 83°57'20''O), a una altitud de 1542 m.s.n.m., con una precipitación media anual de 2050 mm (distribuida de mayo a octubre), temperatura media anual de 19,1°C (máxima 23,6 °C y mínima 14,5 °C) y humedad relativa media de 84% (IMN,2022).

El experimento se llevó a cabo en los años 2019 y 2021, en un área de 1619 m², dentro de potreros previamente establecidos con pasto Estrella Africana, que habían sido manejados bajo un sistema de rotación con descanso de 25 a 30 días. En el año 2020 se suspendió el experimento por la pandemia del Covid-19 y, durante ese periodo, el área de experimento se pastoreó con novillas y vacas secas. En el 2021 se retomó el estudio en la misma área asignada en 2019, y en ambos años al inicio de la época lluviosa (mayo) se realizó una cosecha de uniformización (a 5 cm sobre el nivel del suelo), usando una motosegadora autopropulsada, luego se aplicaron los tratamientos de fertilización y a partir de esa fecha se contaron los días de rebrote para el muestreo.

Durante el experimento se encontró una baja presencia de malezas de hoja ancha, las que se eliminaron manualmente y durante el período de estudio no se detectó presencia de plagas o enfermedades . Se asignaron aleatoriamente un total de 24 parcelas en cuatro bloques de 6 parcelas cada uno con un área de 6 m² por parcela (2×3 m) y separadas por pasillos de 2 m

de ancho. En 2021, las parcelas se establecieron nuevamente respetando el mismo diseño usado en el año 2019 para la asignación de los tratamientos.

En ambos años se tomó una muestra compuesta de suelo en el área experimental y se realizó análisis químico en el Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. En las muestras analizadas no se identificó deficiencia de nutrientes o necesidad de enmienda (Cuadro 1.1).

Cuadro 1. 1. Análisis químico de suelo realizado en el área experimental previo al inicio de los muestreos en 2019 y 2021.

Variable	Unidades	2019	2021
pH	H ₂ O	6,10	6,20
Acidez intercambiable	cmol(+)/L	0,12	0,10
Ca	cmol(+)/L	8,65	8,56
Mg	cmol(+)/L	5,30	5,41
K	cmol(+)/L	1,79	2,00
CICE*	cmol(+)/L	15,86	16,07
Saturación de acidez	%	0,80	0,60
P	mg/L	53,00	42,00
Zn	mg/L	10,80	9,70
Cu	mg/L	26,00	24,00
Fe	mg/L	414,00	324,00
Mn	mg/L	31,00	63,00
Conductividad eléctrica	mS/cm	0,40	0,30
C	%	5,44	4,68
N	%	0,58	0,53
Materia orgánica	%	7,77	6,69
C/N	%	9,40	8,80

* Capacidad de intercambio catiónico efectivo.

Los tratamientos de fertilización evaluados fueron: C= sin fertilización (testigo absoluto), U= urea (46% N), AN= nitrato de amonio (33,5% N) US= urea protegida con azufre (40% N + 6% S) SL= fertilización orgánica con base en excretas bovinas (0,01 g.L⁻¹ de N), AZ=

Azospirillum oryzae PCJI (dosis de 16 L por parcela, para una concentración mínima de 10^8 UFC.ml⁻¹). Con excepción de los tratamientos C y AZ, se aplicó una dosis equivalente anual de nitrógeno de 200 kg ha⁻¹ para todos los tratamientos. En el caso de AZ y SL se aplicaron con una regadera y con cubetas, respectivamente, aplicando capas uniformes en el área de cada parcela. En todos los casos se tuvo cuatro repeticiones por tratamiento. El experimento se realizó durante la época lluviosa (mayo a octubre) durante los años 2019 y 2021. Se realizaron tres cortes por tratamiento en cada año, definidos como la edad de rebrote de 35, 45 y 55 días (Cuadro 1.2)

Cuadro 1. 2. Fechas y días de rebrote a la cosecha del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) en Cartago (Costa Rica)

Fecha de aplicación de fertilizantes		Fecha de cosecha		Días de rebrote (d)	Edad fenológica (hojas rebrote ⁻¹)	Grados días acumulados (°C)
2019	2021	2019	2021			
07-06	31-05	01-08	27-07	55	7,1	1005
03-08	03-08	17-09	17-09	45	6,4	833
01-10	21-09	05-11	26-10	35	6,8	640

Determinaciones

Desarrollo de la planta

Se evaluó la densidad de rebrotes del pasto estrella, por medio del conteo directo de la cantidad de rebrotes por metro cuadrado en un punto aleatorio dentro de cada parcela. La edad fenológica del pasto estrella se definió por medio del conteo del número de hojas verdes por rebrote, para ello se seleccionó aleatoriamente 10 observaciones (plantas) por parcela para un total de 40 observaciones por tratamiento por muestreo, contando a partir del último rebrote lateral en el culmo del pasto (Villalobos y Arce, 2014). La altura de la pradera se estimó en base al punto superior donde se encontraba el dosel, tomando dentro de cada parcela cinco puntos y utilizando una cinta métrica para realizar cada medición.

Producción de biomasa

El forraje se cosechó a una altura de corte de 5 cm usando una motosegadora autopropulsada y el material cosechado se colocó en bolsas plásticas previamente taradas. Las bolsas con el pasto se pesaron utilizando una pesa romana electrónica colgante con capacidad de 160 kg ($0,05 \pm$ kg) colocada en campo en un sistema de trípode metálico. Luego de pesar el forraje fresco, se tomó una muestra representativa de 1,5 kg que se secó a 60°C por 48 h en un horno de convección por gravedad y posteriormente se estimó el contenido de materia seca (MS), el mismo que se usó para estimar la producción de biomasa seca por hectárea, a partir de la producción de biomasa fresca.

Componentes estructurales

Se tomaron muestras de 0,25 m² en cada parcela (24 muestras) por corte, cada muestra fue utilizada para hacer separación de hojas, tallos y senescencia, una vez separados los componentes, se realizó peso en fresco y las muestras se procedieron a secar para obtener las proporciones de cada componente.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La información de producción de biomasa fresca y seca, fenología, densidad de rebrotes, altura del dosel y componentes estructurales, se procesaron mediante un modelo lineal generalizado que incluyó la edad de rebrote y el tipo de fertilizante como factores principales. En dicho modelo se analizó el efecto del tipo de fertilizante, edad de rebrote, año de cosecha y la interacción de estos.

Se aplicó la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$) para crear intervalos de confianza para todas las diferencias entre las medias. El análisis de los datos se realizó por medio del software RStudio® versión 1.4.1103 para Windows.

Resultados

Comportamiento productivo del pasto estrella por edad de rebrote

La edad de rebrote mostró un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre las variables biomasa fresca y seca, altura del dosel y número de hojas (Cuadro 1.3). En contraste, la variable relacionada a densidad de rebrotes no mostró diferencias entre las tres edades de rebrote evaluadas ($P > 0,05$) (Cuadro 1.3).

Cuadro 1. 3. Producción de biomasa fresca y seca, número de hojas, altura del dosel y densidad de rebrotes del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) a tres edades de rebrote en Cartago (Costa Rica).

Edad de rebrote (días)	Biomasa fresca (kg ha ⁻¹)	Biomasa seca (kg ha ⁻¹)	Altura del dosel (cm)	Edad fenológica (hojas. rebrote ⁻¹)	Densidad de rebrotes (rebotes m ⁻²)
35	9000 ^a	2053 ^a	22,8 ^a	6,4 ^a	471,9 ^a
45	9200 ^a	2186 ^a	38,4 ^b	6,8 ^b	522,2 ^a
55	18300 ^b	4303 ^b	63,1 ^c	7,1 ^c	526,6 ^a
Sig.	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,38

^{abc} Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

La producción de biomasa fresca y seca, fue similar para las edades de rebrote de 35 y 45 días, mientras que a los 55 días la producción duplicó la de edades más tempranas para ambas

variables (Cuadro 1.3). Las variables de altura del dosel, número de hojas y densidad de rebrotes mostraron valores crecientes conforme a la edad de rebrote, teniendo diferencias mayores ($p < 0,05$) entre las edades mayor y menor evaluadas (Cuadro 1.3).

Comportamiento productivo del pasto estrella por fuente de fertilizante

Producción de biomasa fresca y seca

El tratamiento con mayor producción de biomasa fresca fue el de urea protegida con azufre (US), mostrando diferencias significativas ($p < 0,05$) con respecto a los tratamientos control, purines, y *Azospirillum*, pero valores similares ($p > 0,05$) con respecto a los tratamientos de urea y nitrato de amonio, sin diferencias ($p > 0,05$) entre estos dos últimos (Figura 1,1). El tratamiento US superó al tratamiento control hasta en 5000 kg ha^{-1} .

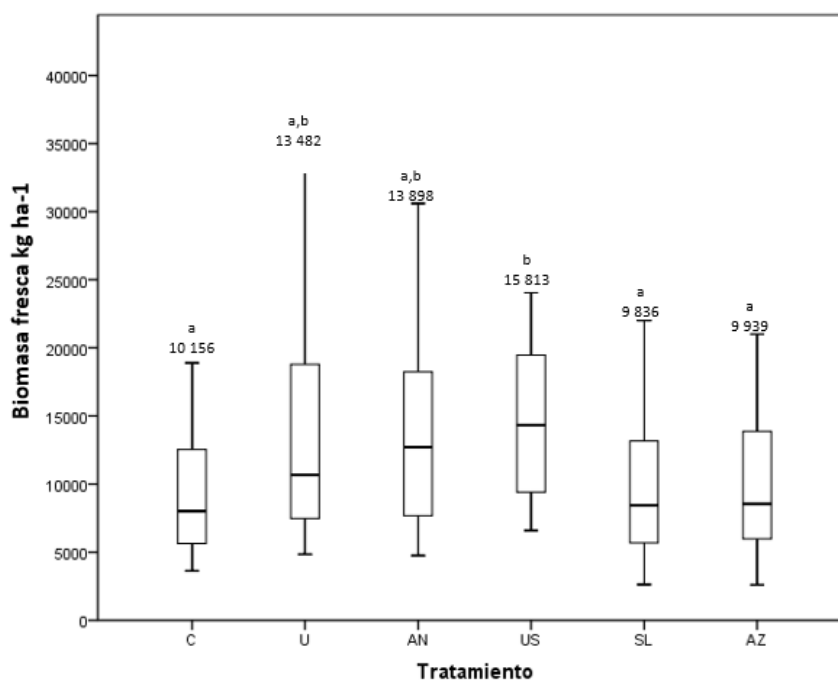


Figura 1. 1. Biomasa fresca del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes en Cartago (Costa Rica). Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0.05$).

La producción de biomasa seca osciló entre 2000–3600 kg ha⁻¹, siendo los tratamientos de urea protegida con azufre y *Azospirillum* los de mayor y menor rendimiento, respectivamente (Figura 1.2). La biomasa seca del tratamiento de urea protegida con azufre fue superior ($p < 0,05$) al control y los tratamientos orgánicos (SL y AZ, Figura 1. 2). La diferencia de producción entre los tratamientos orgánicos y el control con respecto a los inorgánicos osciló entre los 700 y 1300 kg ha⁻¹.

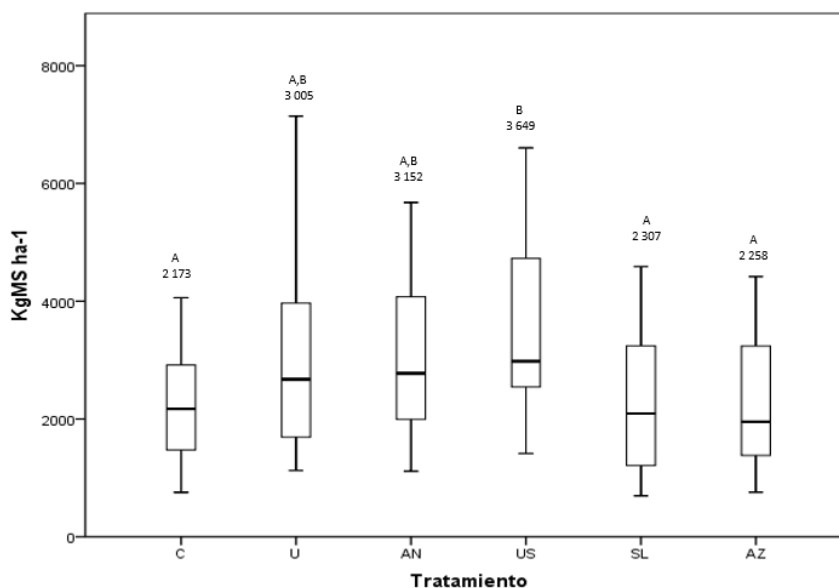


Figura 1. 2. Biomasa seca del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes en Cartago (Costa Rica). Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0.05$).

Altura del dosel de la pastura

La altura del dosel de la pastura del pasto estrella africana osciló entre 35–47 cm en función de los tratamientos de fertilización (Figura 1.3). El tratamiento de urea con azufre fue superior ($p < 0,05$) con respecto a los tratamientos control (11,31 cm), purines (11,55 cm) y *Azospirillum* (8,92 cm), pero no diferente ($p > 0,05$) a la obtenida con los tratamientos de urea y nitrato de amonio.

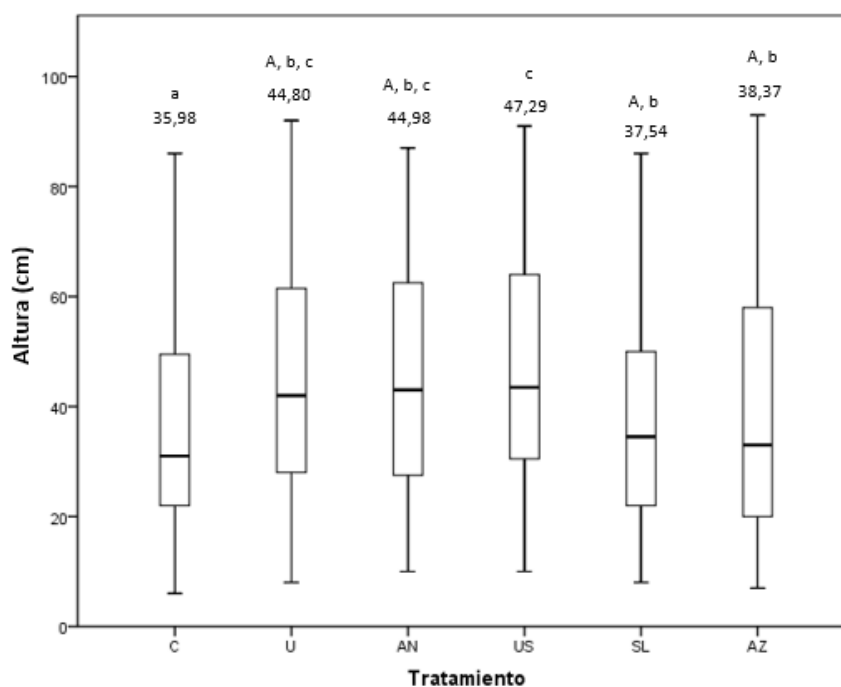


Figura 1. 3. Altura del dosel en pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes (C= sin fertilización, U= urea, AN= nitrato de amonio US= urea protegida con azufre SL= excretas bovinas y AZ= *Azospirillum oryzae*) en Cartago (Costa Rica). Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0.05$).

Número de hojas

El número de hojas del pasto estrella africana osciló entre 6,23 – 7,17 hojas rebrote⁻¹, con valores menores ($p > 0,05$) para el tratamiento control y nitrato de amonio con respecto a los demás tratamientos evaluados. Ambos tratamientos produjeron menor número de hojas con respecto al resto de los tratamientos evaluados. Estos resultados evidencian que la aplicación de purines, *Azospirillum*, urea convencional y urea protegida con azufre estimularon el desarrollo foliar del pasto estrella africana (Figura 1.4).

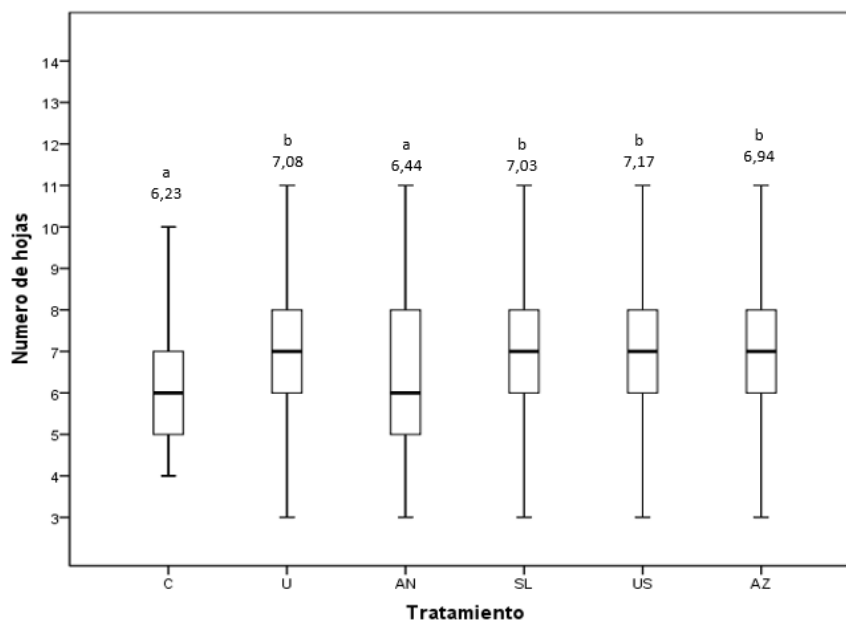


Figura 1. 4. Número de hojas por rebrote del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes en Cartago (Costa Rica). Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0.05$).

Densidad de rebrotes

La densidad de rebrotes del pasto estrella africana osciló entre 456–571 rebrotes m^{-2} y no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p > 0,05$; Figura 1.5).

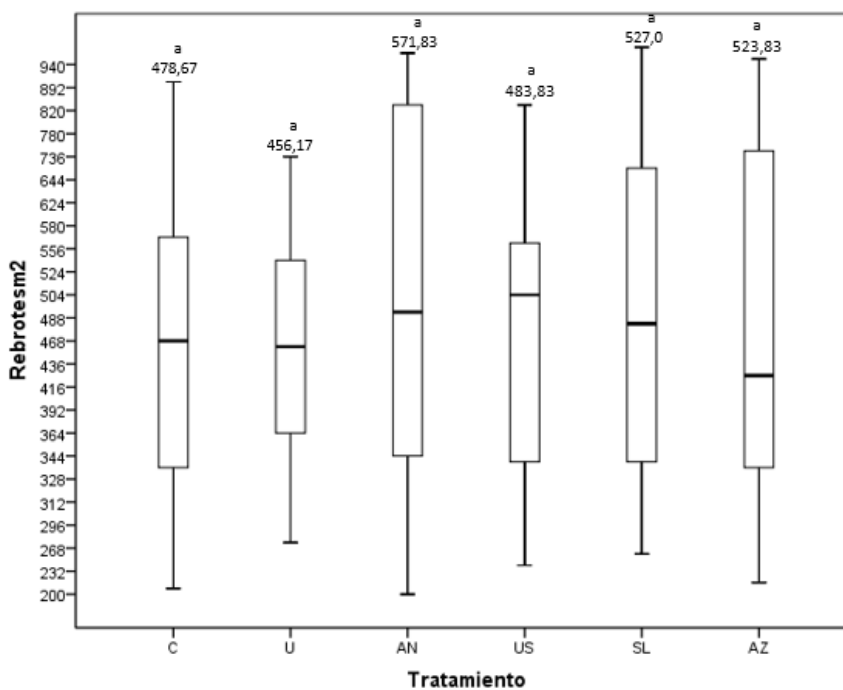


Figura 1. 5. Densidad de rebrotes del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes en Cartago (Costa Rica). Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0.05$).

Los tratamientos con mayor y menor número de rebrotes fueron nitrato de amonio y urea, con 571,83 y 456,17 rebrotes m⁻², respectivamente. Los tratamientos orgánicos tendieron a presentar densidades de rebrote mayores a 520 rebrotes m⁻², superando al promedio de los tratamientos de urea y urea protegida (menores de 480 rebrotes m⁻²) para dicha variable. El nitrato de amonio, el cual tuvo mayor densidad de rebrotes, presentó una diferencia en relación al tratamiento control de 93,16 rebrotes m⁻².

Componentes estructurales de la planta

Los componentes estructurales de la planta mostraron valores similares entre los tratamientos de fertilización (Figura 1.6), mostrando rangos de variación entre las medias de tratamiento de 5 puntos porcentuales (pp) para las hojas, 3 pp para los tallos y 4 pp para el material senescente.

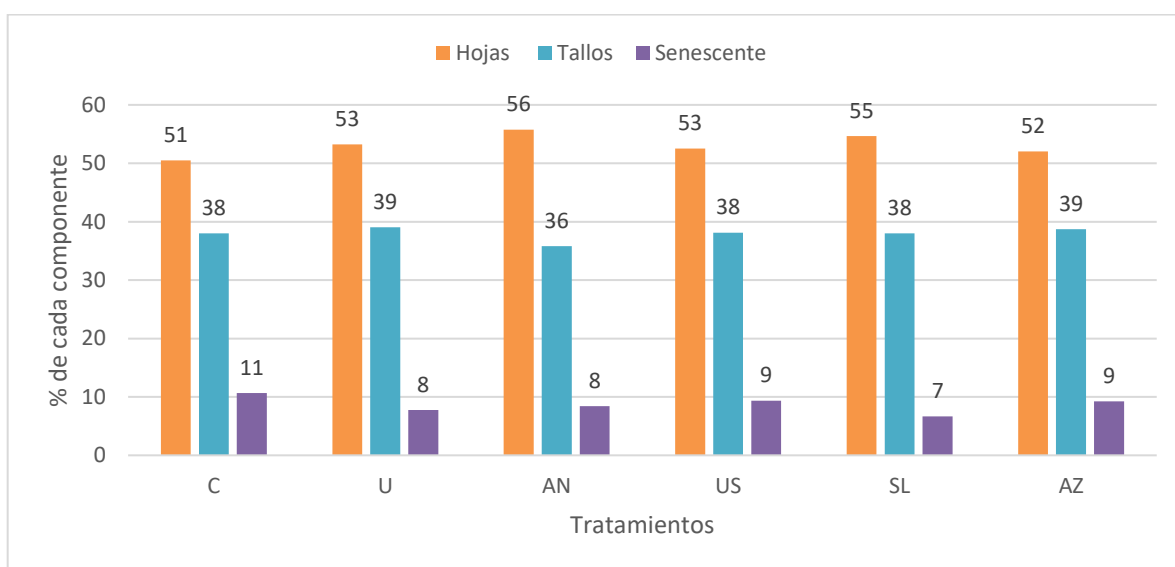


Figura 1. 6. Componentes estructurales del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco fertilizantes en Cartago (Costa Rica).

Discusión

Comportamiento productivo del pasto estrella por edad de rebrote

La producción de biomasa fue mayor en meses de mayor pluviosidad en donde las precipitaciones oscilaron entre 70 hasta 500 mm mensuales y a mayores edades de rebrote (Cuadro 1.3), lo cual coincide con lo expresado por Villalobos (2012), donde se observaron mayor producción de biomasa para cosechas de pasto alpiste (*Phalaris arundinacea* L.) realizadas en meses con mayor pluviosidad. El mismo autor indica que la biomasa y la fenología del pasto alpiste, disminuyeron en los meses de noviembre a enero y aumentaron para la temporada de inicio de invierno (mayo-junio) (Villalobos, 2012). Resultados similares fueron encontrados por Méndez *et al.* (2019) en Argentina, donde observaron que la producción de la pastura estrella africana (*Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg) decrecía conforme se limitaban la humedad y la temperatura del suelo, indicando que las dinámicas climáticas (precipitaciones, temperatura, humedad, radiación) constituye un factor ambiental clave que, a través de sus impactos bioquímicos y fisiológicos, determina en gran medida el aumento de la llamada de crecimiento o curvas de rendimiento en el forraje., comportamiento que se evidenció en esta investigación.

La edad de rebrote mostró efectos variables debido a la interacción con los tratamientos evaluados sobre el comportamiento reproductivo del pasto estrella africana. Resultados similares se observaron en *Pennisetum purpureum* cv Cuba CT-115 con cinco edades de rebrote (30, 45, 60, 75 y 90 días) donde la producción de biomasa fue mayor cuando la pastura alcanzaba una edad de 90 días (27,0 t ha⁻¹ de MS), mientras que la relación hoja:tallo, el contenido de proteína y la digestibilidad fueron mayores con una edad de rebrote de 30 días

(León *et al.*, 2022). Similares resultados reporta Ferrufino-Suárez *et al.* (2022) al analizar el efecto de la edad de rebrote sobre componentes productivos del pasto estrella africana, estos autores mencionan que se incrementó la producción de biomasa conforme avanzó la edad de cosecha. Este incremento puede asociarse a un mayor tiempo en el periodo de crecimiento, permitiendo mayor acumulación de material vegetal. Sin embargo, es importante considerar que prolongar o disminuir los tiempos de corte puede afectar la relación hoja:tallo, por la acumulación de tallos conforme avanza la edad de rebrote.

La biomasa fresca y seca en esta investigación aumentó cuando las edades de rebrote fueron mayores. Similares resultados reportan Ferrufino-Suárez *et al.* (2022) evaluando pasto estrella africana, identifica un aumento de biomasa seca, cuando se aumentaron los días de cosecha, desde 3,16 hasta 6,14 t de MS ha⁻¹, al pasar de 7 hasta 35 días. Una tendencia similar fue observada por Núñez-Arroyo *et al.* (2022) trabajando con pasto estrella africana tanto durante la época seca como la lluviosa, con incrementos desde 644,3 hasta 5240,0 kg MS ha⁻¹, con cosechas que iba de los 14 a los 56 días. Una tendencia similar se ha observado en otras especies como pasto desho (*Pennisetum pedicellatum* Trin.), pasto elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach) y *Brachiaria brizantha* (Tilahun *et al.*, 2017; González *et al.*, 2011; Merlo-Maydana *et al.* 2017).

En Costa Rica, Ferrufino-Suárez *et al.* (2022) reportaron un aumento de biomasa en el pasto estrella africana con una tendencia lineal conforme aumentaron las edades de rebrote; en especial entre los 21 y 35 días, esta información indica un efecto positivo para la producción de biomasa cuando la edad de rebrote es mayor. Este comportamiento es propio en el

desarrollo y crecimiento fenológico de la planta, que además de estar bajo un programa de fertilización, estuvo siendo evaluada en los meses de mayor precipitación, lo que pudo influir en el desarrollo y la acumulación de biomasa aérea. Es importante considerar esos factores, ya que la aplicación de fertilizantes mejora la producción de forraje, pero sumado a factores ambientales y de manejo, retrasar la cosecha puede influir en la calidad nutritiva del pasto, por efecto de cambios asociados con el aumento de carbohidratos estructurales que ayudan a dar soporte a la planta (Villalobos 2012), por lo que la decisión de usar edades de rebrote menores o mayores debe ser analizada en función de las necesidades y objetivos propios de cada finca

En relación con la variable altura de la planta, los mayores valores se registraron a 55 días con 63,1 cm. Resultados similares fueron observados por Tilahun *et al.* (2017) con pasto desho (*Pennisetum pedicellatum* Trin.), por Homen *et al.* (2010) y Vargas *et al.* (2014) en pasto Mombasa (*Megathyrsus maximus*) y Correa (2015) en *Setaria sphacelata*: Esto es producto del proceso de elongación, propios del crecimiento y proceso de maduración del forraje, el cual puede ser influenciado además por la fertilización, factores ambientales y edáficos de sitio. Es importante tomar en cuenta que la altura puede influenciar una mayor cantidad de rebrotes y hojas, pero el retraso en la cosecha también aumenta el peso de los tallos, disminuyendo la proporción entre hoja y tallos en la planta.

Comportamiento productivo del pasto estrella en función de las fuentes de fertilizante aplicadas

La biomasa fresca encontrada en pasto estrella africana, fue mayor para el tratamiento de urea protegida con azufre con respecto a los tratamientos orgánicos y el control. Estos resultados se asemejan a los reportados por Borges *et al.* (2012), donde usando diferentes dosis de fertilización y edades de corte, obtuvieron una mayor producción de biomasa fresca con los tratamientos inorgánicos (10905,5 kg ha⁻¹) y menores para tratamientos orgánicos (5965 kg ha⁻¹).

Al agrupar los tratamientos en orgánicos e inorgánicos, se evidenció una respuesta consistente de la pastura a los tratamientos inorgánicos. Diversos autores han mencionado el efecto positivo de la fertilización inorgánica sobre distintos componentes productivos de la pastura, el cual puede estar ligado a la facilidad en el suministro de nutrientes y al proceso de liberación que tienen los fertilizantes nitrogenados, lo cual favorece la asimilación de la planta y el crecimiento celular de los tejidos (Borges *et al.*, 2012; Apollon *et al.*, 2022; Solano-López y Villalobos-Villalobos, 2022). Es importante hacer notar que en esta investigación no consideró el tiempo que requieren los fertilizantes orgánicos, para la liberación de nutrientes, la cual surge de forma gradual en comparación con los fertilizantes inorgánicos (Niedzinski *et al.*, 2021). Esta liberación lenta resulta en una absorción de nutrientes menos inmediata por parte de las plantas, lo que influye sobre la producción de biomasa a corto plazo.

La fertilización inorgánica en pasto estrella africana ha mostrado, en condiciones similares, producciones de biomasa fresca que oscilan desde 7537 kg ha⁻¹ (Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca, 2021), hasta 18340 kg ha⁻¹ (WingChing *et al.* 2016). La producción de biomasa encontrada en este estudio (Figura 1.1), fue similar a valores reportados por Solano-López y Villalobos-Villalobos (2022), donde analizando diversas investigaciones relacionadas a fertilización nitrogenada, obtuvieron datos de producción de biomasa fresca entre 7812 kg ha⁻¹ y 10723 kg ha⁻¹ para pastos del género *Cynodon*.

En relación a los tratamientos orgánicos, la producción de biomasa fresca obtenida en este trabajo (mayor a 9000 kg ha⁻¹), es superior a la reportada por Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021) en pasto estrella fertilizado con purines (5762 kg ha⁻¹). Según WingChing *et al.* (2016) la producción de biomasa fresca de pasto estrella africana fertilizado con *Azospirillum* fue 18 340 kg ha⁻¹, siendo casi el doble de lo obtenido en esta investigación y que podría indicar el potencial productivo de la especie. Estas diferencias productivas pueden asociarse al manejo del experimento, en el cual las edades de cosecha (60 días) fueron superiores a las del presente estudio, así como las condiciones ambientales. WingChing *et al.* (2016) indican que las bacterias de *Azospirillum* son capaces de establecerse en la rizosfera del cultivo, lo cual puede tener un efecto importante sobre la fijación de nitrógeno atmosférico y su transferencia a las plantas colonizadas.

La producción de biomasa seca fue mayor con el tratamiento de urea protegida con azufre (3649 kg ha⁻¹), obteniendo valores levemente mayores a los reportados por Villalobos *et al.* (2013) de 3185 kg.ha⁻¹ por cosecha con una dosis anual promedio de 540 kg ha⁻¹ de nitrógeno

en sistemas en pastoreo. Borges *et al.* (2012) obtuvieron resultados similares ($3017,5 \text{ kg ha}^{-1}$), al utilizar dosis de nitrógeno iguales a las de este estudio (200 kg ha^{-1}), y rendimientos similares han sido obtenidos por otros investigadores (Vera *et al.* 2019; Holland *et al.*, 2018; Arteaga *et al.*, 2019; Méndez *et al.*, 2019) quienes obtuvieron valores entre $2500\text{--}3600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Por su parte Villalobos y Arce (2014) reportan mayor producción en pasto estrella africana (4484 kg ha^{-1}) en pastoreo, usando dosis de fertilización de 224, 33 y 67 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente. Producciones de biomasa seca mayores a 4000 kg ha^{-1} han sido reportadas por otros autores (Pozo *et al.*, 2001; Vera y Martín, 2011). Las diferencias productivas encontradas por esos autores respecto a las del presente estudio pueden estar influenciados por otros factores como el manejo, las condiciones climáticas (temperatura, humedad, radiación) y atributos propios del suelo (Holland *et al.*, 2018).

La altura presentó valores mayores en los tratamientos inorgánicos, llegando hasta 47 cm, siendo similar a lo reportado por Muñoz (2020) en pasto Estrella Africana, donde tratamientos inorgánicos alcanzaron alturas de 49,59 y 48,70 cm, respectivamente. En investigaciones de fertilización de pasturas del género *Cynodon* se han obtenido alturas de 40,7 cm, indicando la variabilidad en la respuesta según la fuente de fertilizante utilizada (Solano-López y Villalobos-Villalobos, 2022). La altura del pasto ha sido usada como indicador del momento de cosecha del pasto, permitiendo inferir el papel que juega el nitrógeno en el desarrollo de la planta (Cunha *et al.*, 2022). Los fertilizantes inorgánicos proporcionan nutrientes de manera rápida y directa, lo cual favorece el crecimiento celular, lo que influye en el aumento en la altura del forraje. Es esencial tener en cuenta que la elongación de la planta alcanza su máximo potencial cuando las condiciones ambientales son

óptimas, esto pudo haber influido en los resultados, debido a que la evaluación fue realizada en los meses de mayor pluviosidad, lo cual brindó a la planta condiciones adecuadas para su desarrollo.

La variable número de hojas fue similar entre tratamientos, siendo el control y el nitrato de amonio los fertilizantes con valores menores (Figura 1.4). La fenología del pasto estrella africana mostró valores similares a los reportados por Salazar (2007) con 7,9 hojas verdes y dentro del rango reportado por Villalobos y Arce (2014) con 6–8 hojas verdes por rebrote. El uso de la edad fenológica es un indicador biológico específico para cada especie de pasto, estos resultados entre los tratamientos evaluados, pudieron estar influenciados por diversos factores, entre los que podemos destacar las condiciones edáficas y climáticas, las cuales favorecieron que para todos los tratamientos se diera un crecimiento y desarrollo vegetativo adecuado.

La densidad de rebrotes fue similar en los tratamientos evaluados (figura 1.5), sin embargo, se observaron algunas diferencias a favor del tratamiento nitrato de amonio, en comparación con el tratamiento control y otros tratamientos de fertilización inorgánica este produjo de 50 a 100 más por metro cuadrado en comparación con los demás tratamiento evaluados, a pesar de haber tenido una edad fenológica menor, lo cual podría atribuirse a una respuesta al crecimiento lateral del pasto con dicho fertilizante. Los valores encontrados fueron menores a los de Rodríguez *et al.* (2011), quienes reportan rebrotes entre 2012–3824 por metro cuadrado, lo cual puede atribuirse al método de estimación de los rebrotes, el cual no fue esclarecido en la investigación. El nitrato de amonio ha mostrado efectos positivos sobre la

densidad de rebrote en pasto ryegrass (*Lolium perenne*) con 1194,5 rebrote por metro cuadrado (Navarro y Villalobos, 2021). La densidad de rebrotes pudo verse favorecida por la presencia y la velocidad de liberación de nitrógeno de origen inorgánico, en especial de Nitrato de amonio (el cual es rápidamente disponible para la planta y se mueve fácilmente en el suelo hacia las raíces), lo que favorece el crecimiento celular y la producción de nuevos tejidos en la planta, así mismo esta variable se ve influenciada por las condiciones agroecológicas, las que determinan y ayudan en los procesos de absorción y crecimientos necesarios para el desarrollo de la planta, estos datos indican además, que habrá puntos de crecimiento de hojas que pueden ser consumidas por el animal, por ello debe ser una variable a considerar en la planificación de las pasturas, ya que esto garantizará mayor disponibilidad de alimento y capacidad de cobertura y competencia del cultivo.

Los componentes estructurales fueron similares entre los tratamientos (Figura 1.6), siendo el nitrato de amonio y los purines los tratamientos con mayores proporciones de hoja (56 y 55% respectivamente). La proporción de tallo fue similar mientras que la proporción de material senescente fue baja en la mayoría de los tratamientos. Las proporciones de hojas encontradas en este estudio fueron mayores a las reportadas por Villalobos y WingChing (2019), en donde evaluaron el efecto de remoción mecánica y obtuvieron porcentajes de hojas entre 36–44%., la cosecha mecánica utilizada en este estudio pudo favorecer que los tratamientos evaluados tuviesen proporciones de hojas y tallos que permitieron lograr relaciones de hoja:tallo mayores a 1 (1,30–1,55), lo cual es deseable en cualquier especie de pastura (Simioni *et al.*, 2014). A pesar de que las proporciones de hojas, tallos y material senescente fueron similares. Aparentemente la fertilización tuvo un efecto positivo en los componentes estructurales, pues

las parcelas control tuvieron mayor proporción de material senescente y menor de hojas, lo que sugiere que la fertilización puede ayudar a mejorar el comportamiento productivo y fenológico de la planta, lo que puede atribuirse a la facilidad de disponibilidad de nutrientes, la concentración y el proceso de liberación de los mismos, complementado con buenas condiciones edáficas y ambientales que favorezcan el crecimiento de la planta.

La información obtenida supone que el manejo del pasto debe potenciar la producción y utilización de la hoja, con lo cual la senescencia se ve disminuida (Villalobos y WingChing, 2019), esto ayudará a favorecer el consumo de los animales mientras que mantenga planes de pastoreo efectivos y ajustado a cada sistema productivo.

Conclusiones

La edad de rebrote mostró un efecto significativo sobre la producción de biomasa fresca, seca, altura de la planta y número de hojas, siendo la edad de rebrote de 55 días, la que obtuvo valores mayores, esto puede ser considerado en los planes de manejo, tomando en cuenta que, el efecto que el retraso del rebrote pueden causar sobre variables nutricionales, las cuales son de gran importancia para establecer un buen manejo de la nutrición de los bovinos.

La información obtenida no permitió establecer efecto consistente en la respuesta productiva a los fertilizantes evaluados. Las diferencias observadas entre tratamientos orgánicos e inorgánicos fueron similares, sin que un grupo de tratamientos sobresaliera de manera consistente en las variables analizadas. Independientemente del tratamiento aplicado, se observó mayor proporción de hojas respecto a tallos, por efecto del uso de fertilización en la pastura.

En función de los resultados de esta investigación, los productores pueden disponer de información que les permita tomar decisiones sobre el tipo de fertilizante a utilizar, el cual se ajusten a las necesidades y particularidades de cada finca, para aumentar la disponibilidad y calidad de los pastos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Estación Experimental de Ganado Lechero Alfredo Volio Mata de la Universidad de Costa Rica por su apoyo con el área, equipos y personal de apoyo para la realización del experimento.

A la Escuela de Zootecnia de la Universidad de Costa Rica, por el equipo facilitado, laboratorio y espacios para el procesamiento de datos de campo.

Al sistema de estudios de posgrado (SEP), por su apoyo en esta investigación.

Bibliografía

Apollon, W., Baptiste, Y.J., Wagner, B.J., Maldonado, A.L., y Espino, H. (2022). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en la producción y calidad de *Brachiaria brizantha*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(1): 1–13. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2637>.

Arteaga, D.V., Cedeño, G., Cedeño, G., Cargua, C.J., Garay L. (2019). Eficiencia agronómica de nitrógeno y producción de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. En función de dos frecuencias de corte. Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences, 35(3): 251–260. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000405>.

Astúa-Ureña, M., Campos-Granados, C.M., y Rojas-Bourrillon, A. (2021). Efecto de la fertilización nitrogenada y la edad de rebrote sobre las características morfológicas y rendimiento agronómico del botón de oro (*Tithonia diversifolia*) ecotipo INTA-Quepos. Nutrición Animal Tropical, 15(1). DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i1.47521>.

Berone, G. D., Cicore, P., Errecart, P., Insua, J., Jaimes, F., Maglietti, C., Marino, A. y Oriente, S. (2022). Guía para el manejo de pasturas en función del stock de pasto y la tasa de crecimiento. Instituto Nacional de Tecnología Agropecua. oai:localhost:20.500.12123/11337.

Borges, J.A., Barrios, M.,y Escalona, O. (2012). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre variables agroproductivas y composición química del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst*). *Zootecnia Tropical*, 30 (1): 17-25.

Correa, G. R. (2015). Comportamiento agronómico, composición química y degradabilidad ruminal in situ del pasto miel (*Setaria sphacelata*). (Tesis de maestría)Universidad de Las Fuerzas Armadas, Ecuador.

Composición morfológica del forraje ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) cv. Jumbo en respuesta a tres fórmulas nitrogenadas. *Nutrición Animal Tropical*, 15(2): 99-122. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48409>.

Cook, B.G., Pengelly, B.C., Brown, S.D., Donnelly, J.L., Eagles, D.A., Franco, M.A., Hanson, J., Mullen, B.F., Partridge, I.J., Peters, M., and Schultze-Kraft, R. (2005). *Tropical Forages: An interactive selection tool*. CD-ROM. Brisbane, Australia: CSIRO, Queensland, Australia; Department of Primary Industries and Fisheries, Cali, Colombia: CIAT and Nairobi, Kenya: ILRI. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/33575>.

Cunha, A.M.Q., Macedo, V.H.M., de Oliveira, J.K.S., Melo, D. de M., Domingues, F. N., Cândido, E.P., Faturi, C., and do Rêgo, A. C., (2022). Nitrogen fertilisation as a strategy for intensifying production and improving the quality of Massai grass grown in a humid tropical climate. *Journal of Plant Nutrition*, 45(14), 2213–2227. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046078>.

León, G.E., Ramos-Juárez, J. A., Izquierdo-Reyes, F., Joaquín-Torres, B.M., y Meléndez-Nava, F. (2022). Comportamiento productivo y valor nutricional del pasto *Pennisetum purpureum* cv Cuba CT-115, a diferente edad de rebrote. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 13(4): 1055–1066. DOI: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i4.5217>.

Elizondo-Salazar, J.A., y Espinoza-Fonseca, H. (2021). Evaluación de los purines como una alternativa de fertilización orgánica en pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst). *Nutrición Animal Tropical*, 15(2): 25–41. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48001>.

Ferrufino-Suárez, AJ, Mora-Valverde, D., y Villalobos-Villalobos, LA. (2022). Biomasa y bromatología de African Stargrass (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) con cinco estados de rebrote. *Agronomía Mesoamericana*, 33 (2): 477746. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47746>.

González, I., Betancourt, M., Fuenmayor, A., y Lugo, M. (2011). Producción y composición química de forrajes de dos especies de pasto Elefante (*Pennisetum sp.*) en el Noroccidente de Venezuela. *Zootecnia Tropical*, 29(1):103–112.

Holland, C. M., Marchant, K., Kriese-Anderson, L., Gamble, B., and Muntifering, R. (2018). Stockpiled “Tifton 85” bermudagrass for cow-calf production as influenced by nitrogen fertilization. *Journal of Animal Science*, 96(7): 2907–2922. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky190>.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2022). Condiciones actuales del tiempo. Estación Automática de Alfredo Volio en Cartago. <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionAlfredoVolio.html>

MAG. (2007). Agrocadena de leche índice de contenido. Caracterización Agrocadena de Leche, Región Central Oriental, 1–109. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-10747.pd>.

Méndez, R., Fernández, J.A., y Yáñez, E.A. (2019). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y composición de *Cynodon plectostachyus*. Revista veterinaria, 30(1): 48–53. DOI: <https://doi.org/10.30972/vet.3013899>.

Merlo-Maydana, F.E., Ramírez-Avilés, L., Ayala-Burgos, A.J., y Ku-Vera, J.C. (2017). Efecto de la edad de corte y la época del año sobre el rendimiento y calidad de *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Staff en Yucatán, México. Journal of the Selva Andina Animal Science, 4(2): 116–127.

Muñoz, C. W. (2020). Evaluación de dos tratamientos sobre el desarrollo productivo y vegetativo de *Cynodon nlemfuensis* (pasto estrella). <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/33745>.

Navarro-Zamora, L. A., y Villalobos-Villalobos, L. A. (2021). Composición morfológica del forraje ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) cv. Jumbo en respuesta a tres fórmulas

nitrogenadas. *Nutrición Animal Tropical*, 15(2): 99-122. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48409>.

Niedziński, T., Sierra, M.J., Łabętowicz, J., Noras, K., Cabrales, C. and Millán, R. (2021). Release of nitrogen from granulate mineral and organic fertilizers and its effect on selected chemical parameters of soil. *Agronomy* 11(10):1981. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101981>.

Núñez-Arroyo, J.M., Jiménez-Castro, J.P., Tobía-Rivero, C.M., Arias-Gamboa, L.M., Jiménez-Alfaro, E., y Padilla-Fallas, J.E. (2022). Efecto de la edad de rebrote y época del año sobre la biomasa y calidad bromatológica en gramíneas utilizadas en tres zonas agroclimáticas de Costa Rica (I PARTE). *Nutrición Animal Tropical*, 16(2): 91-114. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i1.50370>.

Pedreira, B. C. E, Pedreira, C. G. S., y Silva, S. C. da. (2007). Estrutura do dossel e acúmulo de forragem de *Brachiaria brizantha* cultivar Xaraés em resposta a estratégias de pastejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(2): 281–287. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200018>.

Peters, M., Franco, L.H., Schmidt, A., Hincapié, B. (2010). Especies forrajeras multipropósito opciones para productores del Trópico Americano. CIAT 2010.

Pozo, P.P.D., Herrera, R.S., García M., y Cruz, A.M. (2001). Análisis del crecimiento y desarrollo del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst*) con y sin adición de fertilizante nitrogenado. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 38(2): 189-195.

Rodríguez, G., Patiño, P. R., B, L. A., y Gil, J. (2011). Dinámica de crecimiento de pasturas con manejo rotacional en diferente topografía en un sistema de producción de carne vacuna en Córdoba, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 3(1):47–61.

Solano-López, M.J., y Villalobos-Villalobos, L.A. (2022). Fertilización nitrogenada en pastos del género *Cynodon*. *Nutrición Animal Tropical*, 16(1), 82–104. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i1.51542>.

Simioni, T.A., Hoffmann, A., Gomes, F.J., Mousquer, C.J., Teixeira, U.H.G., Fernandes, G.A., Botini, L.A., y de-Paula, D.C. (2014). Senescência, remoção, translocação de nutrientes e valor nutritivo em gramíneas tropicais. *Pubvet* 8:1551-1697. DOI: <https://doi.org/10.22256/pubvet.v8n13.1743>.

Tilahun, G., Asmare, B., Mekuriaw, Y., Tilahun, G., Asmare, B., and Mekuriaw, Y. (2017). Effects of harvesting age and spacing on plant characteristics, chemical composition and yield of desho grass (*Pennisetum pedicellatum Trin.*) in the highlands of Ethiopia. *Tropical Grasslands-Forrajés Tropicales*, 5(2): 77–84. DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(5\)77-84](https://doi.org/10.17138/tgft(5)77-84).

Moya, E., Ariza-Suárez, D., Baena-Aristizabal, C.D., Cortés-Gómez, S., Becerra-Mutis, L., y Riaño-Hernández, C.A. (2016). Efecto de la fertilización en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la avena (*Avena sativa*). Pastos y Forrajes, 39(2): 102–110.

Vargas, J., Leonard, I., Uvidia, H., Ramírez, J., Torres, V., Andino, M., y Benítez, D. (2014). El crecimiento del pasto *Panicum maximum* vs Mombaza en la Amazonía Ecuatoriana. Revista Electronica de Veterinaria, 15 (9) 1–7.

Vera, D., Cedeño, G., Cedeño, G., Cargua, J., y Garay, M. (2019). Eficiencia agronómica de nitrógeno y producción de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. En función de dos frecuencias de corte. Chil. j. agric. anim. Sci, 35(3): 251–260.

Vera, J.T. y Martín, G. (2011). Pasto estrella en suelos salinos del Noa. Cátedra de forrajes, Argentina. Facultad de Agronomía y Zootecnia de la U.N.T. Argentina. 19 (231):40-44.

Villalobos, L. (2012). Fenología, producción y valor nutritivo del pasto alpiste (*Phalaris arundinacea*) en la zona alta lechera de Costa Rica. Agronomía Costarricense 36:25-37. DOI: 10.15517/rac.v36i1.9962. IN: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v36n01_025.pdf.

Villalobos, L., y Arce, J. (2014). Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. valor nutricional. Agronomía Costarricense, 38(1): 133-145. DOI: 10.15517/RAC.V38I1.15162. IN: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v38n01_133.pdf.

Villalobos, L., Arce, J., y WingChing, R. (2013). Producción de biomasa y costos de producción de pastos estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), kikuyo (*Kikuyuocloa clandestina*) y Ryegrass Perenne (*Lolium perenne*) en lecherías de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 37(2):91–103. http://www.mag.go.cr/rev_agr/v37n02_091.pdf.

Villalobos, L., y WingChing-Jones, R. (2019). Remoción mecánica del material senescente para la recuperación de pasturas. *Agronomía Mesoamericana*, 30 (3): 821–840. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.36625>.

WingChing, R., Lorío, L.U., Barquero. (2016). Uso de *Azospirillum* spp. Como biofertilizante en la producción de estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*). *Cuadernos de Investigación UNED*, 8(2): 259–265. DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v8i2.1570>.

6. CAPÍTULO 2. VALOR NUTRICIONAL DEL PASTO ESTRELLA AFRICANA FERTILIZADA CON FUENTES ORGÁNICAS E INORGÁNICAS

<https://doi.org/10.53588/alpa.320205>

Resumen

La producción de forrajes de calidad es la base para el desarrollo de la ganadería y para la producción de alimentos para el consumo humano. La investigación tuvo como objetivo evaluar la respuesta del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con diferentes fertilizantes y edades de cosecha sobre la calidad de la pastura. El experimento se realizó en la provincia de Cartago, Costa Rica, entre los meses de mayo a octubre de los años 2019 y 2021. Se utilizó diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA) y fue analizado mediante un modelo lineal generalizado que incluyó edad de rebrote, año y tipo de fertilizante como factores principales. Los resultados indican que no hubo efecto del tipo de fertilizante ($p > 0,05$) sobre las variables nutritivas de la pastura. Las edades de rebrote mostraron efecto ($p < 0,05$), para las variables de materia seca (MS), proteína cruda (PC) y digestibilidad *in vitro* de la MS (DIVMS), teniendo valores más altos para edades de rebrote de 45 días. Las variables FDN, FDA, LDA, ED, EM y EN_L aumentaron conforme aumentó la edad de cosecha y en tanto la DIVFDN y TDN disminuyeron. Los hallazgos indican que los componentes nutritivos de la pastura se vieron afectados por las edades de rebrote, confirmando que el manejo de pasturas permite lograr cosechas de biomasa forrajera de alta calidad y mejorar la disponibilidad de nutrientes para los bovinos.

Palabras clave: Pasto; Cosecha, Fertilización, Nutrición.

Abstract

The production of quality fodder is the basis for the development of livestock and for the production of food for human consumption. The objective of this study was to evaluate the response of African Star grass (*Cynodon nlemfuensis* Vandyerst.) to different fertilizers and days of regrowth on pasture quality. The experiment was conducted in the province of Cartago, Costa Rica, from May through October in 2019 and 2021. A completely randomized block design (CRBD) was used and was analyzed using a generalized linear model that included days of regrowth, year, and type of fertilizer as the main factors. The results indicated that there was no effect of the fertilizer ($p > 0,05$) on the pasture nutritive variables. Days of regrowth showed effect ($p < 0,05$), for dry matter (DM), crude protein (CP) and *in vitro* DM digestibility (IVDMD), having greater values at 45 days regrowth. The variables NDF, ADF, ADL, DE, ME and NE_L increased with the days if regrowth, while the DIVFDN and TDN decreased. The findings indicate that the pasture nutritive components were influenced by the days of regrowth, confirming that pasture management plans are the basis to achieve high quality fodder and improve nutrient supply to cattle.

Key words: Pasture; Harvest; Fertilization; Nutrition.

Introducción

La ganadería es de fundamental importancia para América Latina y el Caribe (ALC), ya que representa una fuente de alimentos básicos, que contribuye a la seguridad alimentaria y a la economía de los países de la región (FAO, 2021). En Costa Rica este sector ha contribuido al desarrollo económico, agropecuario, comercial y social del pueblo costarricense. (Saborío y Gutiérrez 2010). Según INEC (2022), en el país existe una población de 1 509 011 bovinos y 1 044 909 hectáreas de pasturas.

Los pastos son la principal fuente de alimentación en la ganadería tropical, sin embargo, son cultivados en suelos de media y baja fertilidad, lo que limita su rendimiento, valor nutricional y, consecuentemente, la productividad animal (Ram y Trivedi, 2013). En este sentido, la fertilización busca mantener el suelo en un nivel de producción óptimo así como incrementar la producción y el valor nutricional de las pasturas que son sometidas a dichas prácticas (Pezo y García 2018).

La fertilidad de los suelos es un factor clave para el crecimiento de las plantas y tiene una gran influencia sobre la productividad y la calidad nutricional del forraje (Moya *et al.* 2016). Las prácticas de fertilización en pasturas buscan restituir los nutrientes que se extraen del suelo, el nitrógeno es el nutriente más comúnmente aplicado por los productores para mejorar la productividad de biomasa y el valor nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) (Pezo y García 2018). Para compensar esta extracción se han utilizado diversas fuentes de suministro (orgánica, inorgánica y biofertilizantes), las cuales

buscan mejorar la nutrición del suelo y potencializar la producción de forraje (Moreno *et al.*, 2017; Solano-López y Villalobos-Villalobos, 2022).

En Costa Rica, la ganadería de leche se basa en el uso de pasturas perennes tropicales, dentro de las cuales el pasto estrella africana sobresale como uno de los más usados por su versatilidad y potencial productivo, pudiendo establecerse con una amplitud de rango de elevación y en potreros pequeños (desde 300 m²), usando diferentes arreglos para los sistemas de rotación de pasturas (MAG, 2007; Tropical Forages, 2023)

La fertilización de pasturas es una práctica agronómica que cada vez está tomando más importancia en la gestión de las explotaciones ganaderas, por ello conocer sobre el efecto que causan los distintos tipos de fertilizantes (orgánicos e inorgánicos) y los días de rebrote sobre la calidad nutricional de la pastura es muy importante para identificar opciones de mejora y poder realizar una gestión efectiva de los recursos de las fincas.

Materiales y métodos

Conducción del experimento

El estudio se realizó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en el Alto de Ochomogo en la provincia de Cartago (9°55'10" N, 83°57'20" O), a una altitud de 1542 m.s.n.m., precipitación media anual de 2050 mm (distribuida de mayo a octubre), temperatura media anual de 19,1°C (máxima 23,6 °C y mínima 14,5 °C) y humedad relativa media de 84% (IMN,2022).

El experimento se llevó a cabo en 2019 y 2021 en un área de 1619 m² las cual era parte de potreros previamente establecidos por la finca con pasto estrella africana, donde se aplicaba pastoreo bajo un sistema de rotación cada 25 a 30 días. En el año 2020 se suspendió el experimento por la pandemia del Covid-19 y, durante ese periodo, el área de experimento se pastoreó con novillas y vacas secas. En el 2021 se retomó el estudio en la misma área asignada en 2019, y en ambos años se realizó una cosecha de uniformización (a 5 cm sobre el nivel del suelo) al inicio de la época lluviosa (mayo) al igual que en el 2019, usando una motosegadora autopropulsada, con el objetivo de brindar 40 días de recuperación al pasto previo al primer muestreo.

El manejo agronómico fue el mismo para todas las parcelas con una misma dosis equivalente de nitrógeno, se presentó baja presencia de malezas de hoja ancha, las que fueron eliminadas de forma manual y no hubo presencia de plagas o enfermedades evidentes durante el período de estudio. Se asignaron aleatoriamente un total de 24 parcelas en cuatro bloques de 6

parcelas cada uno con un área de 6 m² por parcela (2×3 m) y separadas por pasillos de 2 m de ancho. En 2021, las parcelas se establecieron nuevamente respetando el mismo diseño usado en el año 2019 para la asignación de los tratamientos. En relación al estado del suelo, se realizó un análisis, el cual está descrito en el primer capítulo de la tesis, en donde no se encontraron deficiencias que ameritaran la utilización de enmiendas.

Los tratamientos evaluados fueron: C= sin fertilización (testigo absoluto), U= urea (46% N), AN= nitrato de amonio (33,5% N) US= urea protegida con azufre (40% N + 6% S) SL= fertilización orgánica con base en excretas bovinas (0,01 g.L⁻¹ de N), AZ= *Azospirillum oryzae* PCJI (dosis de 16 L por parcela, para una concentración mínima de 10⁸ UFC.ml⁻¹). Con excepción de los tratamientos C y AZ, se aplicó una dosis anual de nitrógeno equivalente de 200 kg ha⁻¹ para todos los tratamientos, con cuatro repeticiones por tratamiento. Para el caso de AZ y SL se aplicaron con una regadera y con cubetas, respectivamente, aplicando capas uniformes en el área de cada parcela.

Además, se evaluó el efecto sobre los componentes nutritivos de la pastura basado en tres edades de rebrote (35, 45 y 55 días), las cuales correspondieron con edades fenológicas de la planta de 6 y 7 hojas. El experimento se realizó durante la época lluviosa (mayo a octubre) durante los años 2019 y 2021.

Cuadro 2. 1. Fechas y días de rebrote a la cosecha del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) en Cartago (Costa Rica)

Fecha de aplicación de fertilizantes		Fecha de cosecha		Días de rebrote (d)	Edad fenológica (hojas. rebrote ¹)	Grados días acumulados ^a
2019	2021	2019	2021			
07-06	31-05	01-08	27-07	55	7,1	1005
03-08	03-08	17-09	17-09	45	6,4	833
01-10	21-09	05-11	26-10	35	6,8	640

^a Elaboración con base en datos de Instituto Metrológico Nacional de Costa Rica.

Valor nutricional

Las parcelas fueron cosechadas usando una motosegadora auto-impulsada con una altura de corte de 5 cm y el material cosechado se colocó en lonas plásticas previamente taradas. Las lonas con el pasto fueron pesadas utilizando una pesa romana electrónica colgante con capacidad de 160 kg (0,05± kg) colocada en campo en un sistema de trípode metálico. Luego de pesado el forraje fresco, se tomó una muestra representativa de 1,5 kg. A partir de estas muestras compuestas se procesaron y se llevaron al laboratorio de Anatomía de la Escuela de Zootecnia de la Universidad de Costa Rica, donde se secaron en un horno a 60°C por 48 horas, para estimar el porcentaje de materia seca (MS) presente en las muestras.

Las muestras fueron procesadas con Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS por sus siglas en inglés), utilizando la ecuación desarrollada para pasto estrella africana por el Centro de Investigación en Nutrición Animal (CINA) de la Universidad de Costa Rica, la que sigue el método de referencia ISO 12099, que regula la aplicación de la espectrometría de infrarrojos cercanos (NIR) para alimentos para animales, cereales y productos de cereales molidos.

Mediante el uso de este método se obtuvieron parámetros nutricionales relacionados a materia seca (MS, %), proteína cruda (PC, %), fibra detergente neutra tratada con amilasa (α FDN, %), fibra detergente ácida (FDA, %), lignina detergente ácida (LDA, %), cenizas (Cen, %), total de nutrientes digestibles (TDN), Carbohidratos no fibrosos (CNF), digestibilidad *in-vitro* de la materia seca (DIVMS, %), la digestibilidad *in-vitro* de la fibra (DIVFDN, %) y energía neta de lactancia (EN_L , Mcal Kg⁻¹ de MS).

El ajuste de la ecuación del NIRS se realizó con base en los análisis de química húmeda, desarrollados siguiendo los procedimientos establecidos para MS y PC por AOAC (1990), para el contenido de la pared celular (α FDN) según Van Soest *et al.* (1991), y la digestibilidad *in-vitro* de la materia seca (DIVMS) y la fibra detergente neutra (DIVFDN) según Van Soest y Robertson (1985).

Se analizaron un total de 144 muestras del pasto Estrella por medio de la técnica de Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS) y 14 muestras realizadas por química húmeda para establecer control de los resultados obtenidos por NIRS.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados (BCA) con 6 tratamientos (C, U, AN, US, SL, AZ) en 4 bloques (repeticiones) para un total de 24 parcelas. La información de los componentes nutricionales se analizó mediante un modelo lineal generalizado y se realizó una prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) como prueba de comparación de medias. En dicho modelo se analizó el efecto del tratamiento, la fecha de muestreo y la interacción de ambos. Para controlar el efecto de cosechas previas, el tratamiento se anidó en el factor de parcela. El análisis de los datos se realizó por medio del software RStudio® versión 1.4.1103 para Windows.

Resultados

Efecto del tipo de fertilizante sobre el valor nutricional del pasto estrella africana

La evaluación realizada para las variables MS, PC, CNF, TDN y Cen, indicó que el tipo de fertilizante no tuvo efectos significativos ($p > 0,05$) sobre las medias de estas variables en el pasto estrella africana; sin embargo, el tratamiento control presentó valores más bajos de PC que en aquellos que recibieron fertilización (Cuadro 2.2).

Cuadro 2. 2. Materia seca (MS), proteína cruda (PC), carbohidratos no fibrosos (CNF), total de nutrimentos digestibles (TDN) y cenizas (Cen) del del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst.*) tratado con cinco fertilizantes.

Tratamientos	MS %	PC %	CNF %	TDN %	Cen %
Control	21,05 ^a	13,67 ^a	10,77 ^a	57,04 ^a	11,33 ^a
Urea	20,25 ^a	14,42 ^a	11,13 ^a	57,16 ^a	11,25 ^a
Nitrato de amonio	20,01 ^a	14,17 ^a	11,13 ^a	57,17 ^a	11,46 ^a
Urea protegida	19,46 ^a	14,41 ^a	11,39 ^a	57,25 ^a	11,61 ^c
Purines	20,27 ^a	14,57 ^a	11,40 ^a	57,61 ^a	11,21 ^a
<i>Azospirillum oryzae</i>	20,78 ^a	14,65 ^a	12,41 ^a	57,75 ^a	11,11 ^c
Sig.	0,29	0,76	0,83	0,97	0,47

^{abc} Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

En relación a los componentes estructurales del pasto (Cuadro 2.3), como la LDA, carbohidratos estructurales como α FDN y FDA, así como las digestibilidades *in vitro* tanto de la materia seca como de la fibra detergente neutro (DIVMS, DIVFDN), y los componentes

energéticos (ED, EM y EN_L) no presentaron diferencias debidas a los tratamientos de fertilización evaluados ($p>0,05$).

Cuadro 2. 3. Lignina, fibra (acida y neutra), digestibilidades y componentes energéticos del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) tratado con cinco fertilizantes.

Tratamiento	LDA	α FDN	FDA	DIVMS	DIVFDN	ED	EM	EN _L
	%	%	%	%	%	Mcal Kg ⁻¹ de MS		
Control	3,20 ^a	66,06 ^a	35,05 ^a	71,41 ^a	55,76 ^a	2,52 ^a	2,10 ^a	1,28 ^a
Urea	3,23 ^a	65,85 ^a	33,71 ^a	71,94 ^a	55,97 ^a	2,54 ^a	2,11 ^a	1,32 ^a
Nitrato de amonio	3,29 ^a	65,66 ^a	33,17 ^a	72,36 ^a	55,76 ^a	2,54 ^a	2,11 ^a	1,32 ^a
Urea protegida	3,40 ^a	65,55 ^a	33,52 ^a	72,29 ^a	57,05 ^a	2,56 ^a	2,13 ^a	1,31 ^a
Purines	3,47 ^a	64,78 ^a	34,17 ^a	73,44 ^a	57,40 ^a	2,59 ^a	2,16 ^a	1,34 ^a
<i>Azospirillum oryzae</i>	3,53 ^a	64,93 ^a	32,65 ^a	73,13 ^a	57,46 ^a	2,60 ^a	2,17 ^a	1,33 ^a
Sig.	0,96	0,89	0,49	0,64	0,94	0,95	0,96	0,49

^{abc} Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

Efecto de la edad de rebrote sobre el valor nutricional del pasto estrella africana

La edad de rebrote mostró efectos significativos ($p<0,05$) sobre los componentes nutricionales evaluados en el pasto estrella africana (Cuadro 2.5), se observó mayores contenidos de MS ($p<0,05$) cuando la pastura era cosechada a los 45 días (21,45%), los menores porcentajes fueron encontrados a edades de 35 y 55 días con 19,9 y 20,08%, respectivamente, la variación de MS se mantuvo en un rango estrecho, entre 1,37% y 1,49%, lo que demuestra que no hubo una diferencia importante en los niveles de este componente (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Componentes nutricionales del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) por edades de rebrote.

Edad	MS %	PC %	α FDN %	FDA %	LDA%	CNF %	Cen %
35	19,59 ^a	14,61 ^a	62,21 ^a	31,00 ^a	2,37 ^a	13,72 ^a	11,56 ^a
45	21,45 ^b	15,08 ^a	65,24 ^b	33,67 ^b	3,14 ^a	13,40 ^a	10,69 ^b
55	20,08 ^a	13,12 ^b	68,97 ^c	36,56 ^c	3,68 ^a	7,00 ^b	11,72 ^a

^{abc} Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

La variable proteína cruda (PC) presenta diferencias ($p < 0,05$) entre las edades evaluadas, identificando que los mayores contenidos de PC, fue para cosechas realizadas a una edad entre 35 y 45 días con contenidos de proteína de 14,61 a 15,08% respectivamente, los menores contenidos se observan para edades de 55 días, indicando un comportamiento acorde con la fenología y cambios estructurales de la planta, lo cual indica que en menores edades un mejor comportamiento para esta variable.

Para las variables α FDN y FDA se observa que en los tres cortes se presentan diferencias significativas entre si ($p < 0,05$), produciendo menores valores para cortes de 35 días (α FDN con 62,21% y para FDA con 31,00%), aumentando conforme avanzó la edad de rebrote. En relación con el contenido de ceniza (Cuadro 2.4), se observó que los mayores contenidos se encuentran cuando el pasto es cosechado a los 35 y 55 días con valores de 11,52 y 11,72% respectivamente, sin evidenciarse una tendencia clara sobre este componente en la pastura.

Cuadro 2. 5. Digestibilidades y expresiones de energías del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst.*) por edades de rebrote.

Edad	DIVMS %	DIVFDN %	TDN %	ED	EM	EN _L
Mcal Kg ⁻¹ de MS						
35	75,93 ^a	61,0 ^a	59,9 ^a	2,80 ^a	2,38 ^a	1,42 ^a
45	72,52 ^b	57,7 ^b	57,5 ^b	2,57 ^b	2,15 ^b	1,32 ^c
55	68,61 ^c	51,5 ^c	54,6 ^c	2,29 ^c	1,86 ^c	1,20 ^b

^{abc} Diferente letra en una misma columna representa diferencia significativa según la prueba de Tukey; $\alpha = 0.05$.

La lignina detergente ácida (LDA) presentó diferencias significativas ($p > 0,05$), para las edades de rebrote evaluadas (Cuadro 2.5), se evidenció menor porcentaje de LDA para edades de 35 días (2,37%) y mayores porcentajes para edades de 45 a 55 (3,15 y 3,68% respectivamente), se observó que conforme se aumentó la edad de rebrote aumentó el porcentaje de LDA en la pastura.

La variable digestibilidad *in vitro* de la fibra y la materia seca, presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) para las edades de rebrote evaluadas, mostrando una tendencia a disminuir conforme avanza la edad de rebrote (Cuadro 2.5).

El Total de Nutrientos Digestibles (TDN) presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) para las edades de rebrote evaluadas (Cuadro 2.5), observándose mayores porcentajes de nutrientes digestibles para edades de 35 días (59,9%) y menores para edades de 45 a 55

(57,5 y 54,6% respectivamente). La TDN mostró una tendencia a disminuir conforme aumentaba la edad de rebrote.

El componente energético relacionado a ED, EM y ENL, presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) para las tres edades de rebrote, mostrando mayor contenido de energía cuando la pastura fue cosechada a una edad de 35 días con 13,72, 2,38 y 1,42 Mcal Kg⁻¹ de MS para ED, EM y EN_L respectivamente.

Discusión

Efecto de las fuentes de fertilizante sobre la calidad nutricional del pasto

En la presente investigación las variables nutricionales (Cuadro 2.2 y 2.3) no evidenciaron diferencias estadísticas debidos a la aplicación de nitrógeno y las fuentes utilizadas ($p > 0,05$), lo que concuerda con lo expresado por Borges *et al.* (2012), donde evaluando el efecto de la fertilización sobre parámetros productivos y químicos del pasto no se evidencio efecto por parte de la fertilización sobre las variables químicas evaluadas. En esta investigación se evidencia diferencias en los contenidos de proteína y materia seca, en relación al tratamiento control y fuentes de fertilización inorgánica. Similares resultados se reportaron en Argentina, donde evaluando pasto estrella no se encontró diferencias significativas en proteína y fibra detergente neutro causadas por el efecto de adicionar distintas dosis de nitrógeno en la pastura, pero si se evidenció una mayor concentración de proteína y menor fibra cuando se aplicaba la fertilización en pastura en relación al tratamiento control (sin fertilizante) (Méndez *et al.* 2019).

En Colombia, Gacheta (2019), encontró datos similares al evaluar cuatro niveles de fertilización orgánica y química (urea, fosfato di amónico, sulfato de potasio) sobre la calidad nutritiva (digestibilidad y contenidos de FDA, FDN, proteína) de los forrajes Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, ahora *Cenchrus clandestinus*), Ryegrass (*Lolium perenne*), Falsa Poa (*Holcus lanatus*), Trébol blanco (*Trifolium repens*) Carretón (*Trifolium pratense* L), Lotus (*Lotus uliginosus*) y Azul orchoro (*Dactylis glomerata*), en donde indican que no se encontró diferencias por efecto del fertilizante sobre las variables evaluadas, pero al igual que en las investigaciones anteriores se reportó mejoras considerables de las variables

nutritivas por efecto del uso de fertilizantes en comparación con el tratamiento control, indicando el efecto positivo de la practica sobre la pastura.

Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021), analizando el efecto de compost, purines y urea, identificaron un efecto significativo ($p < 0,05$) para las variables proteína cruda y fibra detergente neutra, evidenciando una respuesta mayor para el tratamiento químico basado en urea (16,7% de PC y 56,9 de FDN). Por su parte Apollon *et al.* (2022), evaluando fertilización orgánica (estiércol bovino) e inorgánica (fertilizante mineral 33-7-70 de N, P₂O₅ y K₂O) sobre la calidad (proteína cruda, calcio, fósforo, fibra cruda) en pasto *Brachiaria brizantha*, observaron un efecto positivo de los fertilizantes de origen químicos sobre los porcentajes de proteína y fibra cruda de la pastura.

El contenido de proteína cruda del pasto estrella africana osciló entre 13 y 14%, (Cuadro 2.3), estando dentro del rango de valores reportados en otros estudios en que se evaluó esta especie bajo fertilización con distintas dosis y fuentes de fertilización, los cuales indicaron que a pesar de no evidenciar variaciones importantes entre los tratamientos evaluados, observaron una mejora evidente por el uso de fuentes de fertilización para este componente en la pastura (Garay *et al.*, 2004; Cecato *et al.*, 2008; Holland *et al.*, 2018).

El contenido de materia seca obtenida para los tratamientos evaluados (en época lluviosa), fue similar a la reportada por Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021), quienes evaluando purines y fertilizantes sintéticos, reportan valores entre 19 y 21%. Por su parte WingChing-Jones *et al.* (2016) evaluando alternativas de fertilización, indican contenidos de

MS entre 21 y 22%. Borges *et al.* (2012) reporta datos superiores a los encontrados en esta investigación, entre 22 y 27% de materia seca, estas variaciones pueden atribuirse a la diferencia entre los periodos de valuación, ya que esta investigación realizó evaluaciones durante periodo seco, periodo en el que la planta tiende a aumentar el contenido de materia seca por las condiciones de clima y el comportamiento fisiológico de la misma.

La FDN en esta investigación (64,78–65,85%) concuerdan con datos encontrados en Brasil en donde evaluando dosis de NPK (100, 150 y 200 kg ha⁻¹) y urea (100, 150 y 200 kg ha⁻¹) en el rendimiento y la composición bromatológica del pasto estrella africana, la FDN fue de 67 y 69%, sin evidenciar diferencias entre los tratamientos evaluados (Manica y Gai 2018). Similares datos se expresan al evaluar dosis de fertilización (56 , 112, y 168 kg N.ha⁻¹ en forma de nitrato de amonio) en pasto Tifton (*Cynodon dactylon*) donde se reportan datos entre 63 y 66% de FDN, así mismo indican que a pesar de no encontrar diferencias entre los tratamientos evaluados, se evidencia un contenido de fibra menor por efecto del uso de fertilizantes en comparación con el tratamiento control (sin fertilización) (Holland *et al.*, 2018). En Brasil, trabajando con diferentes genotipos de *Cynodon* se reportó un contenido de FDN (69 y 71%) superior al encontrado en esta investigación, esta diferencia puede estar relacionada a los periodos de evaluación, ya que en esta investigación se reportan mediciones acumuladas en invierno y verano, lo que puede tener efecto sobre el aumento de componentes estructurales de la pastura (Cecato *et al.*, 2008). En contraste con esta investigación, Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021), reportan contenidos menores de FDN (56 y 59%), obteniendo los valores menores en los tratamientos basados en fertilización sintética y mayores para tratamientos orgánicos, esta discrepancia en los datos obtenidos, puede

relacionarse a las edades de cosecha usadas en esta investigación, ya que se reporta una edad constante de corta de 28 días, indicando que con esta edad los contenidos de pared celular son menores en la pastura, lo cual tiene relación sobre la cantidad de FDN reportada.

En relación con fibra detergente ácida (FDA), en esta investigación se obtuvieron porcentajes de 32–34%, similares a los reportados en Estados Unidos, donde usando distintas dosis de fertilización nitrogenada (0, 39, 78, 118, 157 kg de N) y reportan FDA entre 33 y 34% (Johnson *et al.*, 2001). En Brasil, Manica y Gai (2018), reportan FDA de 35 a 38% por efecto del uso de dosis de NPK (100,150 y 200 kg ha⁻¹) y urea (100,150 y 200 kg ha⁻¹) en pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). Así mismo Holland *et al.* (2018), reportan FDA de 29 a 30% basadas en el uso de fertilizantes nitrogenados (nitrato de amonio en diferentes dosis: 56, 112 y 168 kg N ha⁻¹) en pasto bermuda (*Cynodon dactylon*) var. Tifton, en general en las investigaciones antes mencionadas no se evidenciaron diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados en relación a la FDA, pero se observó una disminución de este componente por efecto de uso de fuente de fertilización, en comparación con el tratamiento control (sin fertilización), lo cual supone un afecto positivo por el uso de la fertilización.

La Lignina detergente ácida (LDA) obtenida en esta investigación (Cuadro 2.4) osciló entre 3,20 hasta 3,53% sin evidenciar diferencias entre los tratamientos analizados, similares resultados reporta Holland *et al.* (2018), donde evaluando el efecto nitrato de amonio en diferentes dosis (56, 112 y 168 kg N ha⁻¹), reportan LDA entre 3,1 y 4,3%, sin identificar diferencias entre los tratamientos. La misma tendencia indican Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca (2021) en pasto estrella africana tratado con distintas fuentes de fertilizantes

(compost, purines y urea) , obteniendo LDA de 5,6 a 5,9%, sin evidenciar diferencias por el uso de fertilizante. Estas investigaciones sugieren que, aunque puede observarse disminuciones de LDA cuando se usa fertilización en la pastura, no se evidencia un efecto contundente por el tipo de fertilizante utilizado, este componente también pudo ser afectado por condiciones ambientales como precipitaciones y temperatura, las cuales influyen sobre el aumento o disminución de este componente en la pastura.

La TDN varió entre 57,04 hasta 57,75% sin presentar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p > 0,05$), estos datos son similares a los reportados Villalobos y Arce (2014), en donde se realizó una evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana y reportan valores de TDN de 55 hasta 64%. Rincón *et al.* (2018) en Colombia, reportan tendencias similares al evaluar el efecto de la fertilización sobre el valor nutritivo de *Brachiaria humidécera* cv. Llanero, con TDN de 57 hasta 61%, basado en la información obtenida, se observa que para este componente la fertilización con distintas fuentes no afectó su comportamiento en la planta.

La digestibilidad *in vitro* de la materia seca (71–73%) y la fibra detergente neutra (55 - 57%), en esta investigación se mantuvieron relativamente estables, estos datos son similares a los reportados por Solano-López y Villalobos-Villalobos (2022), los cuales indican que cuando se hace un uso de nitrógeno de entre 25 y 100 kg.ha¹ , se obtienen digestibilidades de alrededor del 70,7%. En cambio, otros autores reportan datos menores a los encontrados en esta investigación, condicionados por el uso de fertilización nitrogenada obteniendo digestibilidades de entre 50 y 62% (Cecato *et al.*, 2008; Holland *et al.*, 2018), estas

diferencias pueden basarse en los periodos de cosecha, los cuales varían de los evaluados en esta investigación, además del clima, el suelo y el manejo del forraje, estos factores pudieron alterar el componente digestible en la pastura y ocasionar estas diferencias en las estimaciones.

La digestibilidad *in vitro* de la fibra (DIVFDN) en esta investigación (Cuadro 2.3) se mantuvo entre 55,97-57,05, sin mostrar diferencias entre los tratamientos evaluados ($p>0,05$). Estos datos se asemejan a los reportados en Colombia, donde evaluando *Pennisetum purpureum*, reportan valores entre 54,18–64,26% (Navarro y Roa, 2018). En Costa Rica, evaluando distintas especies de pasturas y usando como base una fertilización nitrogenada menor a 200 kg ha⁻¹, se reportan para pasto estrella africana DIVFDN de 59,1 hasta 79,6% para la época lluviosa (Núñez *et al.*, 2022). Villalobos y WingChing-Jones (2020) reporta datos superiores a los encontrados en esta investigación con 61,26, 73,31 y 77,17% para los pastos estrella africana, Kikuyo y Ryegrass, respectivamente. Estos mismos autores, analizaron el efecto de remoción mecánica en pastos estrella africana (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst.*) y Mombasa (*Megathyrsus maximus Jacq.*) reportando valores de DIVFDN que oscilaron entre 48 hasta 62% para pasto Mombasa y de 60 hasta 70% para pasto estrella africana, estas diferencias pueden estar atribuidas a las prácticas de manejo intrínsecas utilizadas en las explotaciones evaluadas (Villalobos y WingChing-Jones, 2019).

En relación con datos del contenido energético de la pastura, los datos de ED, EM y EN_L, mostraron un comportamiento similar, sin diferencias significativas ($p>0,05$) para los tratamientos evaluados. La ED osciló entre 2,52–2,60 Mcal Kg⁻¹ de MS, la EM 2,10–2,17

Mcal Kg⁻¹ de MS y la EN_L entre 1,31–1,34 Mcal Kg⁻¹ de MS para los tratamientos evaluados. Estos datos se asemejan a los reportados en Costa Rica, donde usando producción de gas *in vitro* para estimar la energía neta de lactancia, se indican datos de 1,20, 1,35 y 1,57 Mcal Kg⁻¹ de MS, para forraje de estrella africana, ensilado de maíz y ryegrass perenne, respectivamente, observaron similitud en los datos con relación a esta investigación (Sobalvarro-Mena *et al.*, 2020), estos resultados no permiten evidenciar una relación significativa entre la fertilización y los componentes energéticos de la pastura.

Efecto de la edad de rebrote sobre los componentes nutritivos de la pastura

Se identificaron diferencias en los porcentajes de materia seca entre edades de 35 y 55 días, los que fueron menores con relación a cosechas realizadas a 45 días (21,45%) (Cuadro 2.5), no se determinó una tendencia clara con respecto a esta variable. Similares datos reporta Tila *et al.* (2017), con pasto Desho (*Pennisetum pedicellatum Trin*) y distintas edades de rebrote (75, 105, 135 días) indican que no se evidencio un efecto de la edad corte en relación a los porcentajes de materia seca en la pastura evaluada. Según Rodríguez (2009), con pasto Mombaza (*Panicum maximum*) reportó MS entre 21 a 27%, con edades de corte de 10 a 60 días respectivamente, indicando un aumento del componente conforme aumenta la edad de rebrote, pero sin evidenciar una relación lineal entre ambos. Los datos de esta investigación sugieren que pueden existir un efecto de otros factores que no fueron objeto de estudio como factores ambientales y de manejo que pudieron influir en el resultado obtenido, pero es evidente que el retraso en la cosecha del pasto mejora el contenido MS, porque en el proceso de maduración del pasto se da una mayor acumulación de compuestos estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que tiene efecto sobre el contenido de MS.

La concentración de proteína cruda (Cuadro 2.4) fue mayor a edades de 35 y 45 días (14,61 y 15,08% respectivamente) y la menor concentración de proteína fue para edades de rebrote de 55 días (13,12%); similar comportamiento reporta Tilahun *et al.* (2017) los cuales reportan que la proteína cruda disminuyó a medida que se retrasaron las fechas de cosecha (10,9% a los 75 días y 9,3% a los 135 días). Por su parte Pinto *et al.* (2019) con pasto Elefante (*Pennisetum purpureum Schum.*) y diferentes edades de corta de 30, 60, 90 120 y 150 días, indican valores de proteína de 12,32 10,64, 7,72, 8,74% respectivamente, indicando que al realizar cortes tempranos se obtiene mayor cantidad de proteína. Este efecto puede explicarse debido a que a medida que avanza la edad fisiológica de la planta, aumentan los porcentajes de carbohidratos estructurales, se reduce la proporción de nutrientes potencialmente digeribles (carbohidratos solubles, proteínas, minerales y vitaminas), lo cual tiene un efecto en la calidad de la pastura (Ferrufino-Suárez *et al.*, 2022).

El contenido de cenizas encontrado en el pasto estrella africana fue similar en las tres edades de cosecha (Cuadro 2.4), observando mayores contenidos para edades de 35 y 55 días. Estos resultados fueron similares a los reportados por su parte Villalobos y Arce (2014) con el mismo pasto con 10,72 hasta 12,27%. Estos datos difieren a los reportados en Venezuela donde Borges *et al.* (2012) evaluando días post cosecha de 21, 35, 49 y 63, encontraron contenidos de cenizas de 8,83; 9,31; 8,98; 9,05% respectivamente., similar comportamiento expresaron Morocho *et al.* (2023) evaluando Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum Schumach x Pennisetum glaucum L.*) con edades de cosecha de 45, 60, 75 y 90 días reportan 12,97; 15,04; 12,75 y 13,70%, respectivamente. Las diferencias encontradas con relación a

otras investigaciones pueden atribuirse a las diferencias entre los días de rebrote y el tipo de forraje evaluado, la información obtenida en la investigación no permitió establecer un efecto contundente para esta variable.

La fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA), mostraron una tendencia similar, a medida que incrementó la edad de rebrote incrementó el contenido de ambos componentes. Comportamiento similar observaron Tilahun *et al.* (2017) evaluando pasto Desho y Villalobos (2012) en pasto alpiste y por otros investigadores, indicando que estos cambios se pueden atribuir a cambios en la estructura y composición de la pared celular atribuidas al proceso natural de madurez de la planta.

La lignina detergente ácida (LDA) encontrada (Cuadro 2.5), aumentó conforme se retrasó la edad de rebrote, esta información coincide con lo encontrado por Núñez *et al.* (2022) en pasto estrella africana y por Morocho *et al.* (2023), los cuales indican una tendencia a aumentar los porcentajes de LDA conforme aumenta la edad de la pastura, este comportamiento es el esperado por la madurez de la pastura para fortalecer sus paredes celulares y generar soporte de la planta.

El total de nutrientes digestibles (TDN) presentó mejor comportamiento para edades de rebrote de 35 días, y los valores tendieron a disminuir con la edad de cosecha (Cuadro 2.6), esta tendencia fue observada previamente por Carranza (2016) para pasto Maralfalfa y King Grass, y Pinto *et al.* (2019) trabajando con diferentes genotipos de *Pennisetum purpureum* (hoy *Cenchrus purpureus*), indican este mismo comportamiento, confirmando que la edad de

rebrote tiene efecto sobre los nutrientes digestibles de la planta, esto se relaciona con el aumento de la lignina y la disminución de la digestibilidad de otros componentes de la pared celular, los cuales se vieron afectados conforme aumentaba o disminuía la edad de rebrote y que también fueron descritos en esta investigación.

La digestibilidad presentó valores mayores para la edad de rebrote 35 días (75,93%) y se redujo conforme se retrasó la cosecha (Cuadro 2.5). Similar comportamiento expresa Villalobos (2012), con pasto alpiste (*Phalaris arundinacea*), Correa et al. (2016) con kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, ahora *Cenchrus clandestinus*) y Ferrufino-Suárez et al. (2022), con pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis Vandyerst*), estos autores reportaron una tendencia a la disminución de la digestibilidad, conforme avanza la edad de cosecha, lo cual puede asociarse al aumento de la fibra detergente neutra (FDN) y la deposición de lignina al aumentar la pared celular, lo que limita la capacidad de digestibilidad de la pastura (Villalobos, 2012).

Similares resultados se expresan para la digestibilidad *in vitro* de la fibra (DIVFDN), la cual muestra una tendencia a la disminución conforme aumenta la edad de rebrote (Cuadro 2.5). Estos datos se asemejan a los reportados por Núñez-Arroyo et al. (2022), evaluando edad de rebrote y época del año indican DIVFDN para pasto estrella africana, Oliveira et al. (2014) con pasto Cynodon (Tifton 85, Jiggs, Russel, Tifton 68 y Vaquero) y Pinto et al. (2019) con pasto Capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum.*), los cuales reportan el mismo comportamiento en sus investigaciones, indicando que conforme aumenta la edad de rebrote disminuye de la DIVFDN.

La energía digestible (ED), metabolizable (EM) y neta de lactancia, presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las edades de rebrote evaluadas, teniendo un contenido energético mayor a edades de 35 días y se observó una disminución conforme se retrasaba la cosecha, estos resultados son similares a los reportados Villalobos (2012) con pasto alpiste, Carranza (2016), con pasto Maralfalfa (*Pennisetum sp*) y King Grass (*Pennisetum purpureum*) y Correa et al. (2016) evaluando kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, ahora *Cenchrus clandestinus*), reportan mayores contenidos de energía, cuando las cosechas en edades de rebrote tempranas, este comportamiento puede asociarse por cambios en la composición química y estructura celular de la planta, lo que afecta la calidad nutritiva y reduce el contenido energético del forraje.

Conclusiones

Los tratamientos de fertilización evaluados no afectaron el valor nutritivo del pasto estrella; en cambio de los componentes fibrosos del forraje (α FDN, FDA y lignina) tendieron a incrementar cuando aumento la edad de rebrote y lo opuesto ocurrió con las expresiones de valor energético del forraje (TDN, ED, EM y ENL), lo cual sugiere la importancia de no posponer demasiado el uso del forraje para conseguir forrajes de calidad.

Estos resultados contribuyen a una comprensión más profunda de cómo factores de manejo y temporales pueden influir en la calidad nutricional del forraje, y ofrecen información valiosa para la toma de decisiones en la producción ganadera del país.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, a la Estación Científica de Ganado Lechero y a la Escuela de zootecnia de la Universidad de Costa Rica por la colaboración brindada durante el estudio. Al Servicio Alemán e Intercambio académico (DAAD) por su valioso aporte para la realización de este estudio mediante la beca otorgada. A los miembros del comité asesor de tesis Dr. Jorge Elizondo y Dr. Danilo Pezo, por sus valiosos aportes durante este estudio.

Bibliografía

Apollon, W., Jean-Baptiste, Y., Wagner, B.J., Luna-Maldonado, A.I., y Silos-Espino, H. (2022). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en la producción y calidad de *Brachiaria brizantha*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(1), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2637>

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1990. Official methods of analysis. 15th ed. AOAC Int., Arlington, VA, USA.

Borges, J.A., Barrios, M., y Escalona, O. (2012). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre variables agroproductivas y composición química del pasto estrella. *Zootecnia Tropical*, 30 (1): 1725.

Carranza, A. (2016). Calidad nutricional de tres forrajes tropicales cosechados a diferentes edades de corte en Zamorano. (Tesis de Licenciatura), Escuela Agrícola Panamericana, Francisco Morazán, Honduras.

Cecato, U., Santos, G.T. dos, Machado, M.D.A., Gomes, L.H., Damaceno, J.C., Jobim, C. C., Ribas, N.P., Mira, R.T., y Cano, C.C.P. (2008). Avaliação de cultivares do gênero *Cynodon* com e sem nitrogênio. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 23(0), 781. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v23i0.2581>

Correa, H., Jaimes, L., Avellaneda, J., Pabon, M., and Carulla, J. (2016). Effect of age of regrowth age Kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) on production, milk quality and balance of nitrogen in Holstein cows. *Livestock Research for Rural Development* 28 (3):2016.

Elizondo-Salazar, J.A., y Espinoza-Fonseca, H. (2021). Evaluación de los purines como una alternativa de fertilización orgánica en pasto estrella africana. *Nutrición animal tropical*, 15(2), 25–41. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48001>

FAO. (2021). La ganadería y sus desafíos en América Latina y el Caribe. *Agronews Castilla y León*. <https://www.agronewscastillayleon.com/fao-la-ganaderia-y-sus-desafios-en-america-latina-y-el-caribe>

Ferrufino-Suárez, A.J., Mora-Valverde, D., y Villalobos-Villalobos, L.A. (2022). Biomasa y bromatología del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) con cinco períodos de rebrote. *rebrote. Agronomía Mesoamericana*, 33 (2): 477746. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47746>.

Gacheta, J. C. (2019). Efecto de cuatro niveles de fertilización orgánica y química sobre la producción y calidad de pastos en Guatavita Cundinamarca. (Tesis de maestría), Universidad Nacional de Colombia, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76844>

Garay, A.H., Sollenberger, L.E., McDonald, D. C., Ruegsegger, G.J., Kalmbacher, R.S., and Mislevy, P. (2004). Nitrogen fertilization and stocking rate affect stargrass pasture and cattle performance. *Crop Science*, 44(4), 1348–1354. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.1348>

Holland, C. M., Marchant, K., Kriese-Anderson, L., Gamble, B., and Muntifering, R. (2018). Stockpiled “Tifton 85” bermudagrass for cow-calf production as influenced by nitrogen fertilization. *Journal of Animal Science*, 96(7), 2907–2922. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky190>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2022. Condiciones actuales del tiempo. Estación Automática de Alfredo Volio en Cartago. <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionAlfredoVolio.html>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2022). Encuesta Nacional Agropecuaria: resultados generales de la actividad. Recuperado de <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/encuestas/encuesta-nacional-agropecuaria>

Johnson, C. R., Reiling, B. A., Mislevy, P., and Hall, M. B. (2001). Effects of nitrogen fertilization and harvest date on yield, digestibility, fiber, and protein fractions of tropical grasses. *Journal of Animal Science*, 79(9), 2439. DOI: <https://doi.org/10.2527/2001.7992439x>

Loreno, E. T., Eduardo, E. M., Deise, D. C., Patricia, B. C., and Paulo, S. R. de O. (2017). Evaluation of Tifton 85 during hay production using different nitrogen fertilization rates and dehydration methods. *African Journal of Agricultural Research*, 12(40), 2995–3004. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12383>

Manica, M., y Gai, V. F. (2018). Doses de NPK e ureia na produtividade e composição bromatológica da grama estrela africana. *Revista Cultivando o saber*, 146-154.

Méndez, R., Fernández, J. A., y Yáñez, E. A. (2019). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y composición de *Cynodon plectostachyus*. *Revista veterinaria*, 30(1), 48–53. DOI: <https://doi.org/10.30972/vet.3013899>

Morocho, G.A., Toalombo, P. A., Guevara, H.P., y Jiménez, S.F. (2023). Evaluación del potencial forrajero y composición nutricional del pasto híbrido Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum Schumach x Pennisetum glaucum L.*) a tres edades de corte. *Archivos de zootecnia*, 72(278), 127–142. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9036606>

Moya, E., Ariza-Suárez, D., Baena-Aristizabal, C.D., Cortés-Gómez, S., Becerra-Mutis, L., y Riaño-Hernández, C.A. (2016). Efecto de la fertilización en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la avena (*Avena sativa*). *Pastos y Forrajes*, 39(2): 102–110.

Moreno, A., Brito, J., Reyes, J., y Contreras, V. (2017). Calidad nutricional del maíz forrajero según la fertilización orgánica e inorgánica. *Scientia Agropecuaria* , 8, 127-135. DOI: <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2017.02.05>

Munguía, R., y Pantaleón, J. (2016). Evaluación de calidad de ensilajes de pasto Estrella (*Cynodon nlemfluentis*) y pasto Guinea (*Panicum maximum*) con adición de harina de maíz, melaza y Biostabil® como inóculo. (Tesis de licenciatura). Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/items/f88bde60-2327-41d3-8474-c1868401f419>

Navarro-Ortiz, C., y Roa-Vega, M. (2018). Comparación de la digestibilidad de tres especies forrajeras estimada mediante diferentes técnicas. *Orinoquia*, 22, 15–33. DOI: <https://doi.org/10.22579/20112629.476>

Núñez-Arroyo, J.M., Jiménez-Castro, J. P., Tobía-Rivero, C.M., Arias-Gamboa, L.M., Jiménez-Alfaro, E., y Padilla-Fallas, J. E. (2022). Efecto de la edad de rebrote y época del año sobre los componentes de la pared celular y la digestibilidad in vitro de gramíneas (II PARTE). *Nutrición Animal Tropical*, 16(2), Article 2. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i2.52729>

Oliveira, E. R. de, Monção, F. P., Gabriel, A. M. de A., Góes, R. H. de T. e B. de, Lempp, B., and Moura, L. V. (2014). Ruminant degradability of neutral detergent fiber of *Cynodon*

spp. Grasses at four regrowth ages. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 36, 201–208. DOI:

<https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v36i2.22469>

Pezo, D., y García, F.J. (2018). *Uso Eficiente de Fertilizantes en Pasturas*. 56. Editorial CATIE, Serie técnica, Boletín técnico, Turrialba, Costa Rica. 56 págs. ISBN 978-9977- 57-57-696-1.

Pinto, F., Moraes, M., Sampaio, J., Almeida, M., Rocha, B., Mesquita, V., Barbosa, D., Albuquerque, C., Brant, C., and Alencar, J. (2019). Yield and nutritional value of BRS Capiçu grass at different regrowth ages produtividade e valor nutricional do Capim-Elefante cv. BRS Capiçu em diferentes idades de rebrota. DOI:

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20913.53607>

Ram, S. N., and Trivedi, B. K. (2012). Response of guinea grass (*Panicum maximum* Jacq) to organic and inorganic fertilizers. *The Pharma Innovation Journal*, 12(6): 1698-1701.

Rincón, A., Flórez, H., Ballesteros, H., y León, L. M. (2018). Efectos de la fertilización en la productividad de una pastura de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Tropical Grasslands-Forrajés Tropicales*, 6(3), 158–168.

DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(6\)158-168](https://doi.org/10.17138/tgft(6)158-168)

Rodriguez, M. (2009). Rendimiento y valor nutricional del pasto *Panicum maximum* CV mombaza a diferentes edades y alturas de corte. (Tesis de licenciatura)., Instituto Tecnológico de Costa Rica. San Carlos, Costa Rica. <https://core.ac.uk/reader/60990740> .

Saborio, M., y Gutiérrez, L. (2010). Políticas y acciones para la cadena productiva de ganadería bovina de carne. http://sepsa.go.cr/docs/2010_Politica_SectorAgro_ganaderia.pdf

Sobalvarro-Mena, J.L., Elizondo-Salazar, J.A., y Rojas-Bourillón, A. (2020). La producción de gas in vitro para estimar la energía neta de lactancia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 311–328. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.38497>.

Solano,-Lopez M. J., y Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Fertilización nitrogenada en pastos del género *Cynodon*. *Nutrición Animal Tropical*, 16(1), 82–104. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i1.51542>.

Tilahun, G., Asmare, B., Mekuriaw, Y., Tilahun, G., Asmare, B., and Mekuriaw, Y. (2017). Effects of harvesting age and spacing on plant characteristics, chemical composition and yield of desho grass (*Pennisetum pedicellatum Trin.*) in the highlands of Ethiopia. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 5(2), 77–84. DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(5\)77-84](https://doi.org/10.17138/tgft(5)77-84)

Tropical Forages. (2023). *Cynodon spp* Recuperado de https://www.tropicalforages.info/text/entities/cynodon_spp.htm

Van-Soest, P.J., and J.B. Robertson. 1985. Analysis of forages and fibrous foods: a laboratory manual for animal science. Cornell University, Ithaca, NY, USA.

Van-Soest, P.J., J.B. Robertson, and B.A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74:3583-3597. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2

Villalobos, L. (2012). Fenología, producción y valor nutritivo del pasto alpiste (*Phalaris arundinacea*) en la zona alta lechera de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 36:25-37. DOI: 10.15517/rac.v36i1.9962.

Villalobos, L., y Arce, J. (2014). Evaluación agronómica y nutricional del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis*) En la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. valor nutricional. *Agronomía Costarricense*, 38(1): 133-145. DOI: 10.15517/RAC.V38I1.15162.

Villalobos, L. V., y WingChing-Jones, R. (2020). Los pastos estrella africana, kikuyo y rye grass en Cartago, Costa Rica: Biomasa, composición botánica y nutrientes. *Cuadernos de Investigación UNED*, 12(01), 2811–2811. <https://www.redalyc.org/journal/5156/515663758007/html/>

WingChing-Jones, R., Uribe-Lorío, L., y Castro-Barquero, L. (2016). Uso de *Azospirillum* spp. Como biofertilizante en la producción de estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*).

Cuadernos de Investigación UNED, Volumen 8, Número 2. 2016. DOI:

<https://doi.org/10.22458/urj.v8i2.1570>

7. CAPÍTULO 3. EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN PASTO ESTRELLA AFRICANA TRATADO CON FERTILIZACIÓN ORGÁNICA O INORGÁNICA

Resumen

El sector ganadero desempeña un papel significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero como son el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), ambos con un potencial de calentamiento mayor que el dióxido de carbono (CO₂). El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre las emisiones de gases de efecto invernadero en pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.). El experimento se realizó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata ubicada en El Alto de Ochoмого, provincia de Cartago, Costa Rica, durante los meses de mayo a noviembre de 2019 y 2021. Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) y fue analizado mediante un modelo lineal generalizado, además se utilizó el simulador LIFE-SIM para estimación de metano entérico y nitrógeno excretado en las heces de bovinos. La producción de gas *in vitro* no mostró diferencias entre los tratamientos de fertilización ($p > 0,05$), el modelo de regresión lineal mostró efectos lineales positivos para α FDN, MS y Tratamiento; y negativos para DIVMS y días de rebrote. No hubo diferencias estadísticas en los flujos de CH₄ y CO₂ entre tratamientos ($p > 0,05$), sin embargo, los flujos acumulados de urea con azufre y excretas bovinas fueron diferentes al *Azospirillum*, siendo este último el tratamiento que produjo mayor metano entérico en las simulaciones con LIFE-SIM. Aunque no hubo efectos concluyentes de menor emisión de gases de efecto invernadero en algún tratamiento, los datos contribuyen a la métrica para disminuir las emisiones en fincas pecuarias con una especie forrajera ampliamente utilizada en el trópico.

Palabras clave: Fertilización, Producción, Gases de efecto invernadero, Emisiones

Abstract

The livestock sector plays a significant role in the greenhouse gas emissions such as methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), having both greater warming potential than carbon dioxide (CO₂). The objective of this study was to evaluate the effect of organic and inorganic fertilization on greenhouse gas emissions in African Stargrass (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.). The experiment was conducted at the Alfredo Volio Mata Experimental Station located in El Alto de Ochomogo in the province of Cartago, Costa Rica, during the months of May to November of 2019 and 2021. A randomized complete block design (RCBD) was used and analyzed using a generalized linear model, and the simulator LIFE-SIM was used to estimate enteric methane and nitrogen excreted in bovine feces. *In vitro* gas production showed no differences among the fertilization treatments ($p > 0.05$), the linear regression model showed positive linear effects α NDF, DM, and Treatment; and negative effects for IVDMD and days of regrowth. There were no significant differences in CH₄ and CO₂ fluxes among treatments ($p > 0.05$), but the accumulated fluxes of urea protected with sulfur and slurry were different in relation to *Azospirillum*, having the latter greater enteric methane emissions in the simulations with LIFE-SIM. Although our results were not conclusive to identify the treatment with lower emissions, our data provide estimators aimed to reducing emissions on livestock operations with a forage species widely used in the tropics.

Keywords: Fertilization, Production, Greenhouse gases, Emissions

Introducción

La ganadería es un sector fundamental para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de millones de personas en el mundo, su impacto se estima en casi un 40% en el valor de la producción agrícola global (FAO, 2021). En América Latina y el Caribe este sector aporta cerca del 46 % en relación al producto interno bruto agropecuario, con una tasa anual de crecimiento del 3,7%, superior a la tasa promedio mundial (FAO, 2023).

Según el INEC (2022), en Costa Rica la actividad ganadera cuenta con un hato aproximado de 1 509 011 bovinos, de los cuales el 61,7% son ganado de carne, el 15,8% de leche y el 22,4% de doble propósito, estos datos indican un crecimiento de la producción y la expansión del sector en el país, lo que conlleva un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que incluyen el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄)

El sector ganadero en el mundo aporta aproximadamente 4,6 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq), del cual aproximadamente el 44% de las emisiones son en forma de CH₄, 29% N₂O y 27% CO₂ (Gerber et al., 2013). En Costa Rica la actividad ganadera contribuye con 2445,35 Gg de CO₂-eq (22,5%) de las emisiones totales (FAO, 2021; Villanueva-Najarro, 2022).

Parte de las emisiones del sector pecuario, provienen por el uso de fertilizantes en especial de compuestos nitrogenados, los cuales son aplicados para mejorar los rendimientos de las pasturas. Estos compuestos tienen el potencial de aumentar emisiones, en especial el N₂O,

que es un gas con alto potencial de calentamiento global, lo cual contribuye a incrementar las emisiones del sector (Núñez et al., 2021). Para mitigar esta problemática se han evaluado alternativas orientadas a optimizar los procesos de fertilización, mejorando la absorción del nitrógeno, y de esa manera ayuda en disminuir las emisiones (Raposo et al., 2020).

Debido a la importancia del sector y su aporte en las emisiones globales de GEI, se realizó esta investigación para identificar la respuesta de pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) a la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos y su impacto sobre las emisiones en sistemas ganaderos, e identificar los puntos sensibles sobre los cuales deben actuar los diferentes actores del sector ganadero para disminuir su impacto.

Material y métodos

Conducción del experimento

El estudio se realizó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en el Alto de Ochomogo en la provincia de Cartago (9°55'10" N, 83°57'20" O), a una altitud de 1542 m.s.n.m., precipitación media anual de 2050 mm (distribuida de mayo a octubre), temperatura media anual de 19,1°C (máxima 23,6 °C y mínima 14,5 °C) y humedad relativa media de 84% (IMN,2022).

El experimento se llevó a cabo en 2019 y 2021 en un área de 1619 m², las cual era parte de potreros previamente establecidos por la finca con pasto estrella africana, donde se aplicaba pastoreo bajo un sistema de rotación cada 25 a 30 días. En el año 2020 se suspendió el experimento por la pandemia del Covid-19 y, durante ese periodo, el área de experimento se pastoreó con novillas y vacas secas. En el año 2021 se retomó el estudio en la misma área asignada en 2019, y en ambos años se realizó una cosecha de uniformización (a 5 cm sobre el nivel del suelo) al inicio de la época lluviosa (mayo), usando una motosegadora autopropulsada, con el objetivo de brindar 40 días de recuperación al pasto previo al primer muestreo.

El manejo agronómico fue el mismo para todas las parcelas con una misma dosis equivalente de nitrógeno. Se presentó baja presencia de malezas de hoja ancha, las que fueron eliminadas de forma manual y no hubo presencia de plagas o enfermedades evidentes durante el período de estudio. Los tratamientos se asignaron aleatoriamente un total de 24 parcelas en cuatro

bloques de 6 parcelas cada uno, con un área de 6 m² por parcela (2×3 m) y separadas por pasillos de 2 m de ancho. En 2021, las parcelas se establecieron nuevamente respetando el mismo diseño usado en el año 2019, se mantuvo la misma asignación de tratamientos, tal como está descrito en el primer capítulo de la tesis (Cuadro 1. 1).

Los tratamientos evaluados fueron: C= sin fertilización (testigo absoluto), U= urea (46% N), AN= nitrato de amonio (33,5% N), US= urea protegida con azufre (40% N + 6% S), SL= fertilización orgánica con base en excretas bovinas (0,01 g.L⁻¹ de N) y AZ= *Azospirillum oryzae PCJI* (dosis de 16 L por parcela, para una concentración mínima de 10⁸ UFC ml⁻¹). Con excepción de los tratamientos C y AZ, se aplicó una dosis equivalente anual de nitrógeno de 200 kg ha⁻¹ para todos los tratamientos, con cuatro repeticiones por tratamiento. Los tratamientos AZ y SL se aplicaron con regadera y cubetas, respectivamente, aplicando capas uniformes en el área de cada parcela.

Además, se evaluó el efecto sobre los componentes nutritivos de la pastura basado en tres edades de rebrote (35, 45 y 55 días), las cuales correspondieron con edades fenológicas de la planta entre 6 a 7 hojas verdes medido en el último rebrote lateral del pasto. El experimento se realizó durante la época lluviosa (mayo a octubre) durante los años 2019 y 2021. Las fechas y edades de rebrote en que se realizaron las evaluaciones se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3. 1. Fechas y días de rebrote a la cosecha del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) en Cartago (Costa Rica)

Fecha aplicación		Fecha de cosecha		Rebrote (días)	Edad fenológica (hojas rebrote ⁻¹)	Grados (°C) días acumulados ^a
2019	2021	2019	2021			
07-06	31-05	01-08	27-07	55	7,1	1005
03-08	03-08	17-09	17-09	45	6,4	833
01-10	21-09	05-11	26-10	35	6,8	640

^aElaboración con base en datos del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.

Medición de los flujos de CO₂ y CH₄.

Los flujos de CO₂ y CH₄ se estimaron solo en el año 2021 utilizando cámaras portátiles de medición de gases LI-8100 ® y LI-7810 ®¹, respectivamente. Estos equipos cuentan con una cámara que se acopla a un anillo de 20 cm de diámetro, introducidos a 5 cm en el suelo para encapsular un área determinada (Figura 3.1) y medir los flujos de gases que se emiten o se absorben en esa área (Figura 3. 2.). En el experimento estos anillos fueron de PVC (cloruro de polivinilo), y se colocaron en todas las parcelas experimentales, en las cuatro repeticiones, para contar con un total de 24 puntos de muestreo.

¹ LI-COR Biosciences, Lincoln, NE 68504, USA.

Las mediciones de los flujos de CH_4 y CO_2 se realizaron en horas de la mañana, comenzando con un bloque de parcelas de manera aleatoria. Durante el primer ciclo de medición se estimó el flujo de CO_2 y el de CH_4 de forma más frecuente (tres ocasiones por semana), con el fin de conocer el patrón de emisiones. Posterior a ello el tiempo entre cada estimación se extendió y una vez estimadas las emisiones acumuladas de N_2O y CH_4 , ambas se expresaron en términos de CO_2 equivalente tomando en cuenta sus potenciales de calentamiento global respectivos (GWP: 25 para CH_4 y GWP: 298 para N_2O) (IPCC, 2007). La emisión equivalente se relacionó con la biomasa forrajera (expresada en kilogramos de materia seca por hectárea) de cada tratamiento, para obtener un estimador de la emisión total expresada por kilogramo de materia seca producida de alimento.



Figura 3. 1. Anillo empleado para el acople de las cámaras de los equipos LI-8100 ® y LI-7810 ®.



Figura 3. 2. Cámara cerrada sobre anillo en parcela experimental.

Producción de biomasa, valor nutricional y producción de gas *in vitro*

Las parcelas fueron cosechadas usando una motosegadora autopropulsada con una altura de corte de 5 cm y el material cosechado se colocó en lonas plásticas previamente taradas. Las lonas con el pasto fueron pesadas en campo utilizando una pesa romana electrónica colgante con capacidad de 160 kg ($0,05 \pm$ kg), colocada en un sistema de trípode metálico. Luego de pesado el forraje fresco de cada parcela, se tomó una muestra representativa de 1,5 kg. Estas muestras se llevaron al Laboratorio de Anatomía de la Escuela de Zootecnia en el Campus de la Universidad de Costa Rica en San Pedro de Montes de Oca, donde se secaron en un horno a 60°C por 48 horas, para estimar el porcentaje de materia seca (MS). Los datos se extrapolaron para estimar la producción de biomasa fresca y seca por hectárea, los cuales se utilizaron para el cálculo de emisiones equivalentes por kg de MS. La información completa sobre biomasa y variables morfológicas del pasto estrella africana en este estudio se reportan el Capítulo 1 de esta investigación.

Las muestras fueron procesadas en el Centro Investigación Nutrición Animal (CINA), de la Universidad de Costa Rica, y en ellas se estimaron los componentes nutricionales mediante Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS por sus siglas en inglés), utilizando la ecuación de calibración específica para el pasto Estrella Africana desarrollada por el CINA, la que sigue el método de referencia ISO 12099, la cual regula la aplicación de la espectrometría de infrarrojos cercanos (NIR) para alimentos para animales, cereales y productos de cereales molidos.

Los parámetros nutricionales obtenidos fueron: los contenidos de materia seca (MS, %), proteína cruda (PC, %), fibra detergente neutra tratada con amilasa (α FDN, %) y fibra detergente ácida (FDA, %); la digestibilidad *in-vitro* de la materia seca (DIVMS, %), y de la fibra detergente neutra (DIVFDN, %); y el valor de energía neta de lactancia (EN_L , Mcal Kg⁻¹ de MS).

El ajuste de la ecuación del NIRS se corroboró por medio de química húmeda, mediante análisis de una muestra por cada ocho analizadas siguiendo los procedimientos establecidos para MS y PC de AOAC (1990), fibra detergente neutra (α FDN) por Van Soest *et al.* (1991), digestibilidad *in-vitro* de la materia seca (DIVMS) y la digestibilidad *in-vitro* de la fibra detergente neutra (DIVFDN) según Van Soest y Robertson (1985). Los resultados de dichos parámetros se encuentran en el Capítulo 2 de este documento.

La producción de gas *in vitro* se estimó por medio del sistema ANKOM Gas Production System² de la empresa ANKOM Technology, la cual simula los procesos de fermentación ruminal y estima la producción de gases totales acumulados. Se utilizó inóculos ruminales provenientes de vacas fistuladas de la Estación Experimental Alfredo Volio Mata de la Universidad de Costa Rica, consumiendo una dieta con relaciones entre 60:40 y 70:30 de forraje y concentrado. En el laboratorio de dicha estación, los inóculos se filtraron a través de un paño de algodón, se gasearon con CO₂ y conservaron en baño maría durante el proceso de inoculación. La solución buffer (saliva artificial) se preparó de acuerdo a las recomendaciones de McDougall, (1948), el cual usó una relación buffer/inóculo ruminal de 9/1 (45/5 ml/ml). Los frascos con la saliva artificial permanecieron en estufa de ventilación forzada a 39 °C por 6 h, antes de la inoculación con fluido ruminal.

La presión generada por los gases producto de la fermentación, medida en libras por pulgada cuadrada (PSI), se cuantificó con un transductor digital a las 24 y 48 h de incubación. Para transformar los datos de presión (PSI) (X) en volumen de gas (ml) (Y), se usó la ecuación $Y = -0,1375 + (5,1385 X + 0,0777 X^2)$ para expresar la producción de gas por gramo de materia seca degradada (MSd) (Posada et al., 2006).

² LI-COR Biosciences, Lincoln, NE 68504, USA.

Estimaciones de N₂O usando ecuaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)

Las emisiones de óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) se estimaron utilizando factores de emisión del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007). Los datos del tipo de fertilización, se multiplicaron por los factores de emisión correspondientes para obtener las emisiones de GEI. Una vez estimadas estas emisiones se calculó la emisión de kg CO₂ eq, basados en factor de equivalencia de calentamiento global (GWP=298), para los próximos 100 años.

$$\text{Nitrógeno aplicado (kg ha}^{-1}\text{) x Factor de emisión x 44/28 = Emisiones}$$

En el caso de los purines, se determinó la concentración de N que estos aportan por medio de análisis químicos en el Laboratorio de Suelos y Foliare, los que siguen las norma de INTE-ISO/IEC 17025:2017, del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, donde se determinó el porcentaje en masa de N aportado. El laboratorio reportó la densidad de la muestra, esta se multiplicó por el porcentaje de N determinado y se calcularon los kilogramos de nitrógeno por litro de purín.

Estimación de la tasa de emisión CO₂eq (kg CO₂eq kg MS⁻¹)

La tasa de emisión se estimó una vez fueron calculadas las emisiones en carbono equivalente de CH₄, NO₂ y CO₂, para cada tratamiento de fertilización evaluado, estos resultados fueron totalizados y se dividieron entre la producción individual de materia seca de cada tratamiento,

la que fue estimada en el capítulo uno de esta investigación. El resultado se estimó como la tasa de emisión de carbono equivalente por kilogramo de materia seca.

Estimación de la emisión de CH₄ entérico y excreción de nitrógeno usando el programa LIFE-SIM

Se utilizó el módulo de Ganado Bovino Lechero del programa Livestock Feeding Strategies Simulation Models (LIFE-SIM), el cual es un modelo de simulación desarrollado por la División de Sistemas de Producción y el Ambiente del Centro Internacional de la Papa (CIP). Este permite evaluar el efecto de diferentes estrategias de alimentación del ganado sobre la producción de leche, la ganancia de peso, las emisiones de metano entérico, la cantidad de estiércol producido y de nitrógeno excretado expresado en kilogramos por animal evaluado, así como los resultados económicos de las diferentes intervenciones nutricionales evaluadas (León-Velarde *et al.*, 2006).

Para este experimento se realizaron 40 simulaciones por cada tratamiento evaluado, para un total de 240 simulaciones, las cuales se estructuraron con información de producción de forraje y las características bromatológicas de la biomasa producida por cada uno de los tratamientos de fertilización evaluados y las características nutricionales estimadas en el segundo capítulo de esta tesis. Se tomó como referencia el tipo racial y las características productivas de las vacas lactantes de raza Jersey (curva de lactancia obtenida de vacas de este mismo tipo racial de la finca de Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE) y las dietas usadas en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata de

la Universidad de Costa Rica, basados en los registros productivos durante el momento de ejecución del estudio (Cuadro 3.2).

Cuadro 3. 2. Datos del tipo racial y parámetros productivos utilizados en el LIFE-SIM

Parámetro	Medida
Edad	4 años
Número de lactancias	2
Peso pre-parto	380 kg
Duración de lactancias	10 meses
Intervalo entre partos	420 días
Potencial de consumo de materia seca	3%
Variación del potencial de consumo de MS	10%
Duración de la lactancia	10 meses
Parámetros de curva de lactancia	
Producción por lactancia	6384 kg
Días a pico de lactancia	43 días
Producción al pico de lactancia	27 kg

Las simulaciones se estimaron para 10 meses de lactancia, iniciando en mayo. y eso orientó qué información climática de la Estación Experimental de Ganado Lechero Alfredo Volio Mata utilizar para correr las simulaciones. La información climatológica fue suministrada por el Instituto Meteorológico de Costa Rica (IMN, 2022), mientras que la información sobre la suplementación fue la dieta que se utilizaba en la Estación (Cuadro 3.3) durante los meses de simulación y, esta fue ingresada al programa LIFE-SIM, para el caso del suplemento

denominado Citromiel, el cual es una mezcla de Citropulpa que es un subproducto de la agroindustria de la naranja y Melaza de caña de azúcar.

Cuadro 3. 3. Datos de la dieta complementaria usada en LIFE-SIM

Datos de los suplementos	Concentrado	Citromiel	Cascarilla_soya
Cantidad	4	0.5	0,5
Materia Seca (%)	87	80,1	82,8
Digestibilidad (%)	85	64,77	84
Proteína (%)	16,6	4,15	12,1
Energía Metabolizable (Mcal Kg ⁻¹ de MS)	3	2,75	2,98

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados (BCA) con 6 tratamientos (C, U, AN, US, SL, AZ), con cuatro repeticiones por tratamiento, para un total de 24 parcelas. La información de la producción de gas *in vitro* se analizó mediante un modelo lineal generalizado y se realizó una prueba Tukey para la comparación de medias ($p \leq 0,05$). En dicho modelo se analizó el efecto del tratamiento, la fecha de muestreo y la interacción de ambos. Para controlar el efecto de cosechas previas y la variabilidad del terreno, se anidó el factor parcela para obtener la información. El análisis de los datos se realizó por medio del software RStudio® versión 1.4.1103 para Windows.

Además, se evaluaron distintos modelos, mediante el Criterio de Información de Akaike (AIC) (Cavanaugh y Nead, 2019) el cual es un método estadístico que se utiliza para

comparar la calidad relativa de diferentes modelos estadísticos, permitiendo seleccionar el modelo más robusto, para explicar la emisión de gas *in vitro* basado en variables nutricionales de cada uno de los tratamientos evaluados.

Resultados

Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O con diferentes fertilizantes en pasto Estrella Africana

Las emisiones de CO₂ tendieron a mostrar algunas variaciones debidas a los tratamientos, aunque no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$). El tratamiento basado en *Azospirillum* mostró las emisiones numéricamente más bajas, mientras que los tratamientos de urea protegida con azufre y de purines presentaron las emisiones más altas de CO₂ (Cuadro 3.4).

Tampoco se observaron diferencias entre los tratamientos ($p>0,05$) en cuanto a las emisiones de CH₄; sin embargo, los tratamientos de urea protegida con azufre y de purines tendieron a mostrar los valores más bajos, mientras que los tratamientos con nitrato de amonio y urea presentaron los más altos (Cuadro 3.4). La mayor emisión de N₂O correspondió al tratamiento con nitrato de amonio, en tanto la menor emisión, exceptuando el control y *Azospirillum* (factores de emisión = 0), fue detectada en el tratamiento de purines (Cuadro 3.4).

Cuadro 3. 4. Biomasa forrajera (kg MS ha⁻¹) promedio por cosecha y emisiones de CO₂, CH₄, N₂O según fuente de fertilización en pasto Estrella Africana.

Tratamiento	Biomasa (Kg de MS ha ⁻¹)	Emisión CO ₂ (kg ha ⁻¹)	Emisión CH ₄ (kg ha ⁻¹)	Emisión N ₂ O (kg ha ⁻¹)
C	2173	836816 ^a	2787 ^a	0,00
U	3005	847974 ^a	3013 ^b	3,14
US	3649	875115 ^a	1377 ^c	2,19
AN	3152	845291 ^a	3300 ^b	6,60
SL	2037	878032 ^a	1921 ^c	1,88
AZ	2258	810230 ^a	2717 ^a	0,00

^{abc} Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

En relación con la tasa de emisión de CO₂eq por kilogramo de materia seca, (Figura 3. 3) los mayores valores se obtuvieron en el tratamiento control, seguido por los purines y el *Azospirillum*, con valores similares entre ellos. En contraste, los tratamientos de urea y nitrato de amonio tuvieron tasas de emisión menores y similares entre ellos, y la aplicación de urea protegida con azufre mostró los valores más bajos.

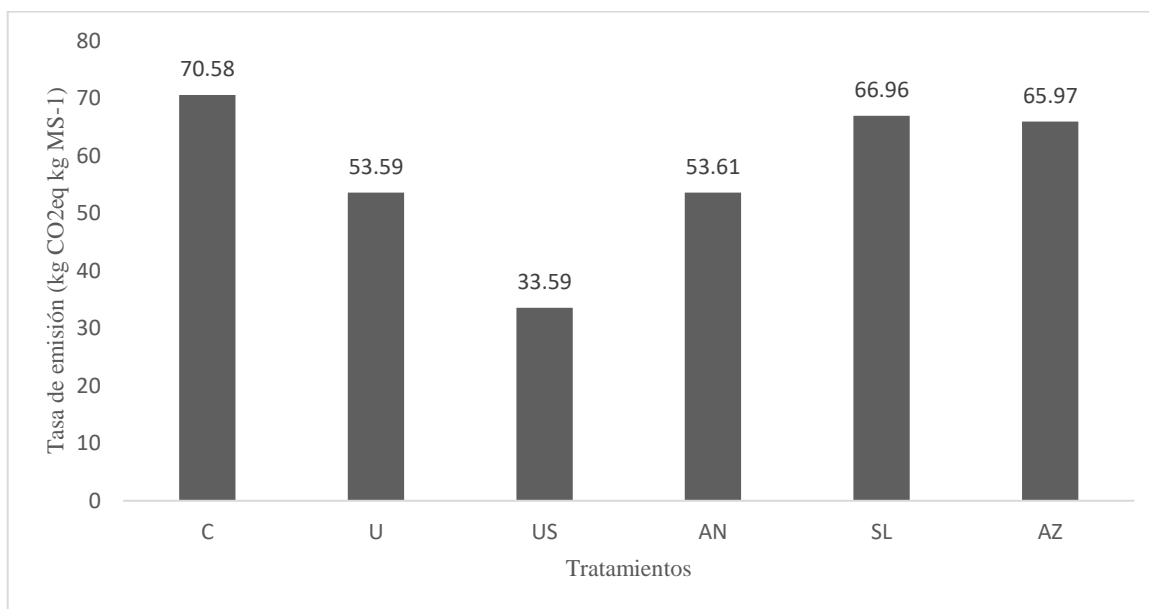


Figura 3. 4. Tasa de emisión (kg CO₂eq kg MS⁻¹) con cinco fertilizantes en Cartago (Costa Rica).

Producción de gas *in vitro*

La producción de gas *in vitro* mostró diferencias ($p < 0,05$) entre los tratamientos de nitrato de amonio (AN) y purines (SL) (Figura 3.4), mientras el resto de los tratamientos no presentaron diferencias entre sí ($p > 0,05$).

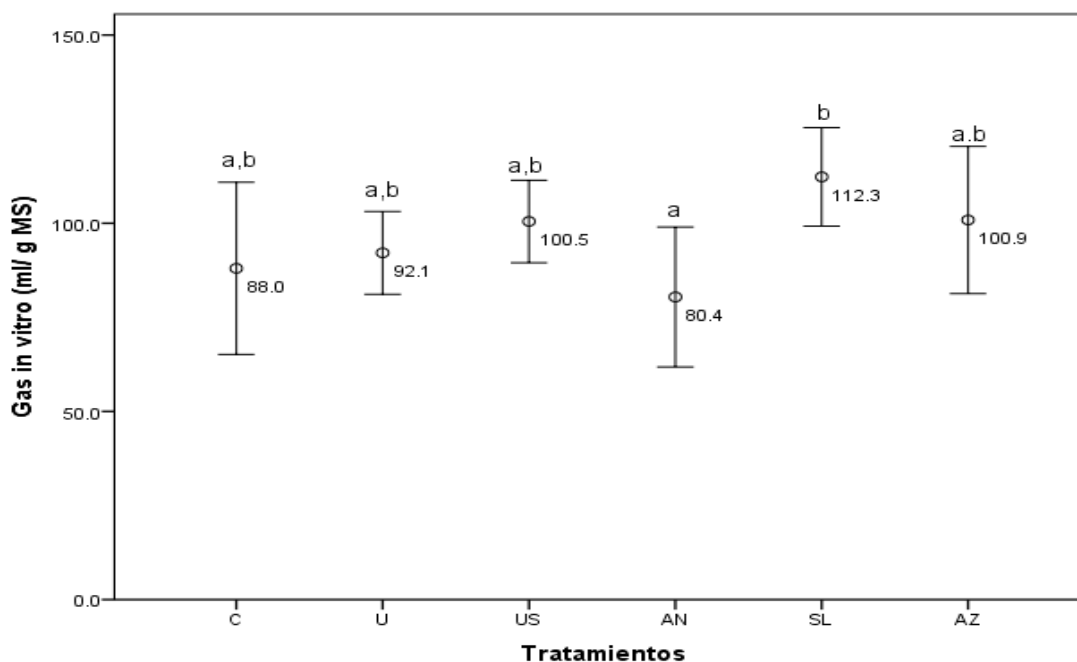


Figura 3. 5. Producción de gas *in vitro* (ml/g MS) del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) con cinco en Cartago (Costa Rica). ^{abc} Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

Al incluir la variable días de rebrote dentro del análisis de varianza no hubo evidencia de diferencias significativas ($p > 0,05$) en la producción de gas *in vitro* debidas a esta variable (Figura 3.5).

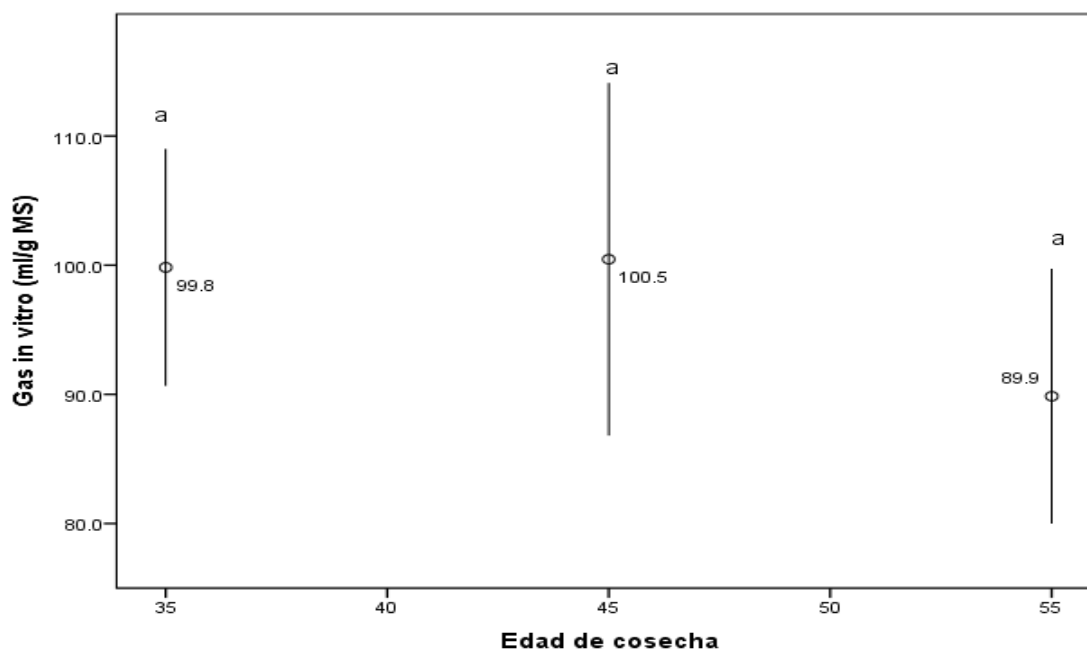


Figura 3. 6. Producción de gas *in vitro* (ml/g MS) del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.) cosechado a 35, 45 y 55 días de rebrote. ^{abc}Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey; $\alpha = 0,05$).

Análisis de regresión lineal múltiple

Se realizó una regresión lineal múltiple utilizando el criterio de información de Akaike (AIC), incorporando variables nutricionales (MS, PC, EE, Cen, DIVMS, α FDN FDA, LDA, DIVFDN, CNF, TDN, ED, EM, EN_L) y de manejo (fecha de cosecha, días de rebrote, biomasa forrajera, fertilizante y año), para identificar el modelo con mejor ajuste. Se logró determinar que α FDN, MS, DIVMS, fertilizante y días de rebrote fueron las variables que más información aportaron para explicar la producción de gas *in vitro*. Sin embargo, el R² ajustado del modelo regresión lineal para predecir la producción de gas *in vitro* con las variables nutricionales mencionadas fue de apenas 0,47.

Las correlaciones entre las variables nutricionales y la producción de gas *in vitro* fueron positivas para MS (0,48), seguida de la α FDN (0,18) y el fertilizante (0,048), mientras que con la DIVMS (-0,020) y la edad (-0,30) se obtuvieron valores negativos. Se evidenció una mayor producción de gas *in vitro* conforme aumentaron las concentraciones de MS y α FDN en el pasto y un efecto inverso conforme aumentaron los días de rebrote del pasto Estrella Africana (Figura 3.6).

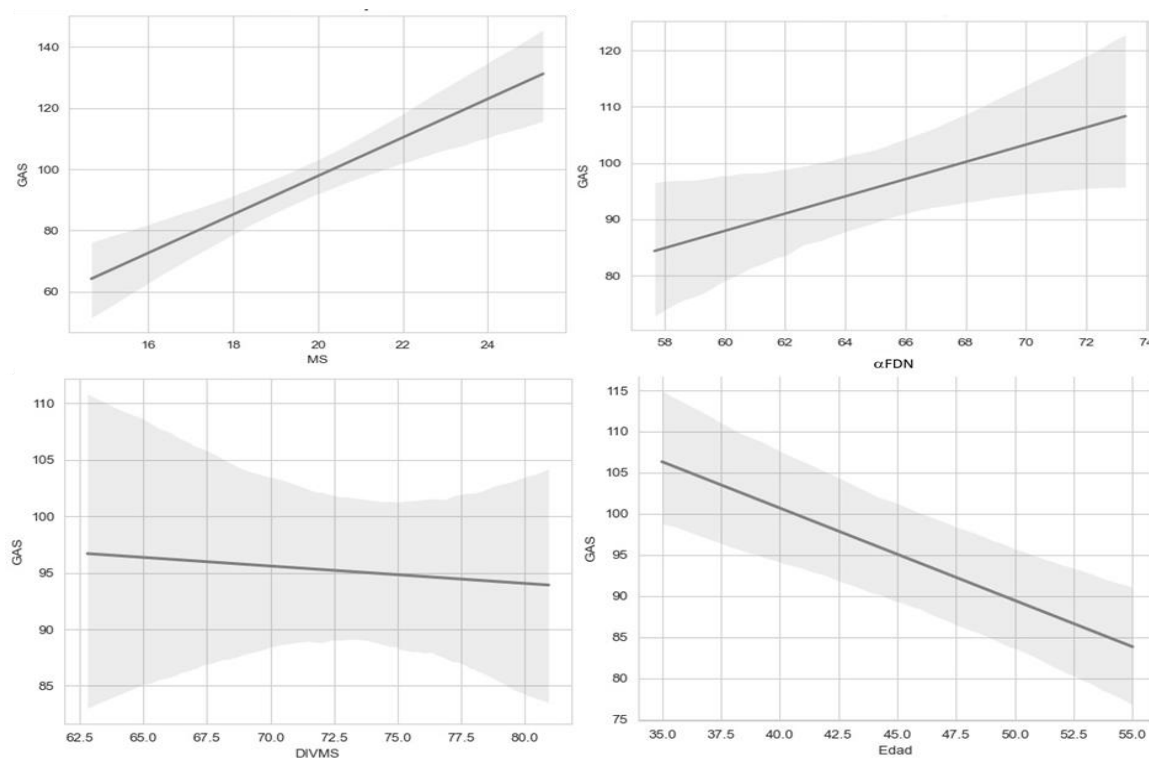


Figura 3. 7. Relación gráfica entre las variables días de rebrote, materia seca (MS), fibra detergente neutra tratada con amilasa (α FDN) y digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) con la producción de gas *in vitro* (ml/g MS) del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst.).

Estimación de emisiones de CH₄ entérico y nitrógeno excretado con LIFE-SIM

Se obtuvo medias de producción de CH₄ y de nitrógeno excretado por animal durante una lactancia ajustada a 305 días (Cuadro 3.5). Hubo diferencias significativas de 1–4 kilogramos de CH₄, observándose que el tratamiento de *Azospirillum* resultó en mayores emisiones de CH₄ y el tratamiento control fue el de menor producción de ese gas.

Cuadro 3. 5. Estimación de la emisión de CH₄ (kg) y el nitrógeno excretado (kg) por animal por lactancia de 305 días, para cada uno de los tratamientos de fertilización en pasto estrella, utilizando el modelo LIFE-SIM.

Tratamientos	CH ₄ (kg)	Nitrógeno excretado (kg)
Control	137,55	43,45
Urea	138,08	43,84
Urea protegida con azufre	138,29	43,80
Nitrato de amonio	138,36	43,86
Purines	139,36	44,18
<i>Azospirillum oryzae</i>	140,31	44,07

En relación con el nitrógeno excretado, se puede observar que los datos de excreción fueron similares para los tratamientos de fertilización evaluados, obteniendo los valores más altos para purines y menores valores para el tratamiento control, pero con diferencias entre los estimados de 1,25 kg entre ambos tratamientos.

Discusión

La emisión de CH₄ en el suelo no presentó diferencias estadísticas entre los tratamientos de fertilización evaluados (Cuadro 3.4) y lo mismo ocurrió en cuanto a los flujos de CO₂. Kitamura *et al.* (2021) obtuvieron resultados similares en la emisión de CO₂ y CH₄, al evaluar tres tipos de fertilizantes orgánicos: estiércol (mezcla de excrementos de vaca, excrementos de caballo), purín y fluido digestivo (excrementos de ganado vacuno, porcino y de pollo), un fertilizante químico y no fertilización. Al-Kaisi *et al.* (2008) indican resultados similares evaluando distintos niveles de aplicación de N sobre las emisiones de CO₂ en maíz y soya; así mismo, (Espinosa *et al.*, 2020) reportan una respuesta similar trabajando con pastos *Urochloa humidicola* CIAT679 y *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania.

Mohanty *et al.* (2006) sugieren que los programas de fertilización deben estar basados en los requerimientos de la pastura y los niveles de extracción, de manera que se aporten nutrientes que favorezcan el crecimiento de las poblaciones bacterianas y promuevan los sumideros de carbono y el desarrollo de bacterias metanotrofas que ayudan a reducir las emisiones, tomando como base las pasturas para lograr ese objetivo.

Las emisiones de N₂O estimadas por factores establecidos por el IPCC mostraron el mismo comportamiento reportado por Navarro (2019) en pasturas de ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) cv. Jumbo fertilizado a dos altitudes, con emisiones de 6,6, 3,5 y 2,2 kg N₂O ha⁻¹ para las aplicaciones de nitrato de amonio, urea y urea protegida con azufre, respectivamente. Smith *et al.* (1998) midiendo los efectos de la temperatura, el contenido de agua y la fertilización nitrogenada sobre las emisiones de N₂O de los suelos con cámaras

cerradas de 40 cm, indican que fertilizando con dosis que variaron de 120 hasta 290 kg N ha⁻¹ con nitrato de amonio obtuvieron menores emisiones de N₂O en suelos usados en pastoreo de 1,0-5,2 kg N₂O kg ha⁻¹ y suelos usados pasto para corte de pastura de 1,9-8,0 kg N₂O kg ha⁻¹.

Araya (2018) determinó la capacidad de captura de CO₂ y emisión de N₂O en pastos Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, ahora *Cenchrus clandestinus*) y Ryegrass (*Lolium multiflorum*), obteniendo emisiones de 26,8, 15,7 y 6,3 N₂O kg ha⁻¹, para purines, nitrato de amonio y urea protegida con azufre, respectivamente. Las discrepancias en las estimaciones de emisiones de N₂O pueden atribuirse a la cantidad de nitrógeno aplicado al suelo, además del uso de factores de emisión y otras técnicas utilizadas, podrían estar influyendo en la variación de las estimaciones.

La tasa de emisión obtenida en esta investigación fue mayor para el tratamiento control y menor para urea protegida con azufre. La contribución de este estudio sobre el particular es relevante porque existe escasa información de ensayos donde se integre el efecto de la fertilización, la producción de biomasa forrajera en materia seca y las emisiones. En algunos estudios se han estimado las emisiones por kilogramo de leche y/o carne producida usando análisis de ciclo de vida, modelos de simulación y factores de IPCC (Galloway et al., 2024; Yan et al., 2013). La información obtenida en esta investigación resulta novedosa y además muestra que mediante prácticas de manejo como la fertilización se puede optimizar la producción de forraje. Un ejemplo de lo anterior fue que el tratamiento control fue el que más CO₂eq emitió, como resultado de la menor producción de materia seca.

La producción de gas *in vitro* en esta investigación mostró valores (Figura 3. 4.) similares a los reportados en México por Sánchez *et al.* (2021) con pasto *Megathyrus maximum cv. Aruana* en donde analizó diferentes tipos de fertilizantes, y encontraron valores de 96,9, 181,7, 142,7 y 98,9 mL g⁻¹ de MS para composta, composta+lixiviado, lombricomposta y fertilizante químico (120-60-00 de NPK), respectivamente. Por su parte García *et al.* (2022), estudiaron esquemas de fertilización (químicas con NPK, lombricompost, compost y compost + lixiviado) en *Megathyrus maximum cv.* Tanzania, y reportaron diferencias para el tratamiento químico en comparación con los tratamientos de fertilización orgánica. Los valores encontrados por dichos autores (138,83–159,00 mL g⁻¹ de MS) fueron similares a los reportados en esta investigación.

En el estudio de Almaraz *et al.* (2019) con pasto Estrella Africana, analizaron la producción de gas *in vitro* reportando 82,60 mL g⁻¹ de MS, valores dentro del rango de los encontrados en esta investigación. En Brasil evaluando la producción de gas *in vitro* a partir de cultivares de Mijo perla (*Pennisetum glaucum*, ahora conocido como *Cenchrus glaucum*) bajo cuatro niveles de nitrógeno (0, 50, 100 y 200 kg.ha⁻¹), reportan que no se evidenció diferencias significativas en la producción de gas *in vitro* (124,0–128,9 mL/g⁻¹ de MS) debidas a los niveles de fertilización utilizados (França *et al.*, 2024). Los valores obtenidos en ese estudio son similares a los reportados en esta investigación con el uso de tratamientos inorgánicos.

Castillo-Contreras (2022), al evaluar la composición química y degradabilidad *in vitro* del pasto Estrella Africana en dos épocas de crecimiento (época seca y lluviosa) obtuvieron

valores de producción de gas (200,24 y 225,96 mL g⁻¹ de MS, respectivamente) mayores a las encontradas en esta investigación. Esas diferencias fueron significativas, lo cual se asoció al efecto de las condiciones adversas sobre el fotoperiodo y los componentes estructurales de la planta, reflejándose finalmente en la degradabilidad del forraje. En general, los resultados de la literatura revisada sugieren que las diferencias en los estimados de producción de gas *in vitro* pueden asociarse a la edad de rebrote, que fue más alto a la utilizada en esta investigación, lo que pudo influir en cambios morfológicos como la reducción de la relación hoja:tallo, la cual tiene impacto en el contenido de nutrientes y en la digestibilidad del forraje. En esta investigación no se lograron establecer diferencias importantes en los componentes nutritivos de la pastura debidas a los tratamientos de fertilización evaluados, lo cual resultó en pocas diferencias en la producción de gas *in vitro*.

En relación con los días de rebrote y la producción de gas *in vitro* (Figura 3.5), no se evidenció diferencias significativas entre las tres edades evaluadas, pero se observó que al aumentar la edad a 55 días hubo una leve tendencia a disminuir la producción de gas. Similar comportamiento reportan García et al. (2022), al analizar el pasto *Megathyrsus maximum cv. Tanzania* en seis etapas de cosecha, donde observaron que las edades de 65, 80 y 95 días mostraron valores de producción de gas de 121,50; 133,25 y 129,75 mL/g de MS, respectivamente, mientras que con edades de 20, 35 y 50 días se obtuvieron valores más altos de producción de gas (143,25; 151,75 y 151,00 mL/g⁻¹ de MS respectivamente). Por otro lado, Nguyen *et al.* (2024) trabajando en el sudeste de Vietnam evaluando la producción de gas *in vitro* de pastos de los géneros *Urochloa spp* (*Mulato II, Ruzi*), *Megathyrsus spp* (Guinea, Amíl, Mombasa, TD58), y *Cenchrus spp* (King grass, Napier, VA06), no

observaron una tendencia clara respecto al efecto de la edad de cosecha sobre la producción de gas. Por su parte Sánchez *et al.* (2021) evaluando diferentes tipos de fertilizantes (composta, composta más lixiviada, lombricomposta y fertilizantes químicos basado en NPK) y edades de cosecha (20, 35, 50 y 65 días) en *Megathyrus maximus cv. Aruana*, observaron una ligera tendencia a disminuir la producción de gas al aumentar los días de cosecha; este comportamiento se ha atribuido al aumento de componentes fibrosos de la pared celular como son la celulosa y la lignina (Valenciaga *et al.*, 2009), lo cual afecta el proceso de digestión y puede ocasionar del forraje requiera más tiempo de fermentación para su descomposición (Han y McCormick, 2014).

Con relación al análisis de regresión, se seleccionó el mejor modelo según el valor de AIC (menor), indicando que las variables α FDN, MS, DIVMS, el tipo de fertilizante y los días de rebrote, proporcionaron explicación moderada sobre el comportamiento de la producción de gas *in vitro*, teniendo correlaciones positivas con MS, α FDN y fertilizante, y negativas con DIVMS y edad de cosecha. En Zimbabwe, Nherera *et al.* (1999), trabajando con cabras alimentadas con forrajes arbóreos (*Leucaena esculenta*, *Leucaena diversifolia*, *Leucaena pallida* y *Calliandra calothyrsus*) encontraron correlaciones positivas entre la producción de gas *in vitro* con las variables nutricionales ($p < 0,001$) MS y α FDN y negativas con DIVMS, la digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica y la ingesta de materia orgánica digestible. Por su parte, Chino *et al.* (2022) investigaron la relación entre la composición química y la producción de metano *in vitro* de pastos altoandinos y encontraron correlaciones negativas para FDA y α FDN, y positivas para proteína y lignina detergente ácida. Ellos explicaron sus resultados indicando que cuando existe mayor contenido de proteína puede mejorarse la

multiplicación microbiana en el rumen y eso contribuye a mejorar el proceso de fermentación y de asimilación de nutrientes, lo cual influye sobre la producción de gas.

En Túnez, analizando la composición química y características de fermentación *in vitro* de especies (herbáceas y arbustivas) de la región central, se encontraron correlaciones positivas entre el contenido de proteína y la digestibilidad de la materia orgánica calculada *in vitro* ($r=0,74$; $p<0,0001$) y también la energía metabolizable ($r=0,76$; $p<0,0001$). Mientras tanto, se encontraron correlaciones negativas entre los contenidos de digestibilidad y α FDN ($r=-0,58$; $p<0,0001$), FDA ($r=-0,65$; $p<0,0001$) y el contenido de lignina ($r=-0,72$; $p<0,0001$) (Moujahed *et al.*, 2012). Por su parte Apráez-Guerrero *et al.* (2016) reportan similares resultados para la producción de metano *in vitro* en dos variedades de pastos ryegrass (*Lolium hybridum* y *Lolium perenne*) en el altiplano de Nariño, donde indican que la producción de dicho gas se correlacionó positivamente ($p<0,05$) con la proteína verdadera (0,814) y negativamente ($p<0,05$) con α FDN (-0,879) y FDA (-0,979). En general, la producción de gas *in vitro* en esta investigación mostró que el manejo y la composición nutritiva de la pastura tienen un efecto sobre el potencial de emisiones, observándose que cuando hay una mayor cantidad de componentes estructurales, se registra una reducción en la cantidad de gas, pero el aumento de estos componentes afecta la digestibilidad y la disponibilidad de otros nutrientes para la alimentación animal.

La estimación de CH_4 entérico por lactancia (kg CH_4 por lactancia) obtenida en esta investigación para ganado de raza Jersey (Cuadro 3.5), fue inferior a los datos reportados por Gonzales (2019) usando también LIFE-SIM, con vacas que pastoreaban potreros de ryegrass,

kikuyo y trébol blanco, y se suplementaban con concentrado (proteína: 12,27%, digestibilidad: 86,18% y energía metabolizable: 2,88 Mcal kg⁻¹). Estas diferencias eran de esperar pues en esta investigación se trabajó con vacas Holstein y Pardo Suizo, de mayor peso vivo (de 521 hasta 691 kg para las Holstein, y de 357 hasta 620 kg para las Pardo Suizo) y mayores niveles de producción de leche e (5432 hasta 9085 kg/lactancia en Holstein y de 4518 hasta 6635 kg para Pardo Suizo), lo cual tiene impacto sobre el potencial de emisiones de CH₄.

En contraste, Messa (2009) utilizando también el modelo LIFE-SIM en Venezuela obtuvo emisiones de CH₄ de 86,95 y 102,64 kg CH₄ vaca⁻¹ año⁻¹, considerando las pasturas disponibles en época seca y lluviosa, respectivamente. Esos valores son menores que los obtenidos en el presente estudio. Por su parte, Villanueva-Najarro (2022) usando la técnica de hexafluoruro de azufre, obtuvo valores de emisión de 91,22; 111,82 y 111,42 kg CH₄ vaca⁻¹ año⁻¹, trabajando con vacas F1 (50% Jersey x 50% Gyr), Triple cruce o (50% Jersey x 31% Holstein x 19% Sahiwal) y Jersey, respectivamente, que pastoreaban potreros de gramíneas y que además recibían concentrado. Los valores obtenidos por Villanueva-Najarro (2022) son ligeramente inferiores a los obtenidos en este trabajo.

El punto por destacar es que las emisiones de CH₄ estimadas SIM en el presente estudio usando el modelo LIFE-SIM, usando supuestos respecto a los atributos de las pasturas y alimentos concentrados, el tipo animal y las condiciones climáticas, no difieren mucho de los valores obtenidos usando una metodología como el hexafluoruro de azufre, la cual es

ampliamente aceptada para su uso bajo condiciones de pastoreo (McGinn et al., 2006; Pinares-Patiño y Clark, 2008), pero requiere de inversión en equipo y personal entrenado.

El nitrógeno excretado en las heces osciló entre 43,45 y 44,18 kg por lactancia fue superior a los valores encontrados por García *et al.* (2021) para novillos de 350 kg de peso vivo que pastoreaban potreros de gramíneas fertilizadas ($36.5 \text{ kg animal}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y algo inferior al obtenido para asociaciones gramínea-leguminosa ($51.1 \text{ kg animal}^{-1} \text{ año}^{-1}$). También fue un 20% inferior al obtenido por Figueroa *et al.* (2009), quienes estimaron que la excreción de nitrógeno en vacas lecheras típicas de la Comarca Lagunera en México era de 52,75 kg por lactancia. En general esas vacas son de raza Holstein, con pesos entre 500 y 650 kg, por lo que es de esperar valores más altos a los estimados en el presente estudio.

Al igual que con el CH_4 , estos valores pudieron variar por efecto del biotipo animal utilizado, el consumo de materia seca, la calidad de dieta, el peso del animal y la producción de leche, entre otros factores. Sin embargo, los valores obtenidos usando el modelo LIFE-SIM tienen sentido respecto a los valores reportados en otros trabajos, por lo que se acepta que ese modelo puede constituirse en una guía para comprender los posibles impactos de diferentes intervenciones sobre la excreción de nitrógeno en pastizales, y por ende la cantidad de este elemento que puede estar siendo depositado en los potreros y corrales de las fincas, y que puede representar una oportunidad de aprovechamiento para mejorar la eficiencia de las explotaciones.

Conclusiones

Los estimados de emisión de CO₂ y CH₄ no fueron afectados por el tipo de tratamiento de fertilización (orgánica e inorgánica), ni la edad de rebrote del pasto.

La simulación usando el programa LIFE-SIM confirmó que los tratamientos de fertilización y edad de rebrote del pasto estrella no afectaban los niveles de emisión de CH₄ y excreción de nitrógeno similares, por lo que es factible usar ese modelo para el análisis de intervenciones de manejo en sistemas de producción de leche similares a los analizados en este trabajo.

Expresiones de gratitud

El autor agradece al Programa de Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, a la Estación Científica de Ganado Lechero y a la Escuela de Zootecnia de la Universidad de Costa Rica por la colaboración brindada durante el estudio.

A la doctora Cristina Chichilla Soto del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, y al ingeniero Cristofer Rojas Jiménez, por sus consejos y valiosos aportes durante las mediciones de flujos de carbono y metano en el suelo.

A los estudiantes de la escuela de Zootecnia y de la maestría en nutrición animal de la Universidad de Costa Rica, por su apoyo en la cosechas y procesamiento de muestras.

Al doctor Roberto Quiroz, por su apoyo, consejos y entrenamiento en la utilización del LIFE-SIM durante la estancia de pasantía de investigación realizada en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), por haberme permitido realizar la pasantía donde se recibió entrenamiento en relación al LIFE-SIM y sobre investigaciones en sus sistemas pecuarios.

A los miembros del comité asesor de tesis Dr. Jorge Elizondo y Dr. Danilo Pezo, por sus valiosos aportes durante este estudio.

Bibliografía

Al-Kaisi, M. M., Kruse, M. L., and Sawyer, J. E. (2008). Effect of nitrogen fertilizer application on growing season soil carbon dioxide emission in a corn–soybean rotation. *Journal of Environmental Quality*, 37(2), 325–332. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0240>.

Almaraz-Buendía, I., García, A. M., Sánchez-Santillán, P., Torres-Salado, N., Herrera-Pérez, J., Bottini-Luzardo, M.B., y Rojas-García, A. R. (2019). Análisis bromatológico y producción de gas in vitro de forrajes utilizados en el trópico seco mexicano. *Archivos de Zootecnia*, 68(262). DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v68i262.4145>.

Apráez-Guerrero, J. E., Delgado-Jurado, D., y Solarte-Portilla, C. (2016). Evaluación In vitro de la producción de metano en variedades de pastos neozelandeses del altiplano de Nariño. *Revista Veterinaria y Zootecnia*, 10(2). DOI: <https://doi.org/10.17151/vetzo.2016.10.2.8>.

Araya, S. E. (2018). Determinación de la capacidad de captura de CO₂ y liberación de emisiones de N₂O de dos variedades de pastos en la zona de Vara Blanca bajo la influencia de tres tipos de fertilización. <https://repo.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/6321>.

Castillo-Contreras, J.A. (2022). Composición química y degradabilidad in vitro de pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) en dos épocas de crecimiento en el sur del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/138011>.

Cavanaugh, J.,E., and Neath, A.A. (2019). The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 11(3): e1460. DOI:10.1002/wics.1460.

Chino, L.B., Molina-Botero, I.C., Moscoso Muñoz, J.E., and Gómez-Bravo, C. (2022). Relationship between chemical composition and in vitro methane production of high Andean grasses. *Animals* 12(18): 2348. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12182348>.

Espinosa Carvajal, M., Contreras Santos, J.L., Torres, J.C., Martínez Atencia, J. D. C., Jaramillo Barrios, C. I., y Hurtado, M. D. P. (2020). Flujos de metano en suelos con coberturas de pastos en el norte de Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 291–309. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.38387>.

FAO. (2021). FAO: La ganadería y sus desafíos en América Latina y el Caribe. *Agronews Castilla y León*. <https://www.agronewscastillayleon.com/fao-la-ganaderia-y-sus-desafios-en-america-latina-y-el-caribe>.

FAO. (2023). Avances y desafíos en la ganadería de América Latina y el Caribe- Medidas de mitigación apropiadas para cada país. <https://www.fao.org/3/cc8210es/cc8210es.pdf>.

Figuroa-Viramontes, U., Núñez-Hernández, G., Delgado, J.A., Cueto-Wong, J.A. and Flores-Margez, J.P. (2009). Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la Comarca Lagunera. In: Orona-Castillo,

I. et al., (eds.). *Agricultura Orgánica*, 2da. Ed. Sociedad de Ciencias del Suelo y CONACYT, México. pp.128-151.

França, A., Silva, N., Oliveira, L., Brunes, L., Corrêa, D., Nassar, R., Jacovetti, R., and Pause, A. (2024). In vitro gas production from pearl millet cultivars under nitrogen levels. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 25 (02), 01-11. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1519-994020230034>.

Galloway, C., Swanepoel, P. A., and Haarhoff, S.J. (2024). A carbon footprint assessment for pasture-based dairy farming systems in South Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1333981>.

Garcia, L., Dubeux Jr, J.C., Sollenberger, L.E., Vendramini, J.M., DiLorenzo, N., Santos, E.R., Jaramillo, D.M. and Ruiz-Moreno, M. 2021. Nutrient excretion from cattle grazing nitrogen-fertilized grass or grass–legume pastures. *Agronomy Journal* 113(4): 3110-3123.

Gerber, P., Steinfeld, H., Henderson, Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., y Tempio, G. (2013). Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). <https://www.fao.org/3/i3437s/i3437s.pdf>.

Gonzales, P. M. (2019). Emisión de metano en dos razas de vacunos lecheros (Holstein y Brown Swiss) con dos tipos de alimento (pastura y pastura más concentrado). (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
<http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3447>.

Han, KJ., and McCormick, ME. Evaluation of nutritive value and in vitro rumen fermentation gas accumulation of de-oiled algal residues. *J Anim Sci and Biotechnol.* 2014; 5(1):31. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-1891-5-31>.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2022). Condiciones actuales del tiempo. Estación Automática de Alfredo Volio en Cartago.
<https://www.imn.ac.cr/especial/estacionAlfredoVolio.html>.

INEC. (2022). Encuesta Nacional Agropecuaria. INEC. Recuperado de <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/encuestas/encuesta-nacional-agropecuaria>

IPCC. (2007). *Climate Change 2007*. Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/.htm .

Kitamura, R., Sugiyama, C., Yasuda, K., Nagatake, A., Yuan, Y., Du, J., Yamaki, N., Taira, K., Kawai, M., and Hatano, R. (2021). Effects of three types of organic fertilizers on greenhouse gas emissions in a grassland on andosol in Southern Hokkaido, Japan. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.649613>.

León-Velarde, C., Quiroz, R., Cañas, R., Osorio, J., Guerrero, J. and Pezo, D. 2006. Life - Sim: Livestock Feeding Strategies; Simulation models. International Potato Center, CIP. Lima, Peru. Natural Resources Management; Working paper No 20006-1. 37 p.

McDougall, E. I. (1948). Studies on ruminant saliva. 1. The composition and output of sheep's saliva. *The Biochemical journal*, 43(1), 99–109.

McGinn, S.M., Beauchemin, K.A., Iwaasa, A.D., and McAllister, T.A. (2006). Assessment of the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer technique for measuring enteric methane emissions from cattle. *Journal of Environmental Quality* 35(5): 1686-1691.

Messa, H. F. (2009). Balance de gases de efecto invernadero en un modelo de Producción de Ganadería doble propósito con alternativas silvopastoriles en Yaracuy, Venezuela. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4533>.

Mohanty, S., Bodelier, P., Floris, V., and Conrad, R. (2006). Differential effects of nitrogenous fertilizers on methane-consuming microbes in rice field and forest soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 72, 1346–1354. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.72.2.1346-1354.2006>.

Moujahed, N., Darej, C., Taghouti, M., Bouaziz, Y., C., B., and Kayouli, C. (2012). Chemical composition and in vitro fermentation characteristics of range species growing in Central Tunisia. 107, 121-125.

Navarro, L. A. N. (2019). Evaluación de tres fórmulas de nitrógeno a dos altitudes, en el impacto de las características agronómicas del forraje ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) cv. Jumbo. 129. (Tesis de Licenciatura), Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica

Nguyen, H., Schonewille, J., Pellikaan, W., Trach, N., and Hendriks, W. (2024). In vitro gas Production of common Southeast Asian grasses in response to variable regrowth periods in Vietnam. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1393.v1>.

Nherera, F., Ndlovu, L., y Dzowela, B. (1999). Relationships between in vitro gas production characteristics, chemical composition and in vivo quality measures in goats fed tree fodder supplements. *Small Ruminant Research*, 31, 117–126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(98\)00128-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(98)00128-X).

Núñez-Arroyo, J.M., Jiménez-Castro, J. P., Tobía-Rivero, C.M., Arias-Gamboa, L.M., Jiménez-Alfaro, E., y Padilla-Fallas, J. E. (2022). Efecto de la edad de rebrote y época del año sobre los componentes de la pared celular y la digestibilidad in vitro de gramíneas (II PARTE). *Nutrición Animal Tropical*, 16(2), Article 2. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i2.52729>

Pinares-Patiño, C.S. and Clark, H. 2008. Reliability of the sulfur hexafluoride tracer technique for methane emission measurement from individual animals: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(2): 223-229.

Posada, S.L., Noguera, R., y Bolívar, D. (2016). Relación entre presión y volumen para la implementación de la técnica in vitro de producción de gases en Medellín, Colombia. *Revista Colombiana De Ciencias Pecuarias*, 19 (4), 407–414. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.324098> .

Raposo, E., Brito, L., Januskiewicz, E., Freitas de Oliveira Melo, L., Versuti, J., Assumpção, F., Cardoso, A., Siniscalchi, D., Delevatti, L., Malheiros, E., Reis, R., ao, F., Cardoso, A., Siniscalchi, D., Delevatti, L., Malheiros, E., Reis, R. and Ruggier. (2020). Greenhouse gases emissions from tropical grasslands affected by nitrogen fertilizer management. *Agrón. J.* 112. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20385>.

García, C. Sánchez, P., López, Y., Saavedra, N. E., Maldonado, L. A., y Melo-Trani, M. Y. (2021). Rendimiento, calidad y biogás in vitro en pasto *Megathyrsus maximus* cv. Aruana con diferente fertilización. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2),2957. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2957>.

Smith, K. A., Thomson, P. E., Clayton, H., McTaggart, I. P., y Conen, F. (1998). Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment*, 32(19), 3301–3309. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00492-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00492-5).

Valenciaga, D., Chongo, B., Herrera, R. S., Torres, V., Oramas, A., Cairo, J., y Herrera, M. (2009). Efecto de la edad de rebrote en la composición química de *Pennisetum purpureum* vc. CUBA CT-115. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 43(1), 73-79.

Villalobos, L., y Arce, J. (2013). Agronomic and nutritional evaluation of african star grass-based pastures (*Cynodon nlemfuensis*) in the region of Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. Nutritional Value. <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/13988>.

Villanueva-Najarro, C. (2022). Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas productoras de leche de Costa Rica (Tesis doctoral) Universidad Santiago de Compostela, España. <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/28338>.

García, C., Sánchez, P., Lopez, N., Domínguez, I., Ayala, M., Torres, N., and Valenzuela, J. L. (2022). In vitro fermentative characteristics and chemical quality of tanzania grass with organic and chemical fertilization. *Agro Productividad*. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i7.2314>.

Yan, M.-J., Humphreys, J., and Holden, N. M. (2013). The carbon footprint of pasture-based milk production: Can white clover make a difference? *Journal of Dairy Science*, 96(2), 857–865. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5904>.

8. DISCUSIÓN

El uso de fertilizantes en los pastizales es una práctica utilizada para promover el incremento en la productividad de los suelos dedicados a la producción de pasturas, la cual se enfoca en sustituir los nutrientes que son extraídos por los bovinos durante el proceso de alimentación. (Pezo y García, 2018; Solano-López y Villalobos-Villalobos, 2022).

En la presente investigación se logró evaluar el efecto del cinco tipos de fertilizantes, tres de origen inorgánico (urea, nitrato de amonio y urea protegida con azufre) y dos de origen orgánico (purines y la bacteria fijadora de nitrógeno *Azospirillum oryzae PCJI*). Para estos tratamientos se analizó el comportamiento productivo, fenológico, nutritivo de las pasturas y las emisiones de gases en función de las fuentes de fertilización y la edad de rebrote de la pastura (35, 45 y 55 días).

Comportamiento productivo y fenológico en función de la fuente de fertilización

En relación a la producción de biomasa fresca y seca encontrada en el pasto Estrella Africana, fue mayor para el tratamiento de urea protegida con azufre con respecto a los tratamientos orgánicos y el control. Se obtuvo una mayor producción con el tratamiento de urea protegida con azufre (3649 kg MS ha⁻¹), y en general se observó una mayor producción con los tratamientos inorgánicos que con los de origen orgánico, como los purines y el uso de la bacteria fijadora de nitrógeno *Azospirillum*. Estos resultados son consistentes con los reportados por diversos autores (Borges *et al.*, 2012; Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca, 2021; Apollon *et al.*, 2022; Solano-López y Villalobos-Villalobos, 2022), el comportamiento encontrado en las investigaciones pueden darse por diversos factores, como la rápida

disponibilidad de nutrientes, la tasa de mineralización, la concentración y proceso de liberación, estos son elementos que hacen que los fertilizantes inorgánicos actúen más rápido y que la planta pueda hacer un uso más rápido de estos nutrientes para el crecimiento radicular y aéreo.

Similares resultados se encontraron para el efecto del tipo de fertilizantes sobre las variables fenológicas, con mayor altura de planta para tratamientos inorgánicos, siendo la urea protegida con azufre la que resultó en mayor altura (47,29 cm), comparado con el tratamiento control y los de tipo orgánico, pero no fue diferente ($p > 0,05$) con respecto a sus pares inorgánicos. Los valores de altura obtenidos en este estudio fueron similares a los reportados por Solano-López y Villalobos-Villalobos (2022) para esta especie; y a lo observado por otros autores (Ortega y González, 1990; Muñoz, 2020; Astúa-Ureña *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2022) respecto a las ventajas de los tratamientos de origen inorgánico. Tal como se ha indicado previamente, estas diferencias a favor de los fertilizantes de origen inorgánico han sido atribuidas a la más rápida disponibilidad de nutrientes, los cuales son utilizados para el crecimiento aéreo de la planta.

En relación a la variable número de hojas no se evidenció un efecto consistente causado por los tratamientos de fertilización evaluados; no se mostraron diferencias entre los tratamientos ($p > 0,05$), pero se observó que el tratamiento orgánico (purines) fue el que produjo un mayor número de hojas (7,17 hojas planta⁻¹). Los datos sobre número de hojas encontrados en esta investigación son similares a los reportados en otros estudios con gramíneas tropicales (Villalobos y Arce, 2013; Apollon *et al.*, 2022) en que los valores oscilaron entre 6-8 hojas

planta⁻¹. La densidad de rebrotes y los componentes estructurales fueron similares en los tratamientos evaluados ($p > 0,05$); sin embargo, se observaron diferencias productivas para el tratamiento basado en nitrato de amonio, en comparación con el tratamiento control y los tratamientos inorgánicos, este produjo mayor proporción de rebrotes con diferencias entre 50 y 100 rebrotes, indicando un efecto positivo causado por el uso de esta fuente de fertilización, este comportamiento puede asociarse a la rápida disponibilidad de nutrientes para ser absorbidos y usados por la planta. Otros autores (Pedreira et al., 2007; G. Rodríguez et al., 2011; Navarro-Zamora y Villalobos-Villalobos, 2021) indican resultados diversos, y no establecen una explicación consistente que indique las diferencias entre tipos de fertilizantes utilizados.

En relación con la edad de rebrote sobre variables productivas y fenológicas en pasto Estrella Africana, se identificó que los días de rebrote tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) sobre la producción de biomasa forrajera fresca y seca, altura de la pastura y edad fenológica. Se evidencio diferencias mínimas entre las producciones de biomasa de 35 y 45 días, este comportamiento puede estar asociado a las diferencias en el comportamiento de las precipitaciones en cada época de evaluación, las cuales tienen efecto sobre el desarrollo de la planta (Méndez-Martínez *et al.*, 2020). Mayores producciones en la biomasa fresca y seca (18 300 y 4 303 seca kg ha⁻¹), respectivamente, fueron estimadas para edades de rebrote de 55 días, este comportamiento se evidenció para altura (63,1 cm) y para edad fenológica (7,1 hojas. rebrote⁻¹). Similares tendencias expresan diversos autores donde evaluando edades de cosecha sobre la producción de biomasa y variables fenológicas indican de un efecto causado por el retraso de la cosecha sobre el aumento productivo y crecimiento de las variables

analizadas en este estudio (Dios-León *et al.*, 2022; González *et al.*, 2011; Merlo-Maydana *et al.*, 2017; Núñez-Arroyo *et al.*, 2022; Tilahun *et al.*, 2017). El proceso de madurez de la planta a edades de rebrote avanzadas (55 días), y permite una mayor acumulación y desarrollo de tejidos vegetativos, provocando mayor producción de biomasa.

Comportamiento nutricional de pasto estrella en función de la fuente de fertilización

Las variables nutricionales evaluadas en este estudio no evidenciaron diferencias estadísticas para los tratamientos evaluados ($p > 0,05$), similares tendencias evidencian otras investigaciones donde evaluando el efecto sobre parámetros productivos y nutricionales en pasto Estrella Africana, pasto Tifton (*Cynodon dactylon*), Kikuyo, y Ryegrass (*Lolium spp.*) indican que no puede establecerse un efecto contundente por el uso de fertilizantes sobre variables nutricionales analizadas (Borges *et al.*, 2012; Méndez *et al.*, 2019; Gacheta, 2019; Elizondo-Salazar y Espinoza-Fonseca, 2021; Apollon *et al.*, 2022;).

En relación a la edad de rebrote y las variables nutricionales, se evidenció diferentes efectos, teniendo valores más altos en la materia seca (MS), proteína cruda (PC) y digestibilidad *in vitro* de la MS (DIVMS), para edades de cosecha de 45 días. Esta tendencia fue reportada para pastos Desho (*Pennisetum pedicellatum Trin*), Mombaza (*Megathyrus maximus*) y Elefante (*Cenchrus purpureus Schum.*) mostrando mejora en las variables antes descritas con edades intermedias de cosecha (Rodríguez, 2009; Tilahun *et al.*, 2017). Así mismo se evidenció que a medida que avanzó la edad de cosecha se redujo la proporción de nutrientes del contenido celular (carbohidratos solubles, proteínas), lo cual tiene un efecto en la calidad de la pastura (Ferrufino-Suárez *et al.*, 2022; Pinto *et al.*, 2019). Es importante analizar que

aunque hubo distintas edades de rebrote, las plantas estaban con una edad fenológica entre 6 y 7 hojas en las tres cosechas, por lo que las diferencias entre los cortes pueden explicarse por una dilución de los contenidos nutricionales, causado por el aumento del contenido de carbohidratos estructurales (Wassie *et al.*, 2018), además se deben considerar otros elementos como la precipitación y las condiciones de suelo, las cuales influyen sobre la calidad del forraje.

La lignina detergente ácida (LDA), la fibra detergente neutra (α FDN) y la fibra detergente ácida (FDA), presentaron una tendencia a aumentar conforme avanzaba la edad de rebrote, presentando menores porcentajes para cosecha de 35 días. Esta información concuerda con lo expresado por otros estudios, donde realizando evaluaciones basadas en la edad de cosecha, reportan aumento de la lignificación y de los contenidos de fibra en relación al aumento de días a cosecha, este comportamiento puede atribuirse al proceso natural de lignificación y el aumento en la proporción de componentes de pared celular de la pastura, el cual ocurre conforme aumenta su edad (Morocho *et al.*, 2023; Tilahun *et al.*, 2017; Villalobos, 2012). Tal como se mencionó antes, a pesar de tener la misma edad fenológica, existen factores como la temperatura, precipitación y radiación solar que influyen sobre el comportamiento de la pared celular en el forraje (Restrepo, 2004; Méndez-Martínez *et al.*, 2020).

Similar comportamiento se evidenció para el total de nutrientes digestibles (TDN), la digestibilidad *in vitro* de la materia seca, digestibilidad *in vitro* de la fibra (DIVFDN), energía digestible (ED), metabolizable (EM) y neta de lactancia, las cuales presentaron valores más

altos para edades de cosecha de 35 días, y disminuyeron conforme avanzó la edad de cosecha. Este comportamiento ha sido reportado por otros autores (Carranza, 2016, 2016; Ferrufino-Suárez et al., 2022; Núñez-Arroyo et al., 2022; Villalobos, 2012), los cuales indican que conforme avanza la edad de cosecha, se evidencia un aumento en la lignina y componentes fibrosos (FDA y FDN), limitando así el potencial de digestibilidad y la obtención de otros nutrientes en la pastura.

Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero

Se estimó los flujos de CH₄ y de CO₂ en el suelo, los cuales no tuvieron diferencias entre los tratamientos de fertilización evaluados, lo cual coincide con lo encontrado por diversos autores (Mohanty et al., 2006; Al-Kaisi et al., 2008; Espinosa-Carvajal et al., 2020; Kitamura et al., 2021), donde indican que los fertilizantes pueden aportar al crecimiento de las poblaciones bacterianas y promover sumideros de carbono y bacterias metanotrofas que ayudan a reducir las emisiones de la actividad ganadera. Por otro lado, cuando se opta por opciones de fertilización orgánica se previenen las emisiones de GEI asociadas a la producción y transporte de fertilizantes inorgánicos (Walling et al., 2020; Rosa y Gabrielli, 2023), ya que los fertilizantes pueden ser elaborados y reutilizados dentro de las mismas fincas, con lo que se aporta a la mejora y eficiencia productiva de las fincas.

Smith et al. (1998) evaluando efectos de la temperatura, el contenido de agua y la fertilización nitrogenada sobre las emisiones de N₂O de los suelos, indica que fertilizando con 120 kg N ha⁻¹, suelos de pastizales tuvieron una fuente de emisiones similares a esta investigación (1,0-5,2 kg N₂O kg ha⁻¹). Por su parte Araya (2018) estimó emisiones directas de N₂O bajo la

influencia de tres tipos de fertilización (purines, nitrato de amonio y urea con azufre), con una dosis para nitrato de amonio y urea de $1000 \text{ kg N ha}^{-1}$ obteniendo emisiones de óxido nitroso usando los factores de emisión, evidenciando 26,8, 15,7 y $6,3 \text{ N}_2\text{O kg ha}^{-1}$, mayores producciones a los estimados en esta investigación, estas diferencias en las estimaciones de N_2O , pueden estar relacionadas a la cantidad de nitrógeno suministrado al forraje, en esta investigación se estimaron en 200 kg ha^{-1} . Un aspecto crítico para reducir las emisiones de GEI en sistemas agrícolas es el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados (Gao y Cabrera; Serrenho, 2023), para reducir la tasa de nitrificación y eventual pérdida de N_2O ; en ese sentido, el presente estudio evidenció que el uso de urea protegida es una opción que puede ser considerada para reducir las emisiones.

En cuanto al efecto de las fuentes de fertilización utilizadas, la producción de gas *in vitro* por unidad de peso del forraje producido, osciló entre 80,4 y $112,3 \text{ mL g}^{-1}$ de MS; sin embargo, se identificó una tendencia a menor producciones de gas ($80,4 \text{ mL g}^{-1}$ de MS) cuando se fertilizó con nitrato de amonio y las mayores cuando se aplicaron purines ($112,3 \text{ mL g}^{-1}$ de MS). Similar comportamiento reportaron Sánchez et al. (2021), con una mayor producción de gas en forrajes fertilizados con fuentes de origen orgánico comparado con fuentes inorgánicas, pero sin diferencias significativas entre los tratamientos.

Se analizó el efecto de la edad de rebrote sobre la producción de gas *in vitro*, donde no se evidenció diferencias significativas ($99,8$; $100,5$ y $89,9 \text{ mLg}^{-1}$ de MS), entre las edades evaluadas (35, 45 y 55 días, respectivamente). Se observó que al aumentar la edad a los 55 días, se presentó una leve tendencia a disminuir la producción de gas, similar comportamiento

reportan García *et al.* (2022), los cuales analizaron el comportamiento al evaluar edades de cosecha sobre la producción de gas *in vitro*, indicando que no se observó una tendencia clara en relación al efecto que pudo tener la edad de cosecha. Es posible que si se hubiera trabajado con muestras de mayor edad, se habría detectado significancia, pues en tal caso habría ocurrido un aumento importante en los componentes estructurales de la pastura, y una disminución de los compuestos fácilmente fermentables en el rumen como proteínas y carbohidratos solubles, lo cual resultaría en una mayor producción de gas *in vitro* (Sanches *et al.*, 2017 ; Nguyen *et al.*, 2024).

Al construir un modelo de regresión lineal múltiple según el Criterio de Información de Akaike (AIC), las variables fibra detergente neutra tratada con amilasa (α FDN), materia seca (MS), digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS), tipo de fertilizante y días de rebrote, proporcionaron una explicación razonable sobre la variación en la producción de gas *in vitro*, con correlaciones positivas para MS, α FDN y fertilizante, y negativas para DIVMS y edad de cosecha. Comportamiento similar han descrito otros autores (Nherera *et al.*, 1999; Apráez-Guerrero *et al.*, 2016; Chino *et al.*, 2022;), lo cual indica que las variables analizadas en esta investigación tienen relación y que pueden explicar en cierta medida la producción de gas en función de su análisis.

Mediante el uso del modelo de simulación LIFE-SIM se logró estimar la producción de CH₄ entérico por lactancia (Kg CH₄ por lactancia) para ganado de raza Jersey, manejado en un sistema de lechería especializada (138,8–140,31 kg CH₄ por lactancia). Como era de esperar, estos datos discrepan de los reportados en otras investigaciones (; , las cuales evaluaron con

diferentes biotipos bovinos como Holstein y Pardo Suizo (Gonzales, 2019) y con vacas de doble propósito (Messa, 2009). También los estimados obtenidos en este estudio fueron mayores a los obtenidos por Villanueva-Najarro, (2022) usando la técnica de Hexafluoruro de azufre (SF_6) con vacas F1 (50% Jersey x 50% Gyr), Triple cruce (50% Jersey x 31% Holstein x 19% Sahiwal) y Jersey de 91,22; 111,82 y 111,42 kg CH_4 vaca⁻¹ año⁻¹ respectivamente (Villanueva-Najarro, 2022). Las diferencias entre los datos estimados por otras investigaciones aun con el uso de simulación, se basan en la información con la cual se estiman las simulaciones, ya que el biotipo animal, raza, peso, consumo de materia seca, la información del forraje (producción mensual), otros suplementos de la dieta y el clima, causan estas diferencias en los estimados. Sin embargo, estimaciones directas con razas similares a la usada en esta tesis muestran datos similares con diferencias pequeñas entre simulado y estimado, lo que supone que el uso de LIFE-SIM, puede representar una herramienta valiosa para poder predecir la producción de este gas.

El nitrógeno excretado basado en la fuente de fertilización del forraje produjo datos similares (43,45 y 44,18 kg por lactancia) e inferiores a los reportados por otras investigaciones los que reportan una excreción de estiércol por animal de 52,7–55,53 kg (Correa, 2003; Figueroa *et al.*, 2009). Al igual que con el CH_4 , estos valores pudieron variar por efecto del biotipo animal utilizado, el consumo de materia seca, la producción de leche, la dieta y las condiciones ambientales, aunque los datos estimados por otras investigaciones fueron mayores a los encontrados, la herramienta utilizada brinda una aproximación de la producción de excretas, dato de gran importancia por ser el principal nutriente aplicado en los programas de fertilización de las pasturas.

9. CONCLUSIONES

No se evidenció un efecto consistente entre la respuesta productiva, variables nutricionales y producción de gas *in vitro* por el uso de los fertilizantes evaluados; sin embargo, las fuentes inorgánicas (urea protegida con azufre y el nitrato de amonio) tendieron a mostrar una mayor producción de biomasa forrajera fresca y seca, altura de la planta y densidad de rebrotes. Por otro lado, el uso de purines favoreció la presentación de un mayor número de hojas.

La edad de rebrote tuvo efecto sobre la producción de biomasa y pérdida en calidad nutritiva de la pastura, ocasionada por la prolongación del crecimiento del pasto, así mismo se observó que cuando aumentó en la edad de rebrote disminuyó la producción de gas *in vitro*.

El uso de modelos de regresión permitió identificar la potencial predicción de la producción de gas *in vitro*, utilizando variables nutritivas y variables de manejo del pasto estrella africana, esta información contribuye a una mejor comprensión de los factores que influyen en la producción de gas en los sistemas de producción ganadera.

Las emisiones de CO₂ y CH₄ fueron similares para cada uno de las fuentes de fertilización evaluadas. Las emisiones calculadas de forma indirecta para e N₂O, y la cuantificación de CO₂eq calculado por kilogramo de materia seca, brindó información y métricas importantes sobre las emisiones en sistemas de producción de forrajes.

La emisión de CH₄ entérico y nitrógeno excretado, no presentaron diferencias para los tratamientos de fertilización, el análisis de los datos obtenidos sugiere que el uso del modelo

LIFE SIM ayuda a predecir el efecto de diferentes dietas y condiciones de manejo sobre dichos parámetros.

Los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan información que investigadores, técnicos y productores pueden considerar sobre variables de producción, fenología y emisiones de gases de efecto invernadero, para tomar mejores decisiones en función de mejorar y mantener la productividad de las pasturas minimizando el impacto ambiental de la producción ganadera.

10. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, A., Muhammad, I., y Pezo, D. (2014). Hacia un desarrollo ganadero climáticamente inteligente. En A. Acosta y T. Diaz (Eds.), *Lineamientos de políticas para el desarrollo sostenible del sector ganadero* (p. 23–39).

Al-Kaisi, M. M., Kruse, M. L., and Sawyer, J. E. (2008). Effect of nitrogen fertilizer application on growing season soil carbon dioxide emission in a corn–soybean rotation. *Journal of Environmental Quality*, 37(2), 325–332. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0240>.

Apollon, W., Jean-Baptiste, Y., Wagner, B. J., Luna-Maldonado, A. I., y Silos-Espino, H. (2022). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en la producción y calidad de *Brachiaria brizantha*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(1), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2637>.

Apráez-Guerrero, J. E., Delgado-Jurado, D., y Solarte-Portilla, C. (2016). Evaluación *In vitro* de la producción de metano en variedades de pastos neozelandeses del altiplano de Nariño. *Revista Veterinaria y Zootecnia (On Line)*, 10(2), Article 2. DOI: <https://doi.org/10.17151/vetzo.2016.10.2.8>.

Araya, S. E. (2018). Determinación de la capacidad de captura de CO₂ y liberación de emisiones de N₂O de dos variedades de pastos en la zona de Vara Blanca bajo la influencia de tres tipos de fertilización. <https://repo.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/6321>.

M., Arteaga, D. V., Cedeño García, G., Cedeño-García, G., Cargua Chávez, J., y Garay Lugo, M. (2019). Eficiencia agronómica de nitrógeno y producción de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. en función de dos frecuencias de corte. Chilean journal of agricultural yamp; animal sciences, 35(3), 251–260. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000405>.

Astúa-Ureña, M., Campos-Granados, C. M., y Rojas-Bourrillon, A. (2021). Efecto de la fertilización nitrogenada y la edad de rebrote sobre las características morfológicas y rendimiento agronómico del botón de oro (*Tithonia diversifolia*) ecotipo INTA-Quepos. Nutrición Animal Tropical, 15(1). DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i1.47521>.

Barrientos, O., y Villegas, L. (2010). Cadena productiva de la leche, políticas y acciones. Secretaría ejecutiva de planificación sectorial agropecuaria, 10. Recuperado de <http://www.infoagro.go.cr/MarcoInstitucional/Documents/Políticas de la Leche.pdf>.

Benavides, H., y León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.

Betancourt, H., Pezo, D., Cruz, J., y Beer, J. (2007). Impacto bioeconómico de la degradación de pasturas en fincas de doble propósito en El Chal, Petén, Guatemala. Pastos y Forrajes, 30(March), 169.

Borges, J. A., Barrios, M., y Escalona, O. (2012). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica sobre variables agroproductivas y composición química del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). 30(1), 17–2.

Cardenas, C., Garrido, M., Roncallo, B., y Bonilla, R. (2014). Inoculación con *Azospirillum* spp y *Enterobacter agglomerans* en Pasto Guinea (*Panicum maximum Jacq.*). Revista Facultad Nacional de Agronomía, 67(2), 7271–7280. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n2.44168>.

Cárdenas, J.A.B., y Flores, C.L. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revisión. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 3(2), 215–246. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265624467007>.

Carranza, A. (2016). Calidad nutricional de tres forrajes tropicales cosechados a diferentes edades de corte en Zamorano. (Tesis de licenciatura), Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

Chacón, P., Russo, R., y Boschini, C. (2014). Efecto del uso de sustancias húmicas en la producción de biomasa del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*). Horizonte Lechero (Costa Rica), 5, 24–29.

Chino, L. B., Molina-Botero, I. C., Moscoso-Muñoz, J. E., and Gómez-Bravo, C. (2022). Relationship between chemical composition and *in vitro* methane production of high Andean Grasses. *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, 12(18), 2348. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12182348>.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (2002). Multi-stakeholder participatory development of sustainable land use alternatives for degraded pasture lands in Central America. Turrialba, Costa Rica.

Coto, A. (2018). Situación actual y retos de la lechería regional. VII. Congreso Centro Americano del sector lácteo. Recuperado de <http://proleche.com/wpcontent/uploads/2018/10/CL2018SP1.pdf>

Correa Cardona, H. (2018). Efecto de la época del año y la altura remanente posterior al pastoreo sobre el crecimiento y calidad nutricional del pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) en el norte de Antioquia. *Livestock Research for Rural Development*, 30.

Cunha, A. M. Q., Macedo, V. H. M., de Oliveira, J. K. S., Melo, D. de M., Domingues, F. N., Cândido, E. P., Faturi, C., y do Rêgo, A. C. (2022). Nitrogen fertilization as a strategy for intensifying production and improving the quality of Massai grass grown in a humid tropical climate. *Journal of Plant Nutrition*, 45(14), 2213–2227. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046078>.

Del Pozo, P., Herrera, R., y García, M. (2004). Efecto de la fertilización nitrogenada en el crecimiento y desarrollo de los componentes morfológicos del pasto estrella. *Cuban Journal of Agricultural Science*,(2), 189–195.

Díaz, A., Galindo, J., Bocourt, R., Aldana, A., Moreira, O., y Sarduy, L. (2009). Efecto de un hidrolizado enzimático de *Saccharomyces cerevisiae* y sus diferentes fracciones en la dinámica fermentativa ruminal del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) en condiciones in vitro. 251–257.

Echeverri, J., Restrepo, L. F., y Parra, J. E. (2010). Evaluación comparativa de los parámetros productivos y agronómicos del pasto kikuyo *Pennisetum clandestinum* bajo dos metodologías de fertilización. 7(2), 94–100.

Elizondo-Salazar, J.A., y Espinoza-Fonseca, H. (2021). Evaluación de los purines como una alternativa de fertilización orgánica en pasto estrella africana. *Nutrición animal tropical*, 15(2), 25–41. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8113256>.

Espinosa Carvajal, M., Contreras Santos, J. L., Torres, J. C., Martínez Atencia, J. D. C., Jaramillo Barrios, C. I., y Hurtado, M. D. P. (2020). Flujos de metano en suelos con coberturas de pastos en el norte de Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 291–309. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.38387>.

FAO. (2011). Situación de la lechería en América Latina. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Dairy/Documents/Paper_Lechería_AmLatina_2011.pdf.

FAO. (2015). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Recuperado de www.fao.org/contact-us/licence-request.

FAO. (2021). FAO: La ganadería y sus desafíos en América Latina y el Caribe. Agronews Castilla y León. Recuperado de <https://www.agronewscastillayleon.com/fao-la-ganaderia-y-sus-desafios-en-america-latina-y-el-caribe>

FAO. (2023). Avances y desafíos en la ganadería de América Latina y el Caribe- Medidas de mitigación apropiadas para cada país. Recuperado de <https://www.fao.org/3/cc8210es/cc8210es.pdf>

FAO. 2023. FAO. 2023. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023. Rome. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc8166en>

Favoreto, M., Deresz, F., Fernandes, A., Mendonça, R., y Alencar, C. (2008). Avaliação nutricional da grama-estrela cv. Africana para vacas leiteiras em condições de pastejo. Revista Brasileira de Zootecnia, 37(2), 319–327. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000200019>

Ferrufino-Suárez, A. J., Mora-Valverde, D., y Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Biomasa y bromatología del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis Vanderyst*) con cinco períodos de rebrote. *Agronomía Mesoamericana*, 33 (2): 477746. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47746>.

Flores, J. de J., Vázquez, R., Solano, J., Aguirre, V., Flores, F., Bahena, M., Oliver, R., Granjeno, A., and Orihuela, A. (2012). Effect of organic, inorganic and a combination of fertilizers on alfalfa production and soil chemistry properties. *Terra Latinoamericana*, 30 (3): 213–220.

França, A., Silvan, N., Oliveira, L., Brunes, L., Corrêa, D., Nassar, R., Jacovetti, R., and Pause, A. (2024). In vitro gas production from pearl millet cultivars under nitrogen levels. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 25. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1519-994020230034>.

Gacheta, J. C. (2019). Efecto de cuatro niveles de fertilización orgánica y química sobre la producción y calidad de pastos en Guatavita Cundinamarca. (Tesis de maestría), Universidad Nacional de Colombia, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76844>

Gao, Y., Cabrera-Serrenho, A. (2023). Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. *Nature Food* 4(2):170-8.

García, J., Mendoza, A., y Makey, N. (2012). Efecto de *Azospirillum brasilense* en el rendimiento del maíz en el norte de Tamaulipas, México. Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, 28(1), 79–84.

Gerber, P., Steinfeld, H., Henderson, Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., y Tempio, G. (2013). Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). <https://www.fao.org/3/i3437s/i3437s.pdf>

Gómez, L., y Campos, R. (2016). Control del balance energético negativo y comportamiento productivo y metabólico en vacas doble propósito bajo suplementación energética. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 7(1), 147. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.1545>

Gonzales, A., y Camacho, M. (2018). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 8 (8). DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>.

Gonzales, P. M. (2019). Emisión de metano en dos razas de vacunos lecheros (Holstein y Brown Swiss) con dos tipos de alimento (pastura y pastura más concentrado). (Tesis de ingeniería), Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3447>

Gutiérrez, F.A., Alvarado-Ochoa, S.P., Reascos-Castillo, J. F., Ortiz-Flores, E.N., Portilla-Narvaez, A. R., y Rivera-Montesdeoca, M.A. (2023). Efecto sinérgico de la aplicación de biofertilizante y fertilizante nitrogenado en pasturas. *Pastos y Forrajes*, 46. Disponible: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstractypid=S0864-03942023000100014yIng=esynrm=isoytIng=es

Hanrahan, L., McHugh, N., Hennessy, T., Moran, B., Kearney, R., Wallace, M., and Shalloo, L. (2018). Factors associated with profitability in pasture-based systems of milk production. *Journal of Dairy Science*, 101(6), 5474–5485. DOI: <https://doi.org/10.3168/JDS.2017-13223>

Herrero, M., Gerber, P., Vellinga, T., Garnett, T., Leip, A., Opio, C., Westhoek, H.J., Thornton, P.K., Olesen, J., Hutchings, N., Montgomery, H., Soussana, J.F., Steinfeld, H., and McAllister, T.A. (2011). Livestock and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right ganadería y emisiones de gases de efecto invernadero: la importancia de acertar con las cifras. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 779–782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.083>.

Holmann, F., Argel, P., Rivas, L., White, D., Estrada, R. D., Burgos, C., Perez, E., Ramirez, G., y Medina, A. (2004). ¿Vale la pena recuperar pasturas degradadas? una evaluación de los beneficios y costos desde la perspectiva de los productores y extensionistas pecuarios en Honduras. July, 61. <http://ciat->

library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/Rehabilitacion_Pasturas_Honduras_Version_Final_DT196.pdf.

Holmann, F., Rivas, L., Pérez, E., Castro, C., Schuetz, P., y Rodríguez, J. (2007). La cadena de carne bovina en Costa Rica: Identificación de temas críticos para impulsar su modernización, eficiencia y competitividad. CIAT No. 206, 68.

INEC. (2015). VI Censo Nacional Agropecuario. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/censos/censo-agropecuario>.

INEC. (2022). Encuesta Nacional Agropecuaria 2021. Recuperado de <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2021-01.pdf>.

Jiménez, O. M., Granados, L., Oliva, J., Quiroz, J., y Barrón, M. (2010). Calidad nutritiva de *Brachiaria humidicola* con fertilización orgánica e inorgánica en suelos ácidos. Archivos de Zootecnia, 59(228), 561–570.

Kitamura, R., Sugiyama, C., Yasuda, K., Nagatake, A., Yuan, Y., Du, J., Yamaki, N., Taira, K., Kawai, M., and Hatano, R. (2021). Effects of three types of organic fertilizers on greenhouse gas emissions in a grassland on andosol in Southern Hokkaido, Japan. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.649613>.

MAG. (2007). Agrocadena de leche índice de contenido. Caracterización agrocadena de leche, Región Central Oriental, 1–109. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-10747.pd>

Maya, G., Duran, C., y Ararat, E. (2004). Valor nutritivo del pasto estrella solo y en asociación con *Leucaena* a diferentes edades de corte durante el año. *Acta Agronómica*, 54, 9. DOI: <https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v34n64.45942>. Este

Méndez-Martínez, Y., Reyes-Pérez, J.J., Luna-Murillo, R.A., Verdecía, D.M., Espinoza-Coronel, A.L., Pincay-Ronquillo, W.J., Espinosa-Cunuhay, K.A., Macías-Pettao, R.K, y Herrera, R.S.. (2020). Efecto de la zona climática en el rendimiento y calidad de tres variedades de *Megathyrsus maximus*. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 54(2), 267-278.

Méndez, R., Fernández, J. A., y Yáñez, E. A. (2019). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y composición de *Cynodon plectostachyus*. *Revista Veterinaria*, 30(1), 48. DOI: <https://doi.org/10.30972/vet.3013899>.

Merlo-Maydana, F.E., Ramírez-Avilés, L., Ayala-Burgos, A.J., y Ku-Vera, J.C. (2017). Efecto de la edad de corte y la época del año sobre el rendimiento y calidad de *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Staff en Yucatán, México. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 4(2): 116–127.

Messa, H. F. (2009). Balance de gases de efecto invernadero en un modelo de Producción de Ganadería doble propósito con alternativas silvopastoriles en Yaracuy, Venezuela.

<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4533>.

Mohanty, S., Bodelier, P., Floris, V., and Conrad, R. (2006). Differential effects of nitrogenous fertilizers on methane-consuming microbes in rice field and forest soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 72, 1346–1354. DOI:

<https://doi.org/10.1128/AEM.72.2.1346-1354.2006>.

Morocho, G. A., Toalombo, P. A., Guevara, H. P., y Jiménez, S. F. (2023). Evaluación del potencial forrajero y composición nutricional del pasto híbrido Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum Schumacher x Pennisetum glaucum L.*) a tres edades de corte. *Archivos de zootecnia*, 72(278), 127–142. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9036606>.

Muerguitio, E., y Ibrahim, M. (2001). Agroforestería pecuaria para la reconversión de la ganadería en Latinoamérica. 13(3), 1–11. Recuperado de

<http://www.lrrd.org/lrrd13/3/murg133.htm>.

Muñoz, C. W. (2020). Evaluación de dos tratamientos sobre el desarrollo productivo y vegetativo de *Cynodon nlemfuensis* (pasto estrella).

<http://repository.unad.edu.co/handle/10596/33745>.

Navarro-Zamora, L. A., y Villalobos-Villalobos, L. A. (2021). Composición morfológica del forraje ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) cv. Jumbo en respuesta a tres fórmulas nitrogenadas. *Nutrición Animal Tropical*, 15(2), 99-122. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v15i2.48409>.

Navarro, L. A. N. (2019). Evaluación de tres fórmulas de nitrógeno a dos altitudes, en el impacto de las características agronómicas del forraje ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) cv. Jumbo. 129. (Tesis de Licenciatura), Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.

Nguyen, H., Schonewille, J., Pellikaan, W., Trach, N., and Hendriks, W. (2024). In vitro gas production of common Southeast Asian grasses in response to variable regrowth periods in Vietnam. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1393.v1>.

Nherera, F., Ndlovu, L., and Dzowela, B. (1999). Relationships between in vitro gas production characteristics, chemical composition and in vivo quality measures in goats fed tree fodder supplements. *Small Ruminant Research*, 31, 117–126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(98\)00128-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(98)00128-X).

Nilsson, V., Sánchez, P., y Manfredi, R. (2005). Hierbas y arbustos comunes en cafetales y otros cultivos: Guía para su identificación (1. edición.). San José, Costa Rica.: Herbario Juvenal Valerio Rodríguez.

Núñez-Arroyo, J.M., Jiménez-Castro, J.P., Tobía-Rivero, C.M., Arias-Gamboa, L.M., Jiménez-Alfaro, E., y Padilla-Fallas, J. E. (2022). Efecto de la edad de rebrote y época del año sobre la biomasa y calidad bromatológica en gramíneas utilizadas en tres zonas agroclimáticas de Costa Rica (I PARTE). *Nutrición Animal Tropical*, 16(1), Article 1. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i1.50370>.

Ortega, L., y González, B. (2014). Efecto de la fertilización nitrogenada y frecuencia de corte sobre los rendimientos de materia seca y valor nutritivo del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). *Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia*, 7(4). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/25905>

OCDE-FAO. (2023). OCDE-FAO Perspectivas agrícolas 2023-2032. Recuperado de <https://doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>

Parra, Y., y Cuevas, F. (2001). Potencialidades de *Azospirillum* como inoculante para la agricultura. *Cultivos Tropicales*, 23(3), 31–41.

Pedreira, B. C., Pedreira, C. G. S., y Silva, S. C. da. (2007). Estrutura do dossel e acúmulo de forragem de *Brachiaria brizantha* cultivar Xaraés em resposta a estratégias de pastejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, 281–287. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200018>.

Pérez, J., Alarcón-Zúñiga, B., Mendoza-Martínez, G. D., Bárcena-Gama, R., Hernández-Garay, A., y Herrera-Haro, J. G. (2001). Efecto de un banco de proteína de kudzú en la ganancia de peso de toretes en pastoreo de estrella africana. *Técnica Pecuaria en México*, 39(1), 39–52.

Peters, M., Franco, T., Schmidt, A., y Hincapié Carvajal, B. (2011). *Especies forrajeras multipropósito: Opciones para productores del trópico Americano*. <https://hdl.handle.net/10568/54681>

Pezo, D. (2017). Tecnologías forrajeras para la intensificación de la ganadería en el contexto del cambio climático. *UTN*, 78, 18–25.

Pezo, D., y García, F. J. (2018). *Uso Eficiente de Fertilizantes en Pasturas*. 56. Editorial CATIE, Serie técnica, Boletín técnico, Turrialba, Costa Rica. 56 págs. ISBN 978-9977- 57-57-696-1.

Pezo, D., Ríos, N., Ibrahim, M., and Gómez, M. (2018). *Silvopastoral systems for intensifying cattle production and enhancing forest cover: The case of Costa Rica*. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8995>

Pinto, F., Moraes, M., Sampaio, J., Almeida, M., Rocha, B., Mesquita, V., Barbosa, D., Albuquerque, C., Brant, C., and Alencar, J. (2019). Yield and nutritional value of BRS Capiaçú grass at different regrowth ages produtividade e valor nutricional do Capim-Elefante

cv. BRS Capiacu em diferentes idades de rebrota. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20913.53607>

Pirela, M. (2015). Valor nutritivo de los pastos tropicales. Manual ganadería, 7. Recuperado de http://www.avpa.ula.ve/docuPDFs/libros_online/manualganaderia/seccion3/articulo6-s3.pdf.

Pomareda, C., y Steinfield, H. (2000). Intensificación de la Ganadería en Centro América: beneficios económicos y ambientales. San José Costa Rica.

Restrepo, E. (2004). Efecto de la temperatura sobre la producción y el contenido de proteína cruda y fibra neutro detergente de *Panicum maximum* cv. Tobiata, *Digitaria eriantha* cv. Transvala y *Brachiaria* híbrido cv. Mulato. 21.

Rodríguez, G., Patiño, R., Altahona, L., y Gil, J. (2011). Dinámica de crecimiento de pasturas con manejo rotacional en diferente topografía en un sistema de producción de carne vacuna en Córdoba, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 3(1), 47–61. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3691377>.

Rodríguez, J., y Elizondo, J. (2012). Consumo, calidad nutricional y digestibilidad aparente de morera (*Morus alba*) y pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) en cabras. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 13–23. DOI: <https://doi.org/10.1021/es060406x>

Rojas, S., Olivares, J., Jiménez, R., Gutiérrez, I., y Avilés, F. (2011). Producción de materia seca y componentes morfológicos de cuatro cultivares de *Brachiaria* en el trópico. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 15(1), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.188789-0>

Rosa, L., and Gabrielli P. (2023). Achieving net-zero emissions in agriculture: a review. *Environmental Research Letters* 18(6):063002. iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acd5e8/pdf.

Salas, R., y Cabalceta, G. (2014). Manejo del sistema suelo-pasto: partida para la producción de forrajes. Congreso Nacional de Lecheros, 15 pp. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004> .

Sanches, A., Gomes, E., Rickli, M., Friske, E., y Fasolin, J. (2017). Productivity and nutritive value of Tifton 85 in summer, with and without irrigation under different nitrogen doses. *Engenharia Agrícola*, 37, 246–256. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n2p246-256/2017>.

Sánchez, J., y Soto, H. (1998). Estimación de la calidad nutricional de los forrajes del cantón de San Carlos. III. Energía para la producción de leche. 1998.

Saynes, V., Etchevers, J., Paz Pellat, F., y Alvarado-Cardenas, L. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 83–96.

Silva, L., y Jaramillo, D. (2022). Manejo Sostenible de la ganadería en Latinoamérica: Revisión Sistemática 2018-2021. *Revista Ambiente, Comportamiento y Sociedad*. <https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/ACS/article/view/969>

Smith, K. A., Thomson, P. E., Clayton, H., Mctaggart, I. P., and Conen, F. (1998). Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment*, 32(19), 3301–3309. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00492-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00492-5)

Solano-López, M. J., y Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Fertilización nitrogenada en pastos del género *Cynodon*. *Nutrición Animal Tropical*, 16(1), 82–104. DOI: <https://doi.org/10.15517/nat.v16i1.51542>

Tigmasa, K. (2018). Contribución de las emisiones de gas metano producidas por el ganado bovino al cambio climático (América Latina). <http://www.ambiente-sustentabilidad.org/index.php/revista/article/view/215>

Tilahun, G., Asmare, B., Mekuriaw, Y., Tilahun, G., Asmare, B., and Mekuriaw, Y. (2017). Effects of harvesting age and spacing on plant characteristics, chemical composition and yield of desho grass (*Pennisetum pedicellatum Trin.*) in the highlands of Ethiopia. *Tropical Grasslands-Forrajés Tropicales*, 5(2), 77–84. DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(5\)77-84](https://doi.org/10.17138/tgft(5)77-84)

Tropical Forages. (2023). *Cynodon* spp. Recuperado de https://www.tropicalforages.info/text/entities/cynodon_spp.htm

Vargas-Leitón, B., Solís-Guzmán, O., Sáenz-Segura, F., y León-Hidalgo, H. (2013). Caracterización y clasificación de hatos lecheros en Costa Rica mediante análisis multivariado. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 257–275.

Villalobos, L. (2012). Fenología, producción y valor nutritivo del pasto alpiste (*Phalaris arundinacea*) en la zona alta lechera de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 36:25-37. DOI: 10.15517/rac.v36i1.9962. IN: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v36n01_025.pdf.

Villalobos, Luis., y Arce, Jose. (2014). Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. valor nutricional. *Agronomía Costarricense*, 38(1): 133-145. DOI: 10.15517/RAC.V38I1.15162. IN: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v38n01_133.pdf.

Villalobos, L., Arce, J., y WingChing, R. (2015). Producción de biomasa y costos de producción de pastos estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), Kikuyo (*Kikuyuocloa clandestina*) y ryegrass perenne (*Lolium perenne*) en lecherías de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 37(2), 91–103.

Villanueva-Najarro, C. (2022). Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas productoras de leche de Costa Rica, (Tesis doctoral), Universidad Santiago de Compostela, España. <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/28338>.

Villarreal, M., Cochran, R. C., Rojas-Bourrillón, A., Murillo, O., Muñoz, H., and Poore, M. (2006). Effect of supplementation with pelleted citrus pulp on digestibility and intake in beef cattle fed a tropical grass-based diet (*Cynodon nlemfuensis*). *Animal Feed Science and Technology*, 125(1–2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.05.020>

Wassie, W. A., Tsegay, B. A., Wolde, A. T., and Limeneh, B. A. (2018). Evaluation of morphological characteristics, yield and nutritive value of *Brachiaria* grass ecotypes in northwestern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 7(1), 89. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0239-4>.

Walling, E., and Vaneekhaute C. (2020). Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. *Journal of Environmental Management* 276:111211. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111211.

García, C., Sánchez, P., Lopez, N., Domínguez, I., Ayala, M., Torres, N., and Valenzuela, J. L. (2022). In vitro fermentative characteristics and chemical quality of Tanzania grass with organic and chemical fertilization. *Agro Productividad*. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i7.2314>.

