

Determinación de la eficiencia en el uso del nitrógeno (UEN) por principales pasturas forrajeras de trópico bajo en respuesta a diferentes fertilizantes nitrogenados

Informe final de resultados

Investigadores: Mike Bastidas, Daniel Villegas, Alejandro Ruden, Johanna Mazabel, Karen Enciso, Jhon Freddy Gutierrez, Jacobo Arango.

**Alianza Bioersity - CIAT
Forrajes tropicales
Palmira – 2020**

Tabla de contenido

1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCION.....	5
3. METODOLOGÍA	6
3.1 Lugar de estudio.....	6
3.2 Análisis físico y químico de suelo	7
3.2.1 Análisis químico de suelo	7
3.2.2 Análisis físico	8
3.3 Preparación de suelo	12
3.4 Mecanización y aplicación de enmiendas.....	12
3.5 Trazado y siembra	12
3.6 Material experimental	13
3.7 Objetivo específico 1. Caracterizar la eficiencia en el uso del nitrógeno en <i>Urochloa</i> , <i>Megathyrus</i> y <i>Cynodon</i> en respuesta a diferentes fertilizantes nitrogenados.....	14
3.7.1 Diseño estadístico	14
3.7.2 Variables de respuesta.....	17
3.8 Objetivo específico 2. Identificar las fuentes y dosis de N óptimas para lograr un alto UEN en forrajes del trópico bajo.....	21
3.8.1 Diseño estadístico	21
3.8.2. Variables de respuesta.....	22
3.9 Objetivo específico 3. Evaluar el flujo del N (planta-suelo-ambiente) en los genotipos contrastantes con alto y bajo UEN.....	23
3.9.1 Cuantificación del N total en la biomasa de cada genotipo	23
3.9.2 <i>Cuantificación de las emisiones de óxido nítrico en el suelo usando el método de cámaras estáticas</i>	24
3.10 Objetivo específico 4. Determinar el punto óptimo económico en la aplicación de N, el cual genere la mayor rentabilidad para el productor.	26
3.10.1 Fuente de la información	26
3.10.2 Características de las variedades forrajeras según el tratamiento nitrogenado	26
3.10.3 Flujo de caja	27
3.10.4 Flujo de caja con análisis de sensibilidad.....	29
3.11 Procesamiento de datos	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31

4.1 Objetivo específico 1. Caracterizar la eficiencia en el uso del nitrógeno en <i>Urochloa</i> , <i>Megathyrus</i> y <i>Cynodon</i> en respuesta a diferentes fertilizantes nitrogenados	31
4.1.1 Variables climáticas durante el desarrollo del primer objetivo	31
4.1.2 Resultados de comportamiento agronómico y productivo	31
4.1.3 Calidad nutricional	34
4.1.4 Absorción de nitrógeno	39
4.1.5 Uso eficiente del nitrógeno.....	40
4.2 Objetivo específico 2. Identificar las fuentes y dosis de N óptimas para lograr un alto UEN en forrajes del trópico bajo.....	42
4.2.1 Variables climáticas durante la evaluación de diferentes dosis y flujo de nitrógeno planta-suelo-ambiente	43
4.2.2 Resultados de comportamiento agronómico y productivo	44
4.2.3 Calidad nutricional	47
4.2.4 Absorción de nitrógeno	50
4.2.5 Uso eficiente del nitrógeno.....	52
4.3 Objetivo específico 3. Evaluar el flujo del nitrógeno (planta-suelo-ambiente) en los genotipos forrajeros que sean contrastantes con alto y bajo UEN	54
4.3.1 Comportamiento climático durante el tiempo de evaluación.....	54
4.3.2 Flujos diarios de N ₂ O.....	54
4.3.3 Flujos acumulados.....	56
4.3.4 Relación entre productividad, UEN y emisiones de N ₂ O	59
4.3.5 Intensidad de emisiones	60
4.4 Objetivo específico 4. Determinar el punto óptimo económico en la aplicación de N, el cual genere la mayor rentabilidad para el productor.....	62
4.4.1 Costos e ingresos	62
4.4.2 Indicadores de rentabilidad y análisis de sensibilidad	66
5. CONCLUSIONES.....	70
6. BIBLIOGRAFÍA.....	72

1. RESUMEN

Esta investigación se originó a partir del desconocimiento en la eficiencia en el uso de nitrógeno (UEN) de los principales genotipos forrajeros de clima cálido. En la primera fase el objetivo fue caracterizar el UEN de seis gramíneas: *Urochloa humidicola*, *U.* híbrido cv cobra, *U.* híbrido cv cayman, *U. decumbens*, *Megathyrsus maximus* cv mombasa y *Cynodon nlemfuensis* – pasto estrella con respecto a diferentes fertilizantes nitrogenados comerciales de YARA (Urea, Nitromag, Amidas). En las épocas de máxima y mínima precipitación se realizaron evaluaciones agronómicas, productivas, de calidad nutricional en el forraje y se realizaron muestreos de suelo para determinar el flujo del N suelo- planta. Se evidenció que las fuentes nitrogenadas como Nitromag y Urea permiten obtener una mayor productividad de forraje y N por hectárea en los sistemas ganaderos de clima cálido, permitiendo aumentar hasta en 43% estos parámetros. Nitromag indujo a un mayor UEN en pasto Estrella y Cayman (91.7 y 87.9 % respectivamente) y Urea en Mombasa con 89.9 %.; Estrella con aplicación de Amidas presentó 15.3 % PC, seguida de Estrella - Nitromag (14.4% PC) y Mombasa – Amidas (12.9 % PC).

Como la disponibilidad de N debe idealmente ajustarse a la necesidad de la dinámica temporal de los forrajes en general, cada gramínea fue evaluada a diferentes dosis de N, para las condiciones del ensayo, la dosis que permite obtener el mayor UEN es 20 kg de N ha⁻¹, con un 93% de eficiencia. El pasto Estrella es la especie que generó mayores emisiones, seguido de Cayman, y por último Mombasa. Los tratamientos fertilizados que presentaron menor intensidad de emisiones fueron Cayman a 20 kg N ha⁻¹, Estrella a 20 kg N ha⁻¹ y Mombasa a 30 kg N ha⁻¹. Basados en los resultados obtenidos, la aplicación de N mejora la calidad nutricional de los forrajes, aumenta el contenido de proteína cruda, disminuye la fibra y como consecuencia, mejora la digestibilidad. No obstante, las emisiones de N₂O incrementaron proporcionalmente con la dosis de N aplicado por fertilización. Los principales hallazgos económicos indican que el uso de fertilizantes nitrogenados mejora significativamente el desempeño productivo de las especies forrajeras. El análisis de costos e indicadores financieros revelan una alta rentabilidad para Mombasa, particularmente cuando se encuentra bajo el tratamiento con Urea. Lo anterior lleva a concluir que la mejor alternativa estudiada, tanto por su desempeño en UEN como por sus indicadores de rentabilidad, es Mombasa con un tratamiento de fertilización con Urea de 30 kg N ha⁻¹.

2. INTRODUCCION

Las pasturas son la principal fuente de alimentación del ganado bovino en Colombia (Guerrero & Londoño, 2014); y cubren cerca de 34 millones de hectáreas del territorio nacional (DANE, 2017; UPRA-SIPRA, s.f.). Sin embargo, la producción de biomasa y calidad nutricional es baja en gran parte del país (FEDEGAN, 2013), más aún si se consideran aspectos como el impacto cada vez más agudo del régimen bimodal de lluvias que ocasiona periodos de sequía al inicio de cada año y épocas lluviosas en el segundo y cuarto trimestre, limitadas o nulas prácticas de manejo y mantenimiento de pastos, un alto porcentaje de tierras ganaderas (77,3%) con algún grado de erosión en sus suelos (IDEAM & U.D.C.A., 2015), entre otros. Lo anterior profundiza las problemáticas de deficiencia en la alimentación animal y, a su vez, se refleja en los débiles resultados de indicadores de productividad por hectárea, sostenibilidad y rentabilidad del negocio.

El potencial incremento en la demanda de alimentos, vía crecimiento poblacional esperado para las próximas décadas, y los desafíos que se avecinan al sector ganadero en términos de adaptación y mitigación al cambio climático (Tapasco et al., 2015, 2019); señalan que los esfuerzos deben concentrarse en lograr que los sistemas productivos ganaderos sean más eficientes en términos del uso de recursos y emisiones de gases de efecto invernadero por kilogramo producido y unidad de área empleada. El uso de pasturas mejoradas y la fertilización con nitrógeno son identificadas como alternativas para alcanzar mayor eficiencia e intensificación sostenible en la producción de carne, al incrementar la producción de biomasa, la calidad nutricional, las capacidades de carga, ganancias diarias de peso y la producción animal por hectárea (de Oliveira et al., 2020; Delevatti, et al., 2019; Pezo & García, 2018; Galindo, et al., 2017; Canto, et al., 2009; Brâncio, et al., 2003).

Este trabajo de investigación se orientó a la búsqueda de especies que hagan un uso eficiente del N, fuentes y dosis óptimas de este nutriente que favorezcan el aumento de la producción, calidad del alimento para los animales, genere la menor pérdida de N hacia el suelo, agua y atmósfera. Se ha observado que los requerimientos de N pueden llegar a ser muy diferentes entre las pasturas, incluyendo la forma en cómo se usa (partición) y los tejidos donde localizan, dependiendo si la planta se desarrolla en ambientes de alta o baja oferta de N (Garcez & Monteiro, 2016). Lograr un mayor aprovechamiento de los nutrientes disponibles para los cultivos es uno de los retos a los que se enfrenta la ganadería contemporánea, buscando un equilibrio entre la producción, la economía y el medio ambiente. De esta manera en este trabajo se generan estrategias que ayuden a la transición de la ganadería tradicional a una ecoeficiente, con la menor huella sobre los recursos naturales y además mejorar los ingresos y calidad de vida de los productores.

Esta investigación se enmarca en el convenio entre la Alianza Bioersity International-CIAT y YARA International ASA para la identificación de cultivares con mejores niveles

En la unidad productiva se seleccionó un lote dentro de las opciones disponibles por el productor, teniendo en cuenta el área, la topografía y drenaje del terreno necesarios para el experimento.

3.2 Análisis físico y químico de suelo

El análisis de suelo es la opción más adecuada para obtener una información detallada de su estado y características fisicoquímicas. Con esta información se puede realizar un diagnóstico de la situación actual y hacer una aplicación eficiente de correctivos, de manera que, pueda garantizar las condiciones adecuadas para el desarrollo de las especies. Así pues, se realizó el muestreo de suelo en el lote a establecer, teniendo en cuenta el Manual de Protocolos Nutrición y Fisiología de Plantas del CIAT (Borrero Tamayo et al., 2017).

3.2.1 Análisis químico de suelo

Se tomaron muestras de suelo de distintos puntos del terreno, realizando un recorrido en zigzag, tomando 10 submuestras de suelo a una profundidad entre 0 y 20 cm, estas se mezclaron homogéneamente y se empacaron en bolsas de 1 kg rotuladas para el análisis químico completo en el laboratorio de servicios analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

En la tabla 1 se relacionan los resultados obtenidos del análisis químico de suelo. Se evidencia que el suelo de este lote, se cataloga como muy ácido siendo menor a 5.5 (pH 4.93) (Báscones, 2014). Con 0.98 cmol/kg de aluminio intercambiable y bajos contenidos de bases (Ca y Mg) y niveles medios de K.

Tabla 1

Propiedades químicas del suelo previo al establecimiento de pasturas en el lote ubicado en la hacienda La Campiña, Santander de Quilichao

Parámetro	Valor
pH (Un)	4.93
C Oxid (g/kg)	32.6
MO (g/kg)	74.6
P-Bray II (mg/kg)	7.82
Ca (cmol/kg)	2.93
Mg (cmol/kg)	1.4
K (cmol/kg)	0.52
Al (cmol/kg)	0.98
Na (cmol/kg)	NA
CICe (cmol/kg)	5.83
Fe (cmol/kg)	21.9
Mn (cmol/kg)	48.3
Cu (cmol/kg)	1.39
Zn (mg/kg)	3.6
B (mg/kg)	0.309
S (mg/kg)	55.4

NOTA: **pH (Un):** pH Agua (1:1), **C Oxid (g/kg):** Carbono Oxidable W-Black, **MO (g/kg):** Materia Orgánica Walkley-Black Espectrometría, **P-BrayII (mg/kg):** Fósforo disponible –Espectrometría, **Ca (cmol/kg):** Calcio Intercambiable, **Mg (cmol/kg):** Magnesio Intercambiable, **K (cmol/kg):** Potasio Intercambiable, **Al (cmol/kg):** Aluminio Intercambiable (KCl 1M) Vol, **Na (cmol/kg):** Sodio Intercambiable, **CICe (cmol/kg):** Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva, **CIC (cmol/kg):** Capacidad Int. Cationico (Amonio Acetato) Volumet, **Fe (mg/kg):** Hierro Extract. Doble Acido, **Mn (mg/kg):** Manganeseo Extract. doble Acido, **Cu (mg/kg):** Cobre Extract. Doble Acido, **Zn (mg/kg):** Zinc Extract. en Doble Acido, **B (mg/kg):** Boro en Agua Caliente (Espectromet. Azometina), **S (mg/kg):** Azufre Extrac.(Fosfato Ca) Turbidimetría.

3.2.2 Análisis físico

En el lote seleccionado se perforaron calicatas de 1m³ y se tomaron muestras de suelo no disturbadas, a cinco profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-100 cm) utilizando anillos de 2.5 cm x 5 cm y 5 cm x 5 cm (diámetro x alto) (Figura 2). Para la determinación de pruebas hidrofísicas, incluida conductividad hidráulica, curvas de retención de humedad (distribución de poros; porosidad total, densidad aparente, densidad real,

humedad volumétrica y gravimétrica a punto de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente) (Tabla 2). Según el análisis físico en el lugar de estudio se cuenta con un suelo de textura franco arcilloso.

Figura 2

Muestreo de suelo en calicatas de 1 metro de profundidad previo al establecimiento de pasturas



Tabla 2

Parámetros físicos del suelo previo al establecimiento de pasturas en el lote ubicado en la hacienda La Campiña, Santander de Quilichao

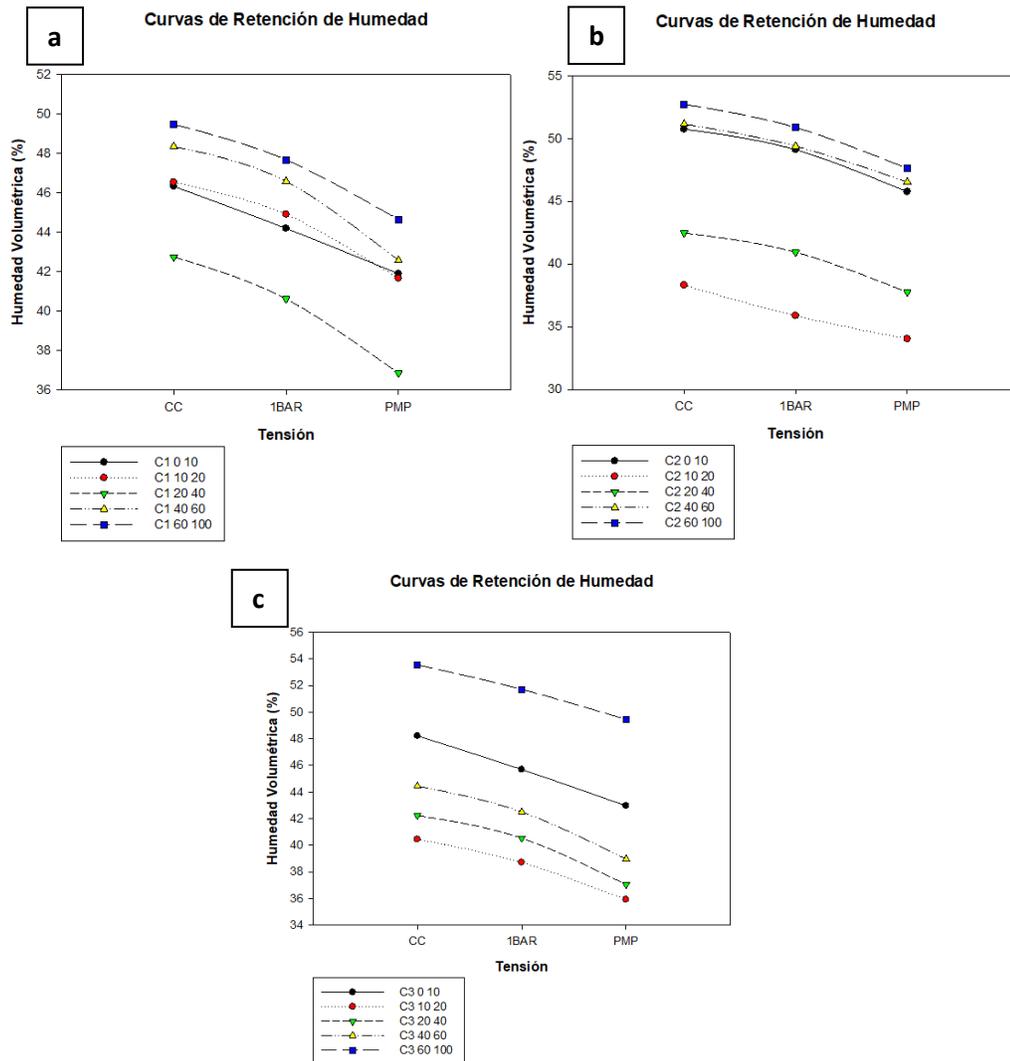
Profundidad (cm)	Densidad aparente	Densidad real	Humedad de campo	Humedad gravimétrica				Humedad volumétrica				Porosidad			Porosidad total
				Saturación	Capacidad de campo (mesa de tensión 75 cm)	1 Bar	PMP (15 Bares)	Saturación	Capacidad de campo (mesa de tensión 75 cm)	1 Bar	PMP (15 Bares)	Macroporos	Mesoporos	Microporos	
	g/cc	g/cc	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0-10	1.00	2.46	31.97	67.64	48.80	46.64	43.86	66.53	48.44	46.33	43.55	10.95	4.89	43.55	59.39
10-20	0.97	2.54	31.20	66.89	43.01	40.98	38.31	64.49	41.77	39.83	37.21	19.87	4.56	37.21	61.64
20-40	1.09	2.59	32.10	55.48	39.02	37.37	34.18	60.39	42.49	40.70	37.23	15.52	5.26	37.23	58.00
40-60	1.17	2.63	37.06	49.80	41.22	39.64	36.64	57.77	47.99	46.16	42.70	7.65	5.29	42.70	55.64
60-100	1.09	2.64	45.07	55.50	47.80	46.12	43.49	60.25	51.92	50.09	47.24	6.94	4.67	47.24	58.85

Textura: Franco arcilloso (Bouyoucos y pipeta de Robinson); Capacidad de campo (Mesa de tensión); Punto de marchitez permanente (Ollas de Presión); Porosidad total - Macro, meso y microporos (Yoder); Densidad real (Picnómetro); Densidad aparente (cilindro metálico).

Teniendo en cuenta los parámetros descritos en la tabla 2, a continuación, en la figura 3, se muestran las curvas de retención de humedad obtenida para cada una de las tres calicatas, en las cinco profundidades.

Figura 3

Curvas de retención de humedad. a. Calicata 1; b. Calicata 2; c. Calicata 3.



Capacidad de campo; BAR: Unidad de presión; PMP: Punto de marchitez permanente.
Profundidades: 0-10cm; 10-20cm; 20-40cm; 40-60cm; 60-100cm.

Se aprecia que para la profundidad de 60 a 100 cm y de 40 a 60 cm se presentó la mayor retención de humedad y la profundidad que menor humedad presentó fue de 20 a 40 cm de profundidad. Basado en los resultados en las tres calicatas, se puede evidenciar una menor retención de humedad en la superficie de suelo, esto relacionado con la clase de poros más representativos y con el drenaje e infiltración.

3.3 Preparación de suelo

La preparación de suelo es una labor fundamental para el buen desarrollo de los cultivos, puesto que ahí es donde la planta realiza el anclaje de sus raíces y encuentra los nutrientes necesarios para su desarrollo y funcionamiento. Se realizó el control químico de malezas mediante la aplicación de herbicida (glifosato), con el fin de mejorar las condiciones para la mecanización y eliminar posibles competencias a las plántulas del ensayo (Figura 4).

Figura 4

Efecto del glifosato para eliminar la cobertura vegetal presente en el lote de estudio



3.4 Mecanización y aplicación de enmiendas

La preparación del terreno se realizó mediante un pase de arado, uno de subsolador, y se esperó a que los rebrotes de la arvenses y vegetación anterior rebrotaran, para luego aplicar el herbicida. Teniendo en cuenta los resultados de análisis de suelo se aplicaron 600 kg ha^{-1} de calfos para subir el PH y aumentar la disponibilidad de fósforo en establecimiento, los cuales se incorporaron con dos pases de rastrillo.

3.5 Trazado y siembra

Teniendo en cuenta la distribución espacial del ensayo de acuerdo al diseño del experimento y el área del lote, se realizó el trazado del ensayo mediante la técnica de ángulo recto, en las esquinas del ensayo ($3\text{m} \times 4\text{m} \times 5\text{m}$), lo que garantizó la uniformidad y geometría de las parcelas (Figura 5).

Figura 5

Trazado de ensayo en el lote de estudio previo a la siembra de pasturas en el lote ubicado en la hacienda La Campiña, Santander de Quilichao



Teniendo en cuenta las características climáticas de la zona y el registro histórico de lluvias en la zona, se realizó la siembra de los forrajes previendo óptimas condiciones para su establecimiento (Figura 6).

Figura 6

Establecimiento de las pasturas



3.6 Material experimental

El material de siembra fue aportado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) Palmira, los materiales *Urochloa humidicola*, *U. decumbens*, *U. híbrido cv Cayman*, *U. híbrido cv Cobra* y *Megathyrsus maximus cv Mombasa* se

sembraron mediante semilla sexual; para la siembra de *Cynodon nlemfuensis* se utilizaron estolones.

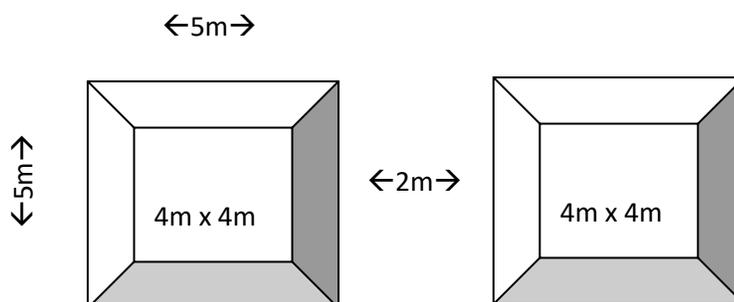
3.7 Objetivo específico 1. Caracterizar la eficiencia en el uso del nitrógeno en *Urochloa*, *Megathyrsus* y *Cynodon* en respuesta a diferentes fertilizantes nitrogenados.

En este objetivo se caracterizó el UEN, comportamiento agronómico, productivo y de calidad nutricional de las pasturas establecidas frente a una dosis estándar empleada en los sistemas ganaderos en clima cálido (25 kg ha^{-1}), la cual fue aplicada tres días posterior al corte del pasto (Peters, Franco, Schmidt, & Hincapié, 2011).

La aplicación de los fertilizantes nitrogenados se realizó dentro de cada parcela de $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ en un área central de $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ alejado a 1 metro de los bordes para evitar el movimiento lateral de N entre las parcelas (Figura 7).

Figura 7

Esquema para la aplicación de los tratamientos de nitrógeno en parcelas de 25 m^2 dejando un borde de 1 m, que no será tenido en cuenta para el muestreo



3.7.1 Diseño estadístico

El ensayo de campo se estableció bajo un diseño experimental de parcelas divididas 4×6 en tres bloques (Emden, 2008 ; Gutiérrez y De la Vara, 2012). Dicho diseño consta de dos factores:

Factor A (Fuente de nitrógeno) que corresponde a las parcelas grandes tiene 4 niveles, que se denotan como A1 (Urea), A2 (Nitromag), A3 (Amidas) y A4 (Nitrógeno nativo del suelo) (Tabla 3).

Tabla 3

Fuentes de nitrógeno evaluadas

Código	Fuente	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NH ₂	CaO	Mg	S	SO ₃	N. T.
A1	Urea	-	-	46%	-	-	-	-	46%
A2	Nitromag	10,3%	10,7%	-	11,0%	7,5%	-	-	21%
A3	Amidas	0	5%	35%	-	-	5,6%	2,5%	40%
A4	N nativo del suelo	25.03 mg N-NO ₃ ⁻ kg suelo ⁻¹ y 19.04 mg N-NH ₄ ⁺ kg suelo ⁻¹							

Nota: NO₃⁻: Nitrato, NH₄⁺: Amonio, NH₂: grupo amino (grupo funcional derivado del amoníaco o alguno de sus derivados), CaO: Oxido de calcio, Mg: magnesio, S: azufre, SO₃: Óxido de azufre, N. T.: Nitrógeno total.

Factor B (Especie de la gramínea) correspondiente a las subparcelas tiene 6 niveles, pueden denotarse B1 (*Urochloa humidicola*), B2 (*Urochloa* híbrido cv Cobra), B3 (*Urochloa* híbrido cv Cayman), B4 (*Megathyrsus maximus* cv. Mombasa), B5 (*Cynodon nlemfuensis* – Estrella africana) y B6 (*Urochloa decumbens*) (Tabla 4).

Tabla 4

Especies forrajeras utilizadas en el ensayo

Código	Especie	Cv / Nombre común	Accesión
B1	<i>U. humidicola</i>	cv. Tully / dulce	CIAT 679
B2	<i>U. hibrido</i>	cv. Cobra	BR02/1794
B3	<i>U. hibrido</i>	cv. Cayman	BR02/1752
B4	<i>Megathyrsus maximus</i>	cv. Mombasa/guinea	CIAT 6962
B5	<i>C. nlemfluensis</i>	Estrella morada	
B6	<i>U. decumbens</i>	cv. Basilisk/amargo	CIAT 606

Los tratamientos se formaron obteniendo todas las combinaciones posibles entre los niveles de los factores y se describen en la tabla 5.

Tabla 5

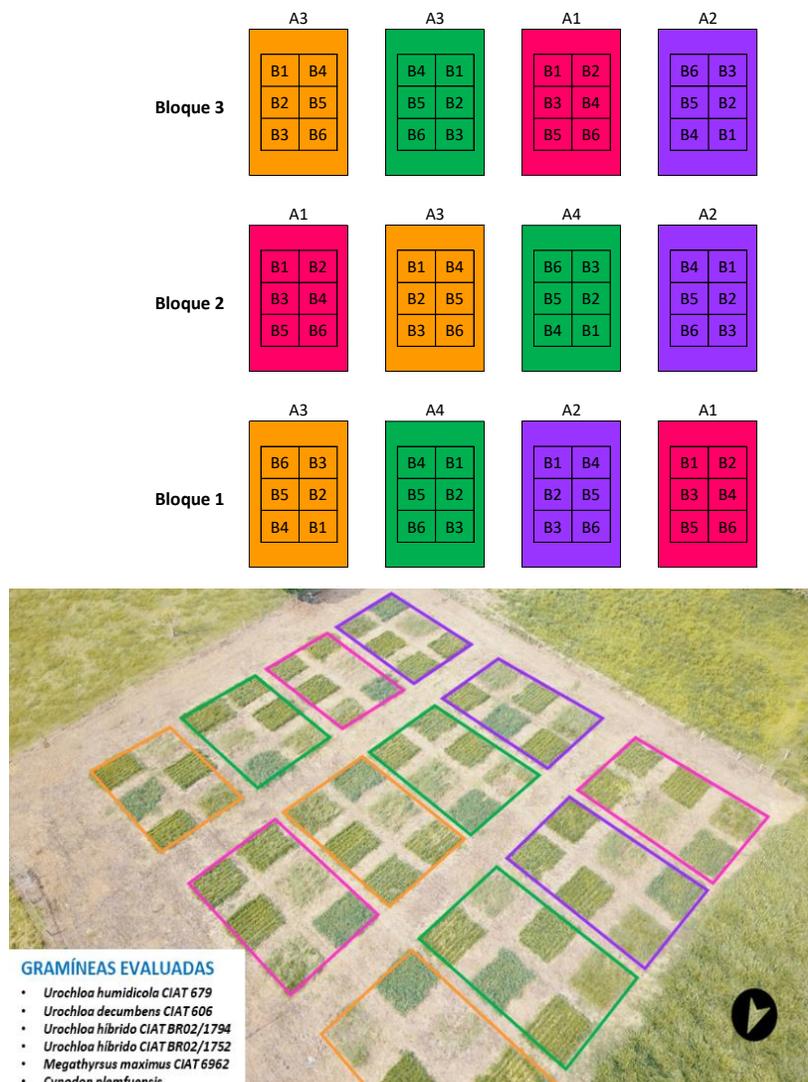
Tratamientos obtenidos al combinar los factores Fuente de N y especies forrajeras

Fuente Nitrogenada	Especie	Tratamientos
Urea	<i>U. humidicola</i>	A1B1
Urea	<i>U. hibrido cv Cobra</i>	A1B2
Urea	<i>U. hibrido cv Cayman</i>	A1B3
Urea	<i>Megathyrsus maximus</i>	A1B4
Urea	<i>C. nlemfluensis</i>	A1B5
Urea	<i>U. decumbens</i>	A1B6
Nitromag	<i>U. humidicola</i>	A2B1
Nitromag	<i>U. hibrido cv Cobra</i>	A2B2
Nitromag	<i>U. hibrido cv Cayman</i>	A2B3
Nitromag	<i>Megathyrsus maximus</i>	A2B4
Nitromag	<i>C. nlemfluensis</i>	A2B5
Nitromag	<i>U. decumbens</i>	A2B6
Amidas	<i>U. humidicola</i>	A3B1
Amidas	<i>U. hibrido cv Cobra</i>	A3B2
Amidas	<i>U. hibrido cv Cayman</i>	A3B3
Amidas	<i>Megathyrsus maximus</i>	A3B4
Amidas	<i>C. nlemfluensis</i>	A3B5
Amidas	<i>U. decumbens</i>	A3B6
N nativo del suelo	<i>U. humidicola</i>	A4B1
N nativo del suelo	<i>U. hibrido cv Cobra</i>	A4B2
N nativo del suelo	<i>U. hibrido cv Cayman</i>	A4B3
N nativo del suelo	<i>Megathyrsus maximus</i>	A4B4
N nativo del suelo	<i>C. nlemfluensis</i>	A4B5
N nativo del suelo	<i>U. decumbens</i>	A4B6

El resultado fueron 24 tratamientos y se implementaron en los tres bloques, para un total de 72 parcelas de 25m² cada una, con una separación de dos metros entre sub-parcelas y cinco entre los bloques (Figura 8).

Figura 8

Distribución espacial de ensayo de investigación con la localización de los diferentes genotipos (gramíneas) en la respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



3.7.2 Variables de respuesta

Las variables a evaluar fueron las siguientes:

3.7.2.1 Variables agronómicas y de producción. Después de 120 días de establecidas las pasturas se realizó un corte de estandarización (Figura 9), una vez recuperados los materiales, se inició con los cortes y evaluaciones según el manual para la evaluación agronómica de la Red Internacional de Evaluación de Pasturas Tropicales (RIEPT) (J. M. Toledo (1982)). Se realizaron dos evaluaciones en época de lluvias y dos en época seca.

Figura 9
Estandarización de ensayo para inicio de fertilización y evaluaciones



Altura de plantas. Se midió en centímetros desde el suelo hasta la última hoja formada en el punto más alto de la planta, sin estirla y sin contar las inflorescencias (Figura 10).

Figura 10
Medición de la variable altura en los genotipos forrajeros



Producción de forraje verde. Con el objetivo de identificar la cantidad de biomasa que genera cada uno de los materiales evaluados se realizaron aforos en época seca y en época de lluvias a 20 cm del suelo o según la morfología de la especie. Se tomó como forraje disponible el total de las hojas, peciolo y tallos con diámetro inferior a 5mm (Figura 11).

Figura 11

Aforo de producción de forraje con marco de 50 x 50 centímetros



Producción de materia seca. De la materia verde total (MVT), se pesaron las submuestras de cada bloque experimental (Figura 12); tomando aproximadamente 200g, las cuales se llevaron a un proceso de secado en horno con temperatura de 60°C y ventilación controlada durante 72 horas y con el peso final estas se estimó la producción de materia seca con la siguiente fórmula:

$$MS * m^2 = \frac{PF * ps}{pf}$$

En donde:

PF = Peso fresco de la muestra.

pf = Peso fresco de la submuestra

ps = Peso seco de la submuestra

Figura 12

Secado de muestras en horno para determinación de materia seca



3.7.2.2 Calidad nutricional. Se recolectaron muestras de 200 gramos de cada tratamiento y se procesaron en el laboratorio de nutrición animal del programa de Forrajes Tropicales del CIAT, donde se determinó el contenido de proteína cruda (PC), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente acida (FDA) y digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) (Tabla 6).

Tabla 6

Parámetros nutricionales a evaluar en el forraje

Prueba de laboratorio	Metodología	Referencia
PC	Kjeldahl	Latimer George, 2019
DIVMS	ANKO Technology, Fairport, NY-USA	ANKOM Technology
FDN	Equipo ANKOM	Van Soest <i>et al.</i> , 1991
FDA	Equipo ANKOM	Van Soest <i>et al.</i> , 1991

NOTA: PC: Proteína Cruda, **DIVMS:** Digestibilidad invitro de la materia seca, **FDN:** Fibra detergente neutro, **FDA:** Fibra detergente acida, **FA:** Factores Anti-nutricionales.

3.7.2.3 Absorción de nitrógeno. Es el producto entre la productividad de la masa seca (kg de materia seca ha⁻¹) y la concentración de nitrógeno en los tejidos vegetales (Baptistella, de Andrade, Favarin, & Mazzafera, 2020).

3.7.2.4. Uso eficiente del N (N aplicado / N recuperado por la pastura). Para evaluar el efecto del N aplicado en los tratamientos, se procedió a calcular la eficiencia en el uso del nitrógeno (IPNI, 2012)(Torres, Viramontes, Rangel, Hernández, & Guadalupe, 2016). Siendo la cantidad de N presente en el forraje (cosechado) respecto la cantidad de fertilizante aplicado (kg N):

$$UEN = \frac{kg\ NTi - kg\ NT0}{DN}$$

Donde: UEN= uso eficiente de nitrógeno (%), kg NTi= Kg de nitrógeno en el tratamiento fertilizado (kg ha⁻¹), kg NT0= Kg de nitrógeno cosechado en el tratamiento sin nitrógeno (kg ha⁻¹) y DN = Dosis de nitrógeno del tratamiento fertilizado (kg ha⁻¹).

3.8 Objetivo específico 2. Identificar las fuentes y dosis de N óptimas para lograr un alto UEN en forrajes del trópico bajo

Para este objetivo se tuvieron en cuenta las seis especies forrajeras con la fuente que contribuyo al mayor UEN en la primera fase, y se evaluaron frente a 4 dosis distintas (0, 10, 20 y 30 kg N ha⁻¹).

3.8.1 Diseño estadístico

Se tuvo en cuenta el mismo ensayo establecido para el primer objetivo, siendo un diseño experimental de parcelas divididas 4x6 en tres bloques (Emden, 2008 ; Gutiérrez & De la Vara, 2012). Los factores evaluados fueron:

Factor C (Dosis de fertilización) que corresponde a las parcelas grandes con 4 niveles, que se denotaron como C1 (0 kg N ha⁻¹), C2 (10 kg N ha⁻¹), C3 (20 kg N ha⁻¹) y C4 (30 kg N ha⁻¹).

El factor D ahora conformado por los tratamientos con mayor UEN resultado del primer objetivo, se denotaron así:

D1 (*Urochloa humidicola* - Amidas), D2 (*Urochloa* híbrido cv Cobra – Urea), D3 (*Urochloa* híbrido cv Cayman - Nitromag), D4 (*Megathyrus maximus* cv. Mombasa – Urea), D5 (*Cynodon nlemfuensis* - Nitromag) y D6 (*Urochloa decumbens* – Urea). La combinación de los factores dio origen a 24 tratamientos como se indica en la tabla 7.

Tabla 7

Tratamientos para determinar la dosis optima en la aplicación de nitrógeno

Dosis	Especie - Fuente	Tratamiento
0 kg N ha ⁻¹	<i>U. humidicola</i> - Amidas	C1D1
0 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cobra - Urea	C1D2
0 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cayman - Nitromag	C1D3
0 kg N ha ⁻¹	<i>Megathyrsus maximus</i> - Urea	C1D4
0 kg N ha ⁻¹	<i>C. nlemfluensis</i> - Nitromag	C1D5
0 kg N ha ⁻¹	<i>U. decumbens</i> - Urea	C1D6
10 kg N ha ⁻¹	<i>U. humidicola</i> - Amidas	C2D1
10 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cobra - Urea	C2D2
10 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cayman - Nitromag	C2D3
10 kg N ha ⁻¹	<i>Megathyrsus maximus</i> - Urea	C2D4
10 kg N ha ⁻¹	<i>C. nlemfluensis</i> - Nitromag	C2D5
10 kg N ha ⁻¹	<i>U. decumbens</i> - Urea	C2D6
20 kg N ha ⁻¹	<i>U. humidicola</i> - Amidas	C3D1
20 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cobra - Urea	C3D2
20 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cayman - Nitromag	C3D3
20 kg N ha ⁻¹	<i>Megathyrsus maximus</i> - Urea	C3D4
20 kg N ha ⁻¹	<i>C. nlemfluensis</i> - Nitromag	C3D5
20 kg N ha ⁻¹	<i>U. decumbens</i> - Urea	C3D6
30 kg N ha ⁻¹	<i>U. humidicola</i> - Amidas	C4D1
30 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cobra - Urea	C4D2
30 kg N ha ⁻¹	<i>U.</i> hibrido cv Cayman - Nitromag	C4D3
30 kg N ha ⁻¹	<i>Megathyrsus maximus</i> - Urea	C4D4
30 kg N ha ⁻¹	<i>C. nlemfluensis</i> - Nitromag	C4D5
30 kg N ha ⁻¹	<i>U. decumbens</i> - Urea	C4D6

3.8.2. Variables de respuesta.

- Variable agronómica altura.

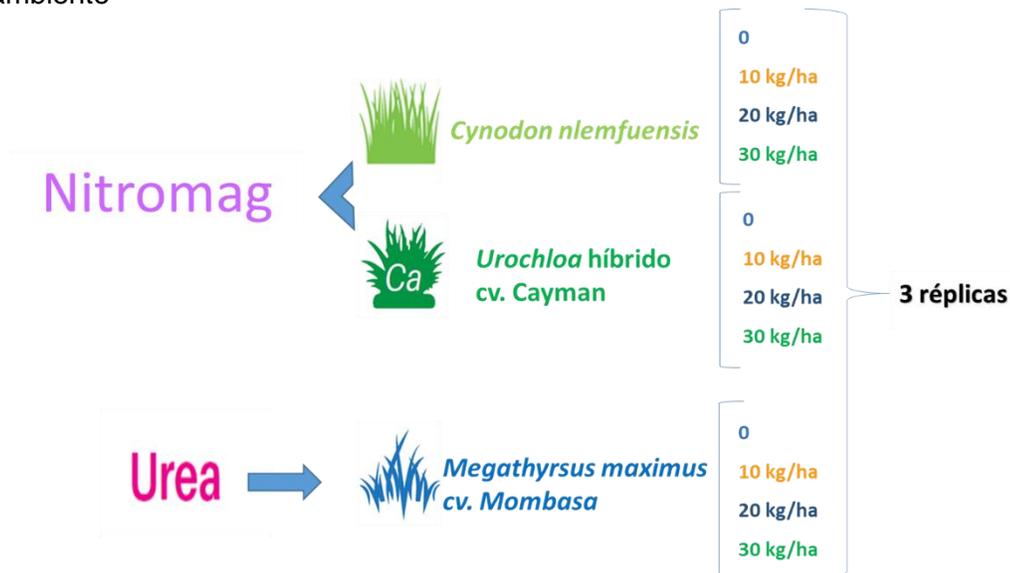
- Producción de forraje verde y materia seca.
- Se determinó los parámetros de calidad nutricional de los forrajes (PC y DIVMS).
- Absorción de N.
- Uso eficiente de nitrógeno.

3.9 Objetivo específico 3. Evaluar el flujo del N (planta-suelo-ambiente) en los genotipos contrastantes con alto y bajo UEN.

Se realizó el monitoreo del flujo del N en planta-suelo-ambiente en los tres tratamientos con mayor UEN resultado del primer objetivo (Figura 13).

Figura 13

Representación esquemática de los tratamientos para evaluación del flujo de N planta-suelo-ambiente



Para el cumplimiento de este objetivo se cuantificó:

3.9.1 Cuantificación del N total en la biomasa de cada genotipo

Mediante el contenido de proteína en la biomasa y la productividad de materia seca por hectárea, se cuantificó la cantidad de N presente en la biomasa.

3.9.2 Cuantificación de las emisiones de óxido nitroso en el suelo usando el método de cámaras estáticas

En los tratamientos presentados en la figura 13, simultaneo al desarrollo del OE2 y OE3, se realizó la medición de emisión de N_2O . El muestreo se realizó en 9 puntos en el tiempo: Basal (antes de la aplicación de N), y luego durante 8 días posterior a la fertilización, la cual se realizó 3 días después al corte de estandarización. El flujo de gas se midió utilizando espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) mediante un analizador de gases portable FTIR Gasmeter DX4040, siguiendo el método de cámara estática (Teutscheroova et al., 2019); se calcularon los flujos acumulados y se evaluaron las diferencias entre materiales como un efecto de la capacidad de UEN en la reducción de emisiones del suelo (Villegas et al., 2020; Brummell, Farrell & Siciliano, 2012; Stewart et al., 2012) (Figura 14).

En todas las parcelas se instalaron cámaras de PVC con un diámetro de 26 cm, después de sellar las cámaras con una banda de goma, la medición se monitoreó cada 20 segundos durante 8 minutos para cada cámara. El flujo acumulativo se calculó para cada tratamiento mediante interpolación de la concentración de N_2O durante el período de muestreo de 8 días (figura 15).

Figura 14

Protocolo de evaluación de óxido nitroso (N_2O) mediante el equipo portátil Gaset DX4040

Medición de N_2O en el campo con un analizador de gas FTIR portátil

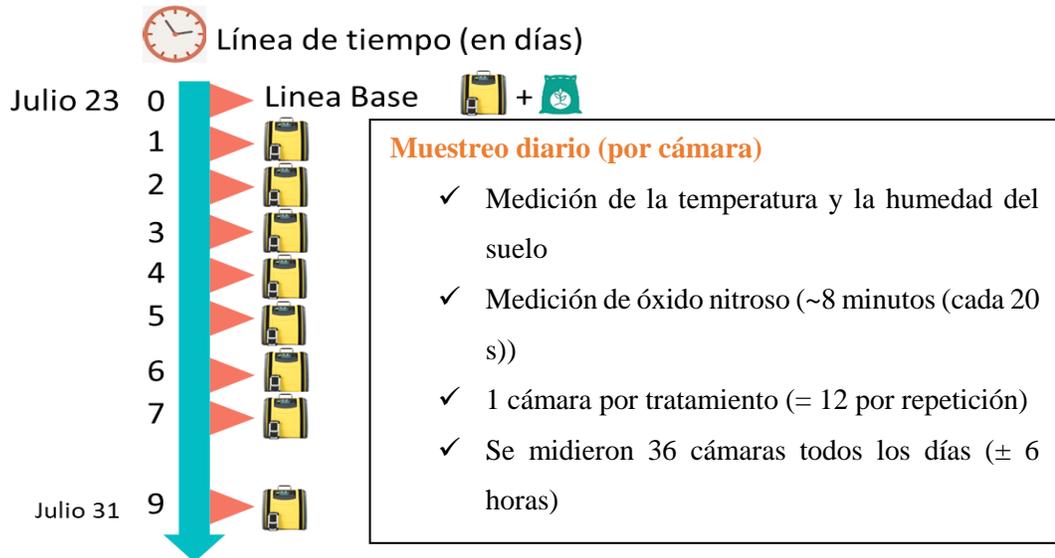


Figura 15

Medición de emisiones de N_2O en campo



3.10 Objetivo específico 4. Determinar el punto óptimo económico en la aplicación de N, el cual genere la mayor rentabilidad para el productor.

3.10.1 Fuente de la información

La evaluación económica toma como punto de partida los resultados obtenidos en la segunda fase del estudio, en donde se evaluaron las gramíneas frente a diferentes dosis (0, 10, 20 y 30 kg N ha⁻¹). *U. híbrido cv Cayman* con un tratamiento de fertilización de 20 kg N ha⁻¹ con Nitromag, y *Megathyrsus maximus cv Mombasa* con un tratamiento de fertilización de 30 kg N ha⁻¹ con Urea. Una vez identificados estos dos materiales con sus respectivas dosis de fertilización nitrogenada, se tomaron parámetros del estudio en campo como la producción de materia seca (kg ha⁻¹), la digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS), la proteína cruda y el contenido de la materia seca para ser llevados al software RUMINANT, de este modo, simular indicadores de productividad como ganancia diaria de peso y carga animal de cada una de las alternativas de tratamiento y control.

Los escenarios de control para cada gramínea corresponden al desempeño de la misma sin el uso de ningún fertilizante. En el caso de los tratamientos, el estudio económico considera prácticas de manejo de pasturas con dos fertilizaciones al año, y para todas las alternativas un manejo de rotación de potreros con tiempos de ocupación de un día y periodos de descanso de 30 días. Los datos productivos fueron validados con expertos de la Alianza Bioversity International-CIAT.

Los costos de establecimiento y manejo de cada alternativa a evaluar se calcularon con base en la información reportada en el trabajo de campo. Además, se utilizaron precios constantes de 2019, según los boletines del Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario (SIPSA) del DANE y bases de datos de la Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN).

3.10.2 Características de las variedades forrajeras según el tratamiento nitrogenado

La Tabla 8 presenta el resumen de los principales indicadores productivos de las especies evaluadas, con su tratamiento nitrogenado y el control. Estas mediciones indican que la producción de biomasa de Cayman se incrementa en más de un 100% con el uso del fertilizante, mientras que en Mombasa el incremento frente al control es de un 92%. La proteína cruda, por su parte, se incrementa en 12% para el caso del híbrido Cayman, y el incremento de Mombasa frente a la alternativa sin fertilización es de 59%. A partir de estos valores, la mayor productividad se obtiene con Mombasa, bajo un esquema de fertilización de 30 kg N ha de Urea.

Tabla 8.

Producción de biomasa, calidad nutricional y respuesta animal de las pasturas evaluadas, según su tratamiento nitrogenado y control.

Parámetro	Variable	Cayman		Mombasa	
		Control	Tratamiento (20 Kg de Nltromag)	Control	Tratamiento (30 Kg de Urea)
Producción de biomasa	Materia seca Kg/ha/día	30.69	87.07	43.06	83.10
Calidad nutricional	Proteína cruda (promedio anual)	9.09	10.19	9.53	15.14
	Carga animal (animal/ha)*	5.36	15.22	7.53	14.53
	Ganancia de peso/día**	0.387	0.45	0.83	0.9324
Respuesta animal	Productividad animal (Kg/ha/año)	757.13	2500.22	2281.21	4944.94
	Peso final (Kg/animal)	401	424	563	600

Nota: * variable estimada con base en un consumo por animal de 5.72 Kg/día de materia seca.
 ** Valores validados por expertos, a excepción del valor para Mombasa-control, el cual fue obtenido de simulación en software.

3.10.3 Flujo de caja

El análisis económico se fundamentó en un modelo de flujo de caja libre descontado, el cual toma en consideración el valor del dinero en el tiempo y permite evaluar el efecto de diversas variables sobre los rendimientos futuros de la inversión. Además, se complementó con la estimación de indicadores de rentabilidad financiera, a saber: el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación costo beneficio (B/C). La Tabla 9, describe los indicadores de rentabilidad utilizados para el ejercicio.

Tabla 9.

Indicadores de rentabilidad y criterios de decisión.

Indicador	Fórmula	Criterio de decisión
Valor Presente Neto (VPN)	$VPN = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+i)^t}$ Donde: <ul style="list-style-type: none"> • FC: flujo de caja neto para el periodo t • i: tasa de descuento • t: horizonte del proyecto de inversión 	Si $VPN > 0$, se acepta la inversión Si $VPN = 0$, hay indiferencia frente a la inversión Si $VPN < 0$, se rechaza el proyecto de inversión

Tasa interna de retorno (TIR)	$\sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+i)^t} = 0$	Si $TIR > i$, se acepta la inversión Si $TIR = i$, hay indiferencia frente a la inversión Si $TIR < i$, se rechaza la inversión
Relación costo/beneficio	$B/C = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}}$	Si $B/C > 1$, se acepta la inversión Si $B/C = 1$, hay indiferencia frente a la inversión Si $B/C < 1$, se rechaza la inversión

El modelo de flujo de caja del presente ejercicio considera entre sus categorías de costos variables por hectárea los siguientes: costos totales de establecimiento de las praderas, costos de mantenimiento de la pradera y costos de operación (compra de animales, sanidad animal, mano de obra permanente y ocasional, y arrendamiento de la tierra). Por su parte, los ingresos se derivan de la venta de la carne producida por hectárea en el sistema para cada alternativa evaluada.

Los supuestos implementados para el análisis económico consideran: 1) un horizonte de tiempo para evaluar cada inversión en las alternativas de 10 años (Holmann & Estrada, 1997); 2) se asume un ciclo de levante y ceba fijo de 365 días; 3) los destetos arrancan con un peso inicial de 260 Kg; 4) como variable proxy a la tasa de descuento se emplea la tasa de interés de los créditos FINAGRO para el pequeño productor en 2020, indexada a la DTF, basándose en la metodología para el costo del capital como el costo de la deuda; 5) se asume que se requiere de 2,5 empleados por cada 100 animales para un sistema de levante y ceba (FEDEGAN, 2008); 6) precios constantes de 2019; y 7) se asume un porcentaje de pérdida de productividad de las pasturas evaluadas.

Frente al supuesto de pérdida de productividad de las pasturas, para el caso de Cayman se toma la información reportada por Ecured (s.f.) a partir de la cual, en un ensayo experimental de cuatro años el híbrido presentaba una cobertura de 83%, es decir, una pérdida en cobertura del 17% (4.25% anual). Esta pérdida de cobertura se refleja en la reducción de la disponibilidad de materia seca por hectárea. De ahí que, el dato inicial obtenido en los trabajos en campo, tanto para Cayman Control como para Cayman bajo el tratamiento, es ajustado con dicho porcentaje para cada año. Posteriormente, se recalcula la carga animal año a año, asumiendo un consumo por animal de 5.72 kg MS día⁻¹. En el caso de Mombasa, según Holmann et al. (2004), se asume una pérdida anualizada de la capacidad de carga de 11.3%.

3.10.4 Flujo de caja con análisis de sensibilidad

Al realizar el análisis de sensibilidad, es decir, la respuesta de los indicadores financieros ante un escenario de riesgo introducido a partir de distribuciones de probabilidad para variables del ejercicio con potenciales cambios en el tiempo; se utilizó el software @RISK (Palaside Corporation). Con base en consulta con expertos, se definieron como variables críticas, o variables de entrada, para el modelo la ganancia diaria de peso del animal, la carga animal y el precio de venta de los machos cebados (\$ kg⁻¹ en pie). Las variables de salida consideradas fueron el VPN y la TIR. Además, el proceso de simulación se realizó con 1000 iteraciones para cada alternativa, con un intervalo de confianza del 95%. En este caso, se utiliza el valor medio de cada una de las variables de salida como criterio de selección (Tabla 9).

Las distribuciones de probabilidad para las variables críticas se presentan en la Tabla 10. Los ajustes a la distribución de cada variable en cada alternativa corresponden a consenso con expertos.

Tabla 10.

Distribuciones de probabilidad y parámetros de las variables críticas del análisis de sensibilidad.

Variable	Distribución	Alternativa	Valor mínimo	Parámetros Valor más probable	Valor máximo
Ganancia diaria de peso (kg/día/animal)	Triangular (a, b, c)	Cayman control	0.15	0.387	0.85
		Cayman tratamiento	0.15	0.45	0.85
		Mombasa control	0.7	0.83	1.11**
		Mombasa tratamiento	0.7	0.932	1.11**
Carga animal (Animal/ha)	Triangular (a, b, c)	Cayman control	1	4.45*	5.36**
		Cayman tratamiento	1	12.62*	15.22**
		Mombasa control	1	4.65*	7.53**
Precio de venta (\$/Kg en pie)	Triangular (a, b, c)	Mombasa tratamiento	1	8.98*	14.53**
		Todas las alternativas	\$ 4195	\$ 4376	\$ 4567

Nota: *Corresponde al promedio de los 10 años, después de ser afectado por el supuesto de pérdida de productividad de la pastura.

**Corresponde a los valores obtenidos de la simulación en software.

3.11 Procesamiento de datos

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando R v3.4.4. Las diferencias significativas entre los tratamientos se evaluaron mediante el análisis de varianza y

la prueba de Tukey HSD para comparaciones múltiples. Los datos presentaron una distribución normal, las figuras se construyeron con "ggplot2" v2.2.1.

Al tratarse de un diseño de parcelas divididas, el modelo estadístico utilizado fue:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \delta_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}; \quad k= 1,2,\dots,n; \quad i= 1,2,\dots,a; \quad j=1,2,\dots,b$$

En donde α_i es el efecto del i -ésimo nivel del factor de parcela y δ_{ik} es el error de parcela. Sin considerar la media general μ , estos primeros dos efectos se refieren a la parcela. Los últimos tres corresponden a la subparcela, donde β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor B, $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de interacción AB en la combinación ij y ε_{ijk} es el error de la subparcela (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

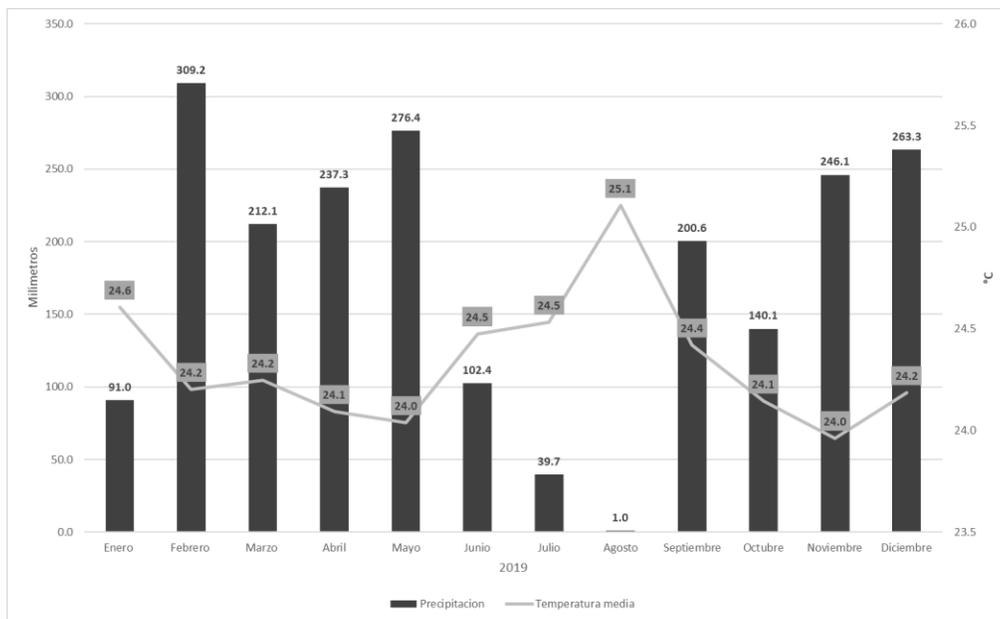
4.1 Objetivo específico 1. Caracterizar la eficiencia en el uso del nitrógeno en *Urochloa*, *Megathyrsus* y *Cynodon* en respuesta a diferentes fertilizantes nitrogenados

4.1.1 Variables climáticas durante el desarrollo del primer objetivo

La temperatura durante el periodo de evaluación osciló entre 24 y 25.1 °C. La primera evaluación de época de lluvias se realizó entre mayo y junio en donde la precipitación fue de 276 y 102 mm, la segunda en septiembre en donde cayeron 200.6 mm. Las evaluaciones de época seca se realizaron en los meses de julio y agosto, cuando las precipitaciones son mínimas para todo el año (Figura 17).

Figura 16

Condiciones climáticas de la zona, año 2019



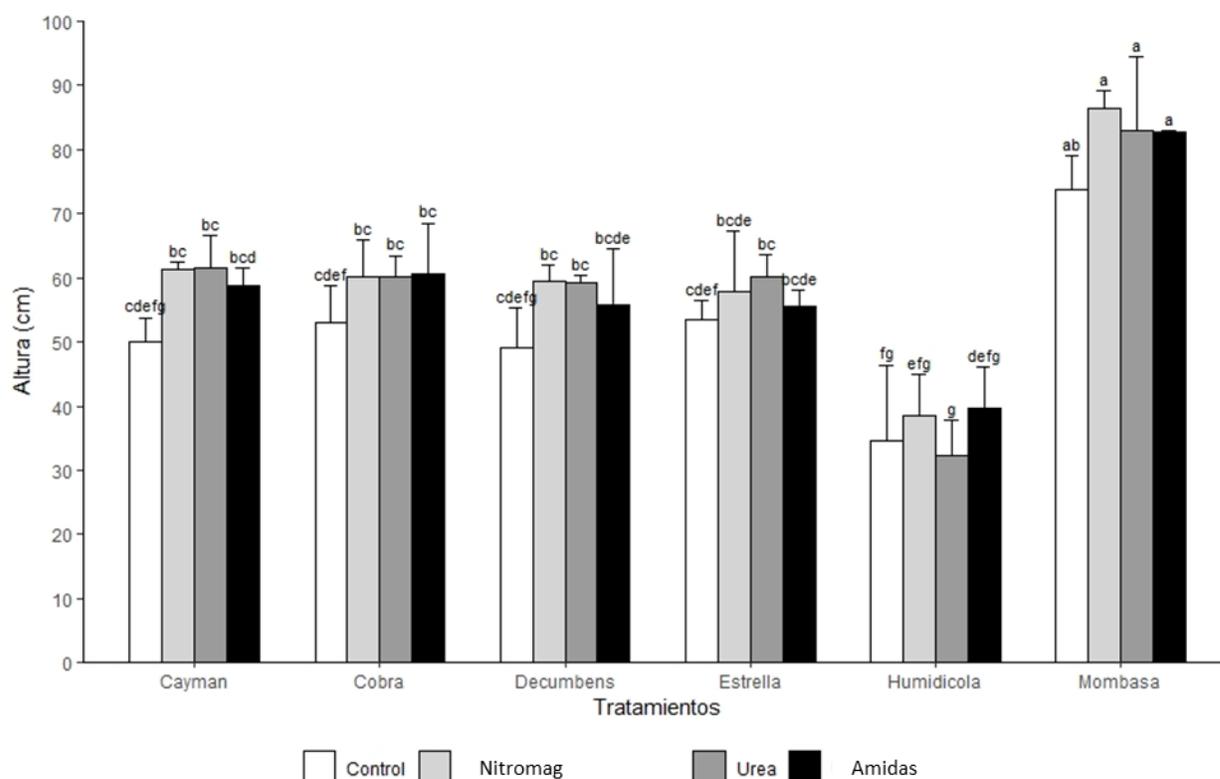
4.1.2 Resultados de comportamiento agronómico y productivo

Altura. El N tienen un conjunto de efectos sobre variables morfológicas y estructurales, determinan una fuerte incidencia sobre el desarrollo del forraje, siendo este nutriente un limitante en la expansión foliar y crecimiento aéreo (Colabelli, Agnusdei, Mazzanti, & Labreveux, 1998). En la Figura 17 se aprecia que la mayor altura lo presentó Mombasa debido a su forma de crecimiento; Mombasa – Nitromag con 86.4 cm, Mombasa - Control (sin la aplicación de N) presentó el

menor comportamiento con 73.8 cm; el genotipo que le sigue en altura fue Cayman, en donde Cayman - Urea fue el mayor (61.5 cm) y Cayman - Control el menor (49.9 cm); el cultivar Cobra presentó la mayor respuesta con Amidas (60.6 cm) y la menor con el Control (53 cm); Estrella reaccionó bien a la aplicación de Urea con 60.25 cm y el menor valor con el Control (53 cm); Humidícola presentó la mayor altura mediante la fertilización con Nitromag (59.4 cm) y la menor con el Control (49.2 cm); Humidícola fue el genotipo con la menor altura, la aplicación de Amidas resultó en una mayor altura (39.6 cm) y la menor con la aplicación de Urea (32 cm).

Figura 17

Altura de las plantas observada en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, $n = 3$. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

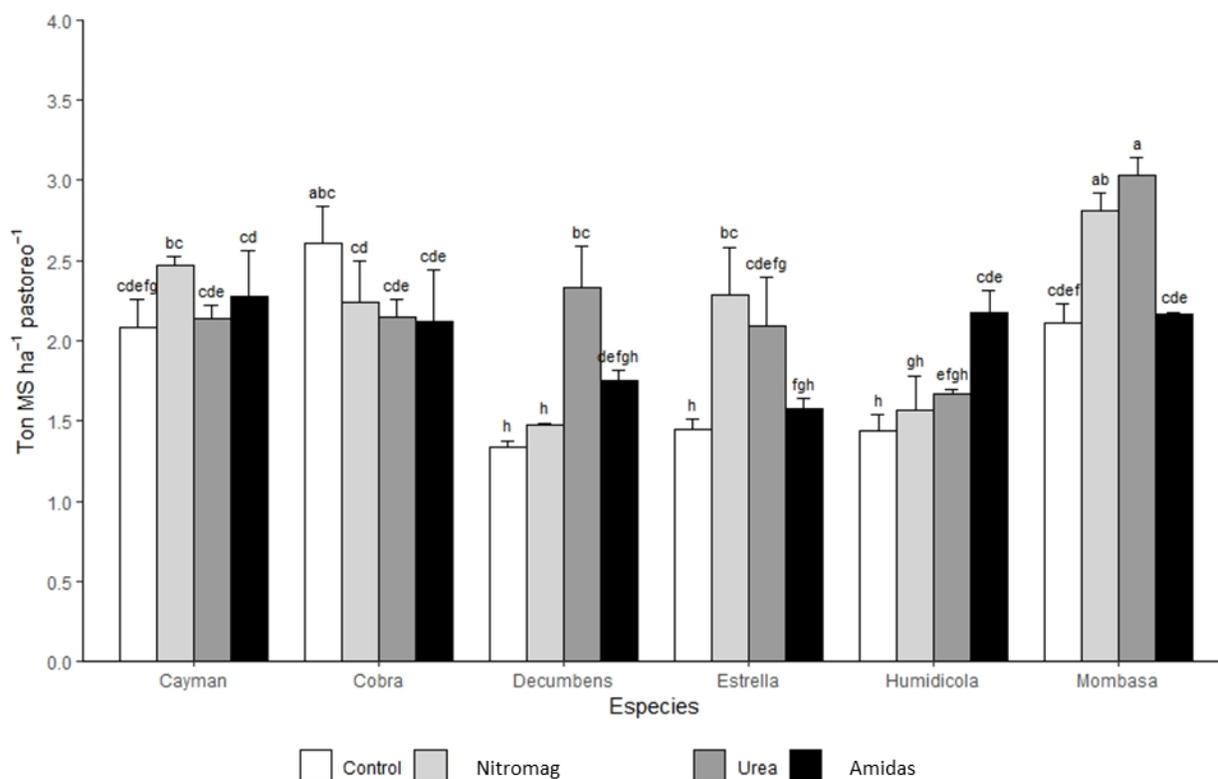
El tipo o hábito de crecimiento de las especies determina la altura, siendo una característica genotípica en los pastos. En estudios realizados por Molina, Terrazas, & Mariazza, (2020); Carvajal, (2019); Peters et al., (2011); Arango et al., (2016), para Mombasa se reporta altura de 1.5 metros y puede llegar hasta los 3

m, superiores a los registrados en el presente estudio. Por otro lado Cruz et al., (2012) el cual evaluó la adaptación y productividad de las gramíneas *M. maximus* cv Tanzania, *M. maximus* cv Mombasa y *Pennisetum purpureum* cv Mott, en las condiciones edafoclimáticas de las áreas ganaderas de Jimaguayú, reporta alturas de 1.99 metros en este material. Para *U.* híbrido la altura con la aplicación de fertilizantes puede llegar 82 cm, valor cercano a 61.5 cm alcanzados por Cayman en el presente estudio (Jácome & Manuel Suquilanda, 2009).

Producción de materia seca (Ton MS ha⁻¹ año⁻¹). El potencial genético de los forrajes tropicales y los entornos en los que se cultivan influencia y productividad, es bien conocida la habilidad de estas especies forrajeras en la absorción y el uso de nutrientes (Rao, Ayarza, & Garcia, 1995) . Se realizó la comparación de medias de Tukey (Figura 18) y se encontró que Mombasa fertilizada con urea y Nitromag presentaron la mayor producción de materia seca por hectárea (3.04 y 2.81 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹) y los menores rendimientos los presento Decumbens, Humidicola y Estrella sin fertilización (1.34, 1.44 y 1.45 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹ respectivamente). Estudios realizados por Silva, Dilia, & Menjivar, (2006) indican que la fuente de N influye en el comportamiento productivo de los forrajes, siendo este factor determinante en la productividad de materia seca. Así mismo Ramos-Trejo, Victoria-Graniel, & Sandoval-Gío, (2015) demostraron la aplicación de N puede incrementar hasta en un 25% la producción de materia seca en los forrajes, mientras que en el presente estudio el aumento de producción en materia seca de Mombasa fue mayor (30.5% más alto). Para el cultivar Cobra PAPALOTLA SEMILLAS, (2017) reporta una productividad de 2.5 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹, valor que se asemeja a los resultados presentados sin la aplicación de fertilización (2.6 MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹). En evaluaciones de parámetros productivos y agronómicos del pasto Cobra bajo condiciones del trópico seco, se demostró que puede alcanzar hasta 4.1 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹ (Suchini & Escuela, 2015). Es probable que la mayor productividad de Cobra sin fertilización se atribuya a ley de los rendimientos finalmente decrecientes, la cual dice que “la producción no puede incrementarse indefinidamente. El efecto productivo de un factor de producción cuya presencia se incrementa, llegará a ser negativo a partir de un cierto límite” (Andreu et al., 2006). En ese sentido, al realizar la fertilización a una dosis de 25 kg N ha⁻¹, pudo haber sobrepasado el límite necesario para que la producción sea optima y al contrario causara un detrimento en su productividad.

Figura 18

Producción de materia seca ha⁻¹ Pastoreo⁻¹ en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

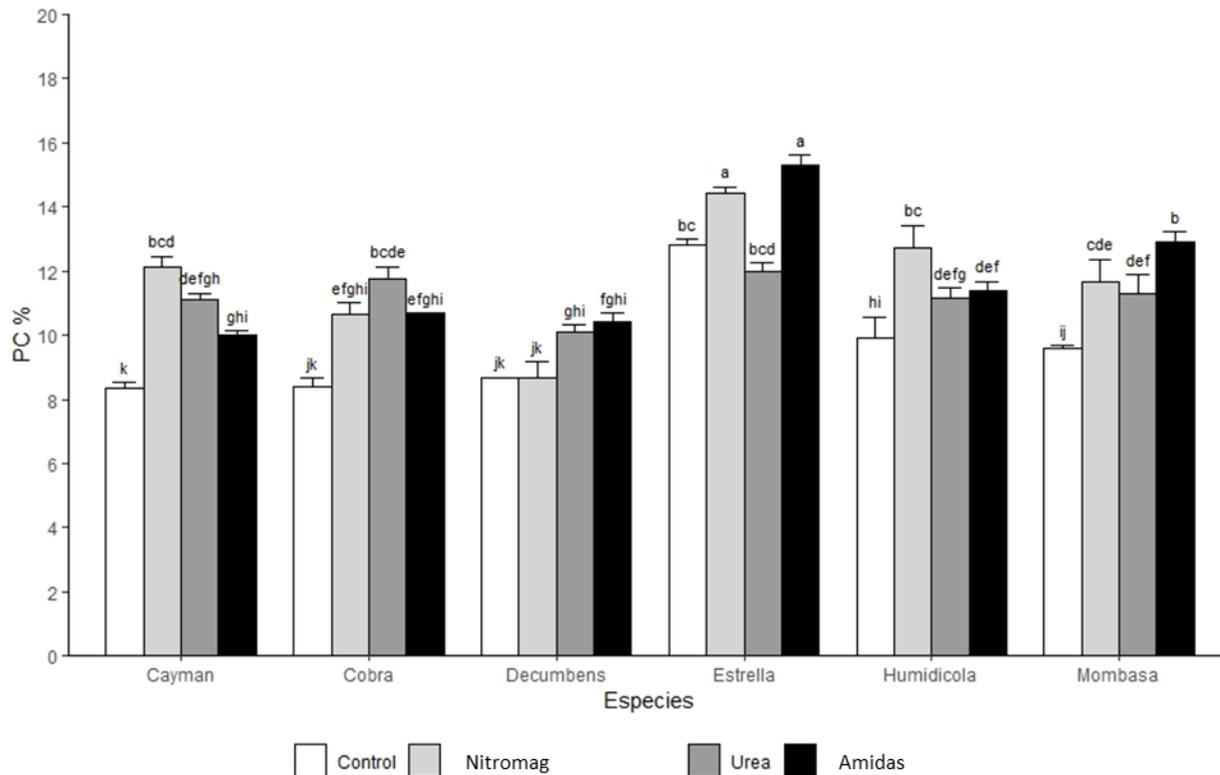
4.1.3 Calidad nutricional

Porcentaje de proteína cruda. Las fuentes nitrogenadas incrementan la calidad nutricional del pasto, se puede evidenciar un notable cambio entre los tratamientos tratados con N y sin fertilizar (Trejo, Solis, & Vera, 2013). Se realizó la comparación de medias de Tukey (Figura 19), el tratamiento Estrella fertilizada con Amidas presento el mayor porcentaje de proteína cruda (15.3%), seguida de Estrella con Nitromag con 14.4% y Mombasa con Amidas con 12.9% de proteína cruda en su biomasa. Los cultivares Cobra y Cayman sin la aplicación de nitrógeno presentaron el menor contenido con 8.4 y 8.3% respectivamente. Los valores reportados para Estrella son mayores a los encontrados por Guzmán-sánchez, Beltrán-perafán, Montes-rojas, & Anaya, (2020), los cuales presentaron valores de hasta 13% de %PC. En evaluaciones de adaptabilidad en Mombasa, Cruz et al., (2012) se encontró contenidos de hasta 11.4% de proteína, similar al encontrado

por I. C. Molina et al., (2015) (11.6 % PC), pero siendo menor al encontrado mediante la fertilización en este estudio. El N es el principal constituyente de las proteínas, en general el porcentaje de carbohidratos y proteínas solubles totales puede aumentar hasta en 41 y 57%, respectivamente, en comparación al tratamiento control (sin fertilización), existe un efecto estimulador de la adición de N en las distintas dosis, favoreciendo la síntesis de carbohidratos y proteínas (Latsague, Sáez, & Mora, 2014; Silva et al., 2006). El hecho de que la concentración de PC en el forraje producido se mantuvo por encima del 8 %PC, incluso en ausencia de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, es una prueba más de la fertilidad inherente de estos suelos.

Figura 19

Contenido de proteína cruda (%PC) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

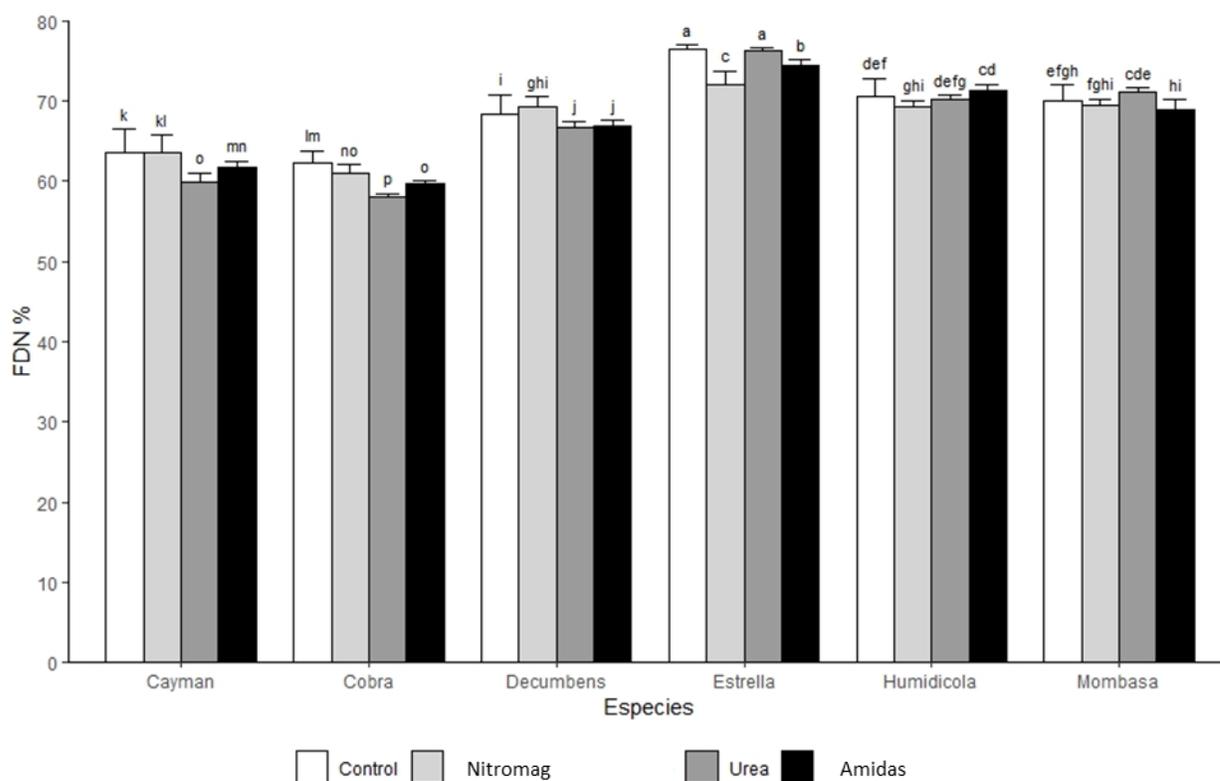
Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

Porcentaje fibra detergente neutra. Las gramíneas se caracterizan por tener altos contenidos de pared celular (%FDN), es el indicador de la fibra total en

los alimentos, y conocerlos es importante. Se realizó la comparación de medias de Tukey (Figura 20), se aprecia el genotipo Estrella presenta el mayor contenido de fibra; Estrella si fertilización y con la aplicación de Urea presentaron la mayor concentración (76.5 y 76.3 %FDN), los menores contenidos los presentaron los cultivares Cobra fertilizado con Urea y Amidas (58 y 59.7 %FDN respectivamente) y Cayman-Urea con 59.8 %FDN. El resultado de este parámetro en Estrella fue mayor al reportado por I. C. Molina et al., (2015), en donde esta presentó un 71.3 %FDN. Para Mombasa los valores estuvieron por encima de los registrados por Villegas et al., (2020), en donde se alcanzó hasta 63.8 %. Cuanto mayor la fracción de %FDN peor será la digestibilidad y la ganancia animal, según el estudio realizado en *U. decumbens* por V. J. Pereira, de ASSIS, Lana, Silva, & Pereira, (2019) los tratamientos sin fertilización presentan un mayor contenido de FDN en comparación a los tratamientos fertilizados.

Figura 20

Contenido de fibra detergente neutra (FDN) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



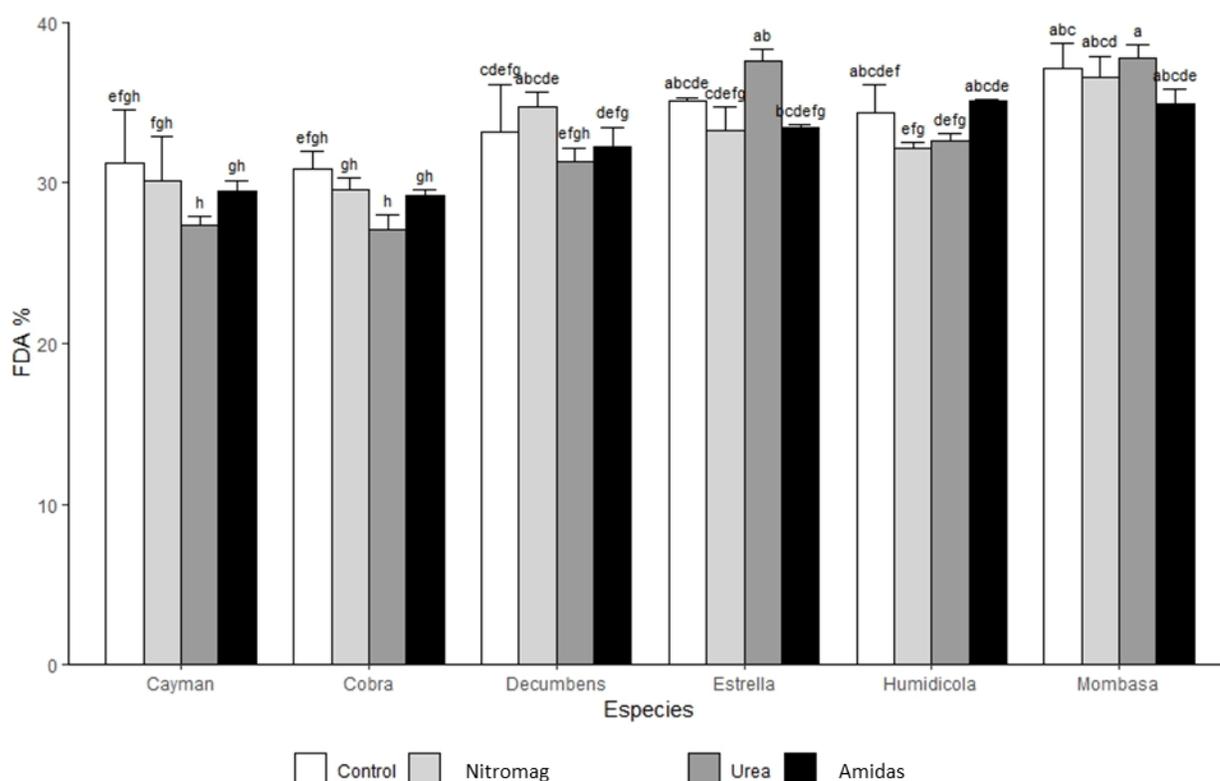
Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD

Porcentaje fibra detergente ácida. Los tratamientos con la ausencia de fertilización presentan mayor contenido de %FDA, la comparación de medias de Tukey (Figura 21) indica que Mombasa y Estrella con la aplicación de Urea presentaron el mayor contenido de %FDA (37.8 y 37.6 respectivamente); el menor contenido lo presentaron los híbridos Cayman y Cobra fertilizados con Urea con 27.4 y 27.1% respectivamente. Según los resultados, los contenidos altos en fibra repercuten en una baja digestibilidad, entre mayor es el contenido de las fibras (%FDN y %FDA) menor es la %DIVMS. Como los valores de %FDA fueron menores cuando se fertilizó, en la mayoría de los casos, se puede inferir que la aplicación de N mejoró las características de la fibra, lo que favorece el crecimiento de las plantas y el aumento de la relación hoja/tallo (mayor celulosa y menos lignina) en consecuencia, mejorando la digestibilidad del forraje (V. J. Pereira *et al.*, 2019; Serafim & Galbiatti, 2012).

Figura 21

Contenido de fibra detergente ácida (%FDA) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

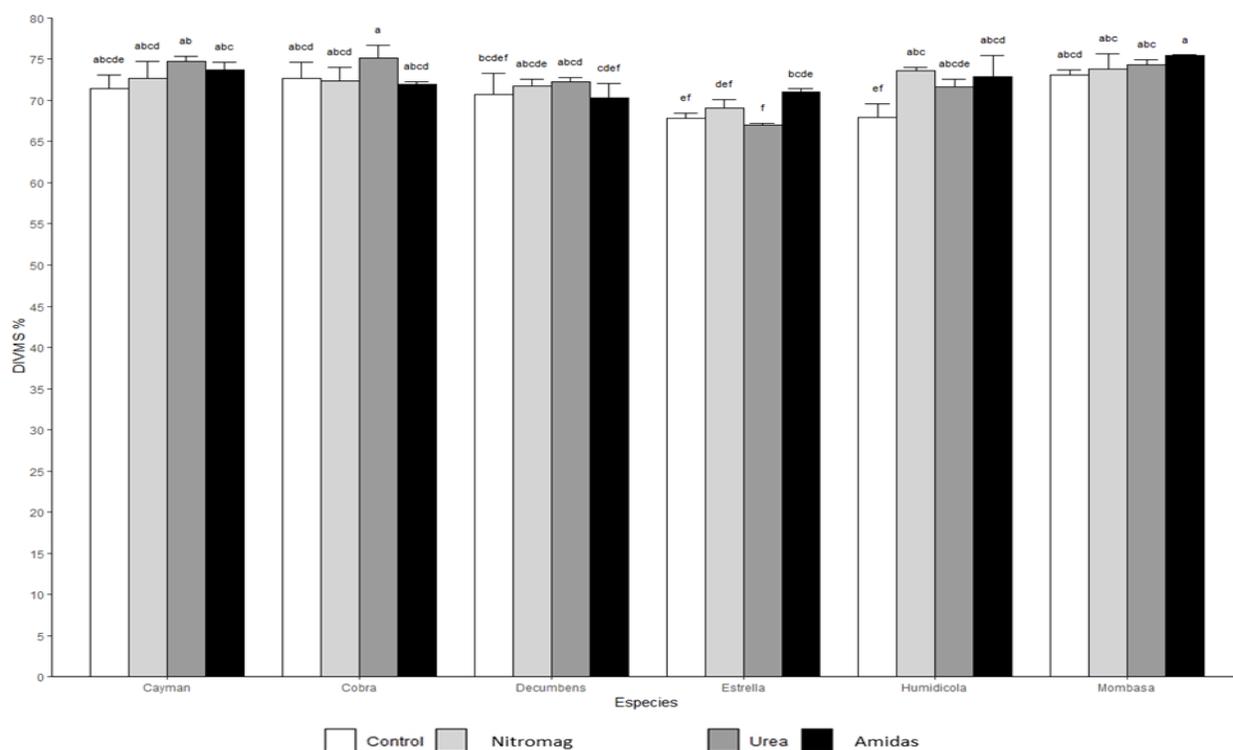
Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

Digestibilidad In-vitro de la materia seca. El genotipo Estrella presentó los mayores contenidos de fibra y presenta la menor digestibilidad. Se realizó la comparación de medias de Tukey (Figura 22), se muestra que la mayor %DIVMS la

presento Mombasa fertilizada con Amidas con 75.5%, seguida de los tratamientos Cobra, Cayman y Mombasa fertilizados con Urea (75.1, 74.7, 74.3 % respectivamente). La menor digestibilidad la presento Estrella fertilizada con Urea con 67.7%. Los altos contenidos de fibra en el forraje disminuyen la digestibilidad en los animales, en el presente estudio, Estrella que presento los mayores valores de fibra presento la menor digestibilidad. Además, entre cada la especie, la fertilización de nitrógeno aumento en la %DIVMS. Según Serafim & Galbiatti, (2012) la altura y edad al corte, entrada y salida de animales en un sistema de pastoreo rotacional, condiciones climáticas favorables para obtener forrajes con mejor valor nutricional y la aplicación de fertilización nitrogenada proporciona a la planta los minerales necesarios para incrementar la producción en masa, y de esta manera ofrece condiciones para obtener materia seca de calidad, es decir, con menores niveles de %NDF y %FDA, mayor digestibilidad, mayor contenido de proteína cruda (PB) y mayor contenido de nutrientes digestibles totales (NDT).

Figura 22

Digestibilidad in vitro de materia seca (%DIVMS) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

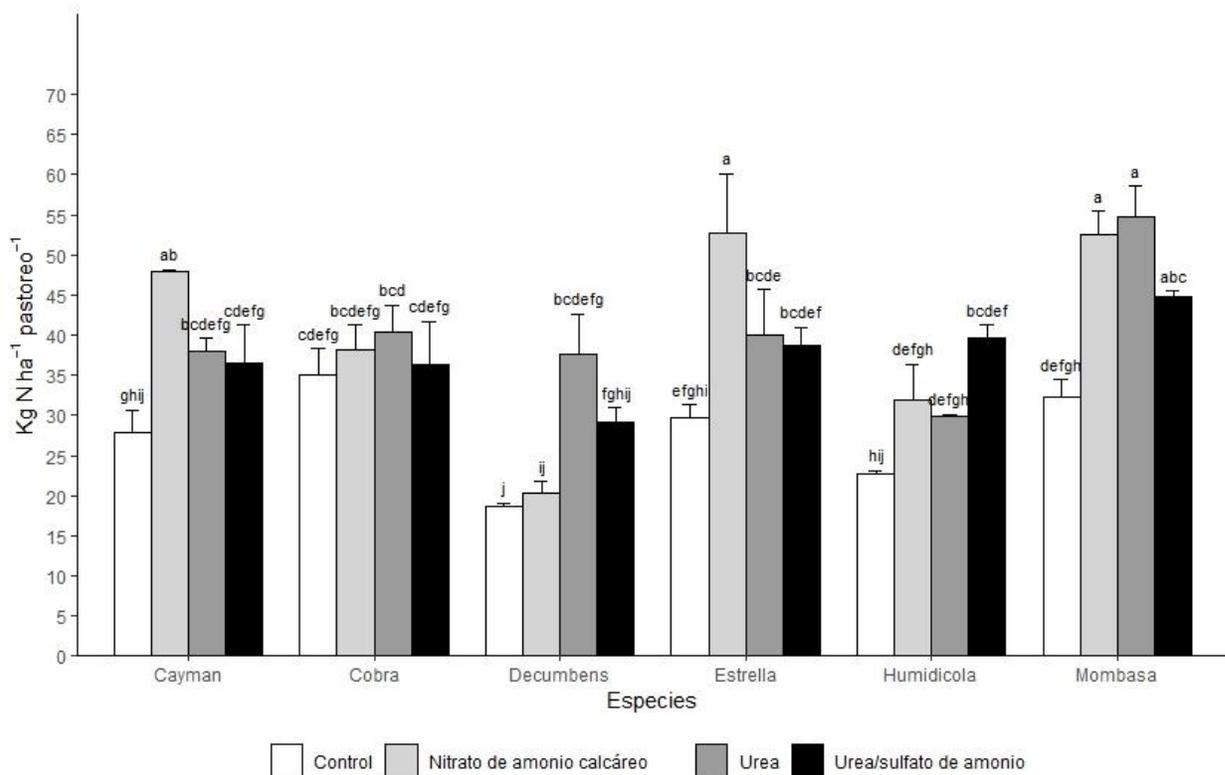
Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

4.1.4 Absorción de nitrógeno

En la comparación de medias de Tukey (Figura 23) la mayor absorción de N la presentaron los tratamientos Mombasa-Urea, Estrella-Nitromag, Mombasa-Nitromag y Cayman-Nitromag con 54.8, 52.7, 52.5 y 47.9 kg N ha⁻¹ pastoreo⁻¹. La menor absorción para todas las especies se dio cuando no hubo fertilización. Según Baptistella *et al.*, (2020) el género *Urochloa* en general puede acumular alrededor de 100 kg N ha⁻¹, valor superior encontrado en el presente estudio. En el estudio de la dinámica del nitrógeno en las gramíneas *Poa trivialis* y *M. maximus*, realizado por Santos, Thornton & Corsi (2002), la aplicación de N indujo a una mayor absorción de este nutriente en las hojas, tallo y raíces.

Figura 23

Absorción de nitrógeno (kgN ha⁻¹ pastoreo⁻¹) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media ± desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

4.1.5 Uso eficiente del nitrógeno.

Es posible aumentar la producción y la eficiencia mediante el manejo de la fertilización N basada en la calidad (formas de N), una proporción equilibrada de NO_3^- y NH_4^+ en el medio de crecimiento maximiza la EUN de las plantas (da Silva Santos, De Bona, & Monteiro, 2013). Para este análisis se realizó la comparación de medias de Tukey para el factor Fuente (Tabla 11).

Tabla 11

Comparación de medias de Tukey del factor Fuente nitrogenada para la variable UEN

Fuente	UEN	groups
Nitromag	54	a
Urea	50	a
Amidas	39	b
Control	0	c

Los valores representan la media. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

La fuente nitrogenada Nitromag y Urea ocasionaron una mayor eficiencia agronómica en la utilización del nitrógeno por parte de los forrajes con 54 y 50% respectivamente.

En la tabla 12 se aprecia la comparación de medias por genotipo, en donde Mombasa, estrella y Cayman fueron las especies con mayor eficiencia en el uso de nitrógeno con 55, 42 y 41% respectivamente según el N aplicado.

Tabla 12

Comparación de medias de Tukey por genotipo

Especie	UEN	groups
Mombasa	55	a
Estrella	42	b
Cayman	41	bc
Humidicola	33	cd
Decumbens	32	d
Cobra	12	e

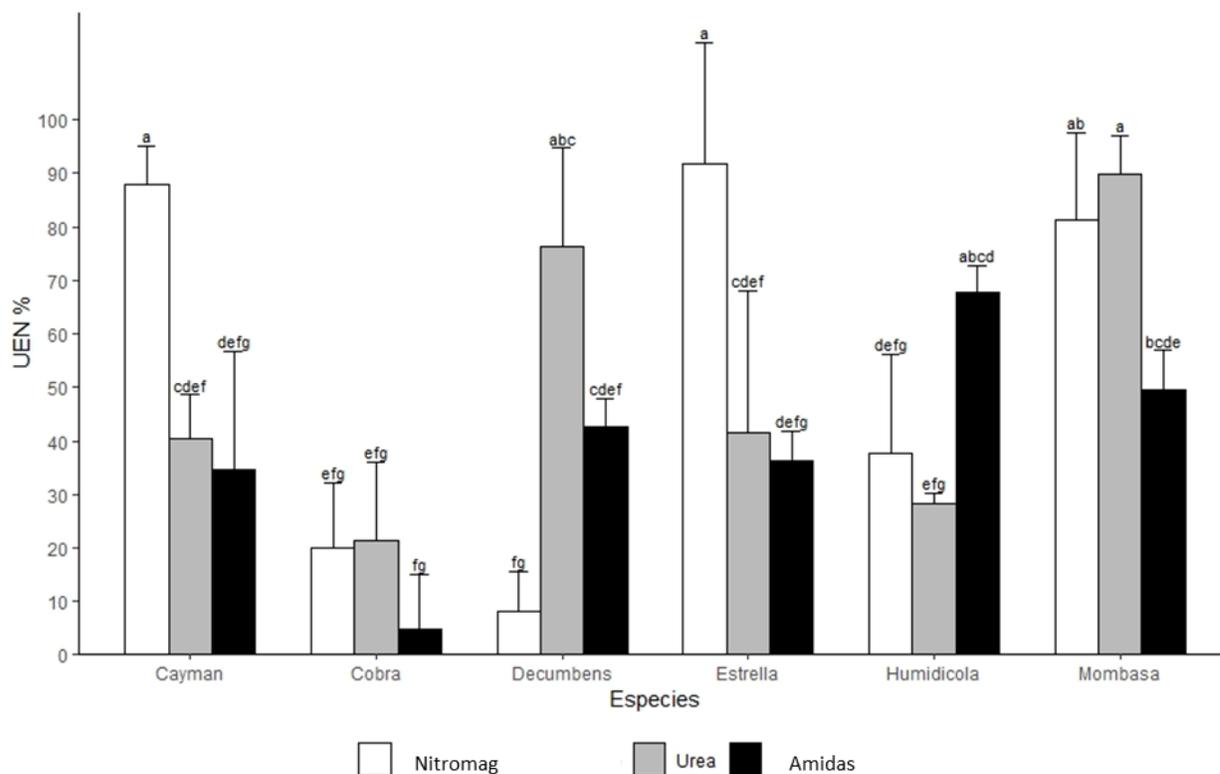
Los valores representan la media. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

En las plantas existen genes asociados a la captación, transporte y asimilación del N, el nitrato y amonio son las principales formas en las que las plantas hacen uso de este nutriente (Kant, Bi, & Rothstein, 2011; Li, Hu, & Chu, 2017; Näsholm, Kielland, & Ganeteg, 2009). Dado que se presentan diferencias en el UEN dentro de cada especie según el fertilizante, eso indica claramente que los cambios notables en la producción de forraje son debido a las formas de N suministradas. En la figura 24 se aprecia el resultado de la combinación de los factores, en donde los tratamientos de Estrella, Cayman fertilizadas con Nitromag y Mombasa con Urea presentaron el mayor UEN con 91.7, 87.9 y 89.9%. Para Decumbens y cobra el mayor UEN se dio con la fertilización con Urea (76.4 y 21.3% respectivamente); Humidicola la mayor eficiencia se presentó con la aplicación de Amidas con 67.7%. La fuente de nitrógeno utilizada en la fertilización de los forrajes influye en la expresión fenotípica de las especies forrajera de clima cálido (Mohan Kumar Scholar *et al.*, 2018). Según da Silva Santos *et al.* (2013) la aplicación adecuada de NO_3^- y NH_4^+ en proporción de 55-45% (similar a Nitromag), mejoró la producción de macollos y hojas y la superficie del área foliar de *M. maximus* en aproximadamente un 30%, además mostró un aumento la longitud de la raíz y el área de la superficie de la raíz en aproximadamente dos y seis veces, respectivamente, en comparación con *M. maximus* fertilizado con NO_3^- exclusivamente.

En este sentido, el incremento en uso eficiente de N puede deberse a una necesidad de los forrajes por este elemento pues se conoce que el nitrógeno es componente básico de aminoácidos, proteínas y hormonas, que conforman el tejido básico de membranas y paredes celulares, así como también de enzimas y pigmentos fotosintéticos responsables de la absorción de luz y producción de fotoasimilados (Arteaga, Cedeño, Cedeño, Cargua, & Garay, 2019; Ueda, Konishi, & Yanagisawa, 2017; Melo *et al.*, 2017; (Ueda *et al.*, 2017). Arteaga *et al.*, (2019) son claros en afirmar que las fuentes nitrogenadas son determinantes en la expresión del UEN en los cultivos.

Figura 24

Uso eficiente de nitrógeno (UEN) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a cuatro fuentes nitrogenadas



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

4.2 Objetivo específico 2. Identificar las fuentes y dosis de N óptimas para lograr un alto UEN en forrajes del trópico bajo

En esta fase se presentan los resultados del comportamiento agronómico, productivo y calidad nutricional de las seis gramíneas fertilizadas a razón de 10, 20 y 30 kg N ha⁻¹ con la fuente nitrogenada que propicio el mayor UEN en la primera fase.

Figura 25

Vista aérea del ensayo ubicado en la hacienda La Campiña, Santander de Quilichao

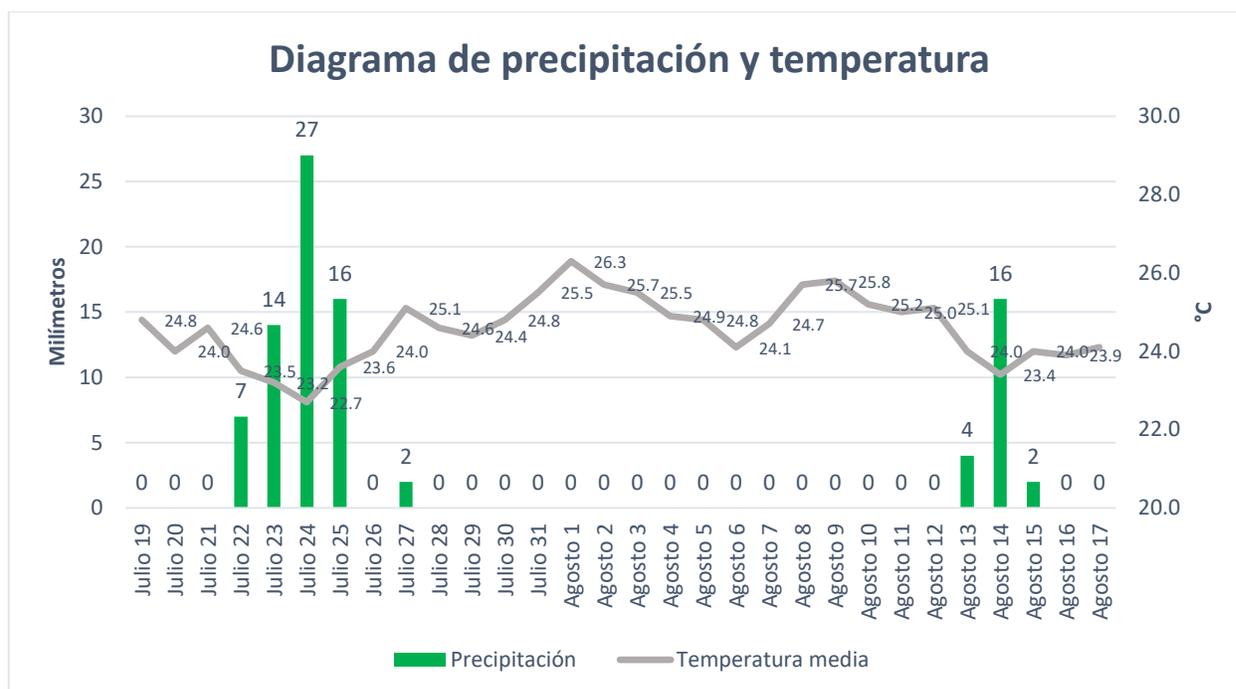


4.2.1 Variables climáticas durante la evaluación de diferentes dosis y flujo de nitrógeno planta-suelo-ambiente

La temperatura durante el periodo de evaluación osciló entre 22.7 y 26.3 °C. Las lluvias coincidieron con la aplicación del fertilizante tres días después del corte de estandarización, en ese periodo el agua es fundamental para que el nitrógeno entre en solución en el suelo y así sea aprovechado por las plantas; durante el periodo de recuperación de los pastos se presentó una precipitación acumulada de 88 mm (Figura 26).

Figura 26

Condiciones climáticas para la Hacienda La Campiña durante evaluación de dosis



4.2.2 Resultados de comportamiento agronómico y productivo

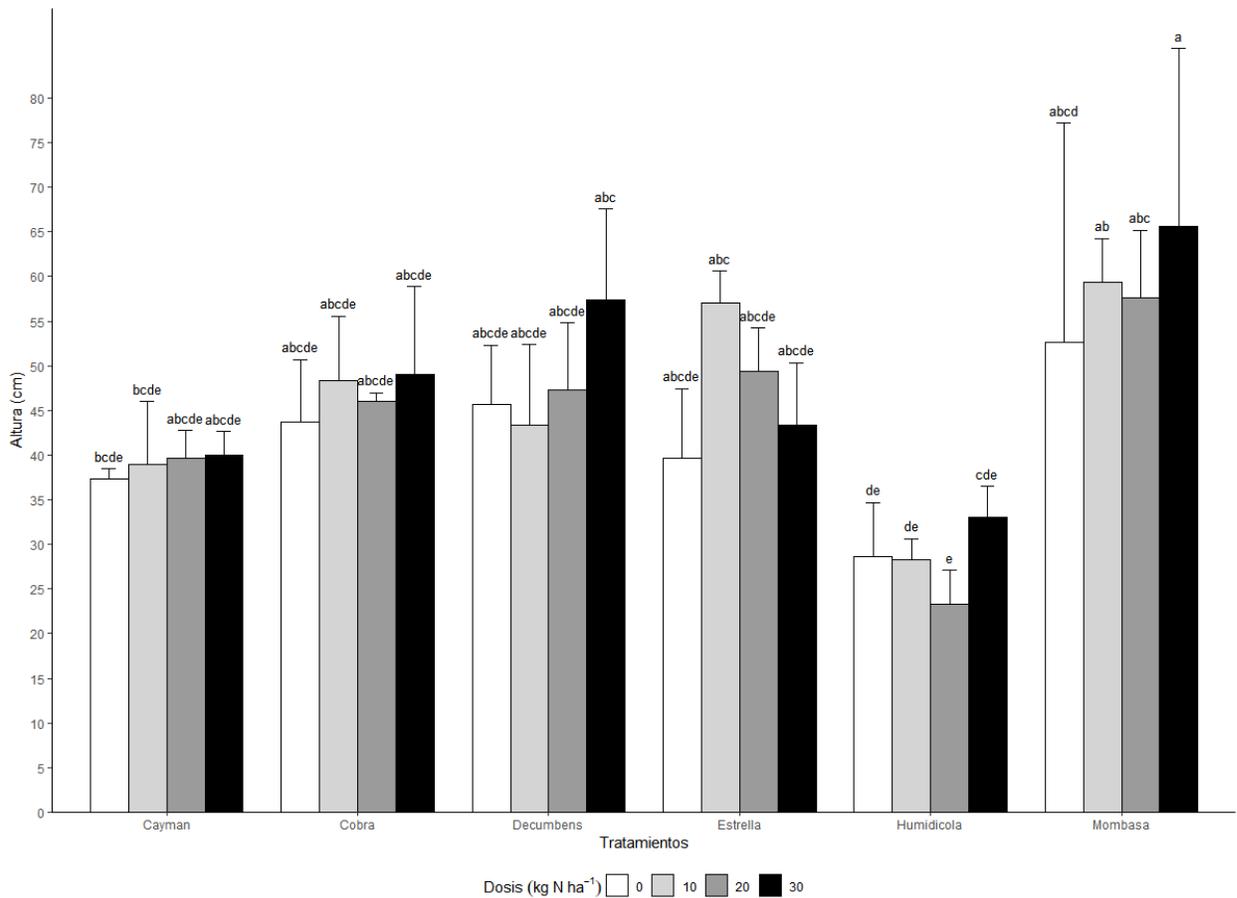
Altura. Como se mostró en la primera fase, la variable altura es una característica propia de cada genotipo. En ese sentido es necesario hacer énfasis en el cambio que se da dentro de cada gramínea.

Según la comparación de medias de Tukey, la mayor altura lo presento Mombasa debido a su forma de crecimiento; Mombasa con 30 kg N ha⁻¹ con la mayor altura (65.7 cm), Mombasa sin la aplicación de N presento el menor comportamiento con 52.7 cm; el genotipo que le sigue en altura fue Decumbens, en donde la mayor fue con 30 kg N ha⁻¹ con 57.3 cm y con 10 kg N ha⁻¹ la menor altura (43.3 cm); Estrella presento la mayor respuesta a 10 kg N ha⁻¹ (57 cm) y la menor con el Control (39.7 cm); el cultivar Cobra presento la mayor respuesta a 30 kg N ha⁻¹ 49 cm y el menor valor sin la aplicación de N (43.7 cm); en Cayman la mayor altura se dio con 30 kg N ha⁻¹ (40 cm) y la menor con el Control (37.3 cm); debido a su hábito de crecimiento estolonífero y rastrero Humidicola fue el genotipo con la menor altura, la aplicación de 30 kg N ha⁻¹ repercutió en la mayor altura (33 cm) y la menor 20 kg N ha⁻¹ (23.3 cm) (Figura 27). Los resultados encontrados en la literatura muestran aumento de la altura de la planta al aumentar la dosis de nitrógeno, como el trabajo de Sánchez *et al.*, (2019) en donde con el mismo periodo

de recuperación (29 días), Mombasa paso de 91.4 cm sin la aplicación de N a 163 cm con 140-20-00 de N-P-K respectivamente. Del Pozo, Herrera, & García, (2004) mostraron que las dimensiones de las hojas en Estrella se incrementaron aproximadamente un 10% con el nivel de fertilización de 50 kg N ha⁻¹. Lopes et al., (2005) al aplicar dosis crecientes de nitrógeno, de 100 a 400 kg ha⁻¹ año⁻¹, en pasto elefante en Viçosa, Estado de Minas Gerais. Oliveira et al., (2007) plantean que, en condiciones de alta disponibilidad de N, ocurre un aumento en el crecimiento de la planta.

Figura 27

Altura de las plantas observada en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media ± desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

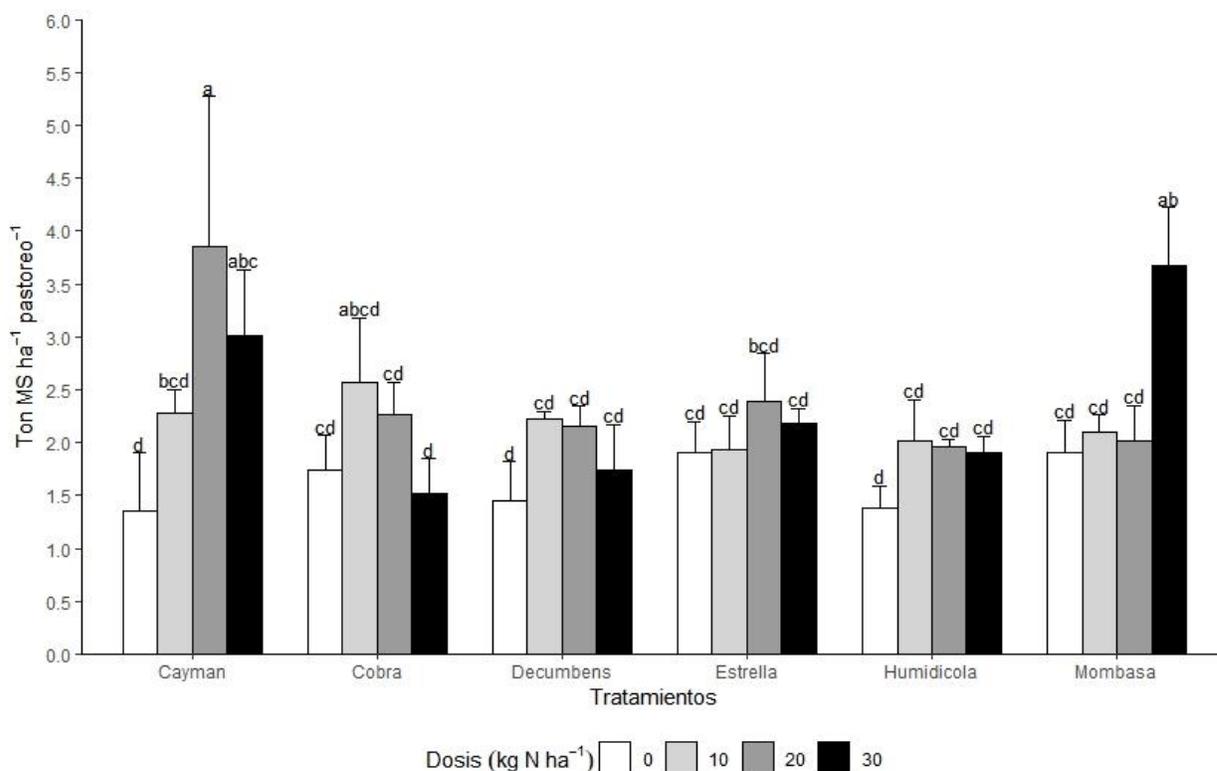
Producción de materia seca (Ton MS ha⁻¹ año⁻¹). Existe una interacción positiva a la aplicación de diferentes dosis de N en la producción de materia seca en las gramíneas evaluadas, en los tratamientos fertilizados presentaron mayor respuesta que el control (sin fertilización). La comparación de medias de Tukey (Figura 38) indica que Cayman a una dosis de 20 kg N ha⁻¹ tuvo la mayor productividad de materia seca (3.9 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹) seguida del tratamiento Mombasa a una dosis de 30 kg N ha⁻¹ (3.7 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹). Lo anterior cobra importancia si se tiene en cuenta que las mismas especies sin fertilización tuvieron una productividad de 1.4 y 1.9 ton MS ha⁻¹ Pastoreo⁻¹ respectivamente.

Se puede apreciar que existe una curva de aprovechamiento entre las dosis y la productividad de todas las especies forrajeras, exceptuando a Mombasa la cual presentó la mayor productividad en el extremo de 30 kg de N ha⁻¹, permitiendo deducir que en términos productivos se puede determinar el punto óptimo en la aplicación de N para todas, menos para Mombasa. El comportamiento antes descrito puede explicarse por las Leyes básicas de la fertilización, en donde la producción no puede incrementarse indefinidamente, el efecto productivo de un factor de producción cuya presencia se incrementa, llega a ser negativo a partir de un cierto límite.

Según Mejía *et al.*, (2018) el aumento en las dosis de fertilización, mejora el comportamiento productivo *U. híbrido* hasta en un 70%, siempre y cuando no se presente una sobredosis. En Mombasa por otro lado la producción de materia seca aumenta mediante la aplicación de N, en el presente estudio se puede apreciar que para lograr un aumento considerable en la producción de materia seca en este cultivar, fue necesario 30 kg N ha⁻¹, debido probablemente a que Mombasa es una especie exigente en este nutriente (Santos *et al.*, 2002).

Figura 28

Producción de materia seca ha⁻¹ Pastoreo⁻¹ en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

Arteaga et al., (2019) encontraron que en Estrella la materia seca se incrementó en promedio 8.39; 14.40; 20.14 y 26.24 % con la aplicación 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹, con respecto a la parcela con omisión de N. En el estudio realizado por Méndez, Fernández y Yáñez (2019) la producción de MS aumentó según la cantidad de fertilizante aplicada, pasando de 1.83 ton MS ha⁻¹ sin la aplicación de N, a 2.58 ton MS ha⁻¹ con la aplicación de 60 kg de N ha⁻¹. Los estudios respaldan los resultados encontrados en la presente investigación y permiten inferir que las pasturas de clima cálido responden positivamente a la fertilización nitrogenada.

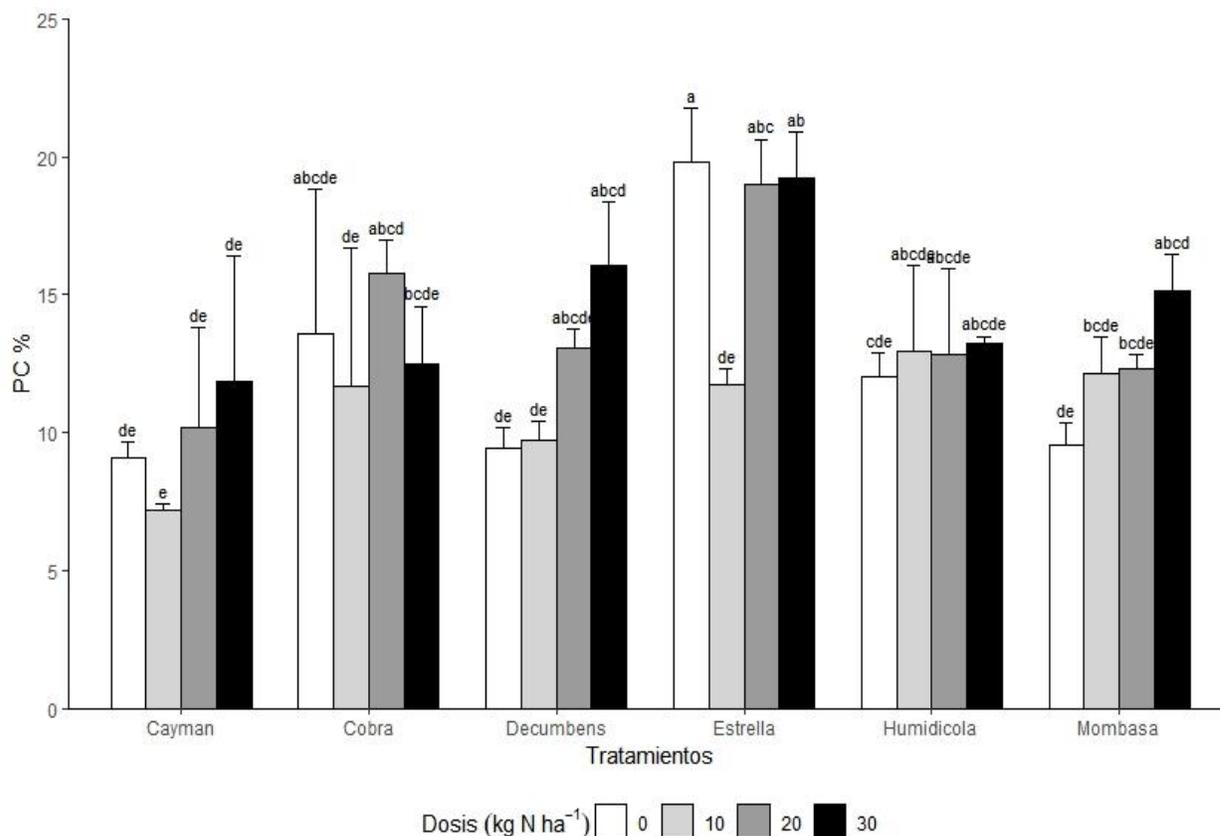
4.2.3 Calidad nutricional

Porcentaje de proteína cruda. En la prueba medias de Tukey (Figura 29), se encontró que el tratamiento Estrella sin fertilización presentó el mayor contenido de proteína (19.8 %), debido probablemente a que, al no ser fertilizada, la madurez

fisiológica fue menor propiciando un mayor contenido de N en la hoja; seguida de Estrella a una dosis de 30 kg N ha⁻¹ (19.2 %). En las demás especies forrajeras, el aumento de este parámetro fue proporcional al aumento en las dosis. Los tratamientos sin fertilización presentaron los menores valores. En Decumbens el contenido de proteína fue mayor con la dosis de 30 kg N ha⁻¹, contrastando frente a su testigo (0 kg N ha⁻¹) en donde el contenido de proteína fue menor (9.5). Cobra a una dosis de 20 kg N ha⁻¹ tuvo el mayor valor (13.6%) su testigo el menor con 11.7%). El Mombasa, y En Humidicola las diferencias entre las dosis fue menor, pero fue proporcional al aumento de las dosis, con 30 kg N ha⁻¹ el valor fue de 15.1 y 13.2 % PC respectivamente, y el menor con 0 kg N ha⁻¹ (9.5 y 12 % respectivamente).

Figura 29

Contenido de proteína cruda (PC) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Datos proyecto CIAT-YARA

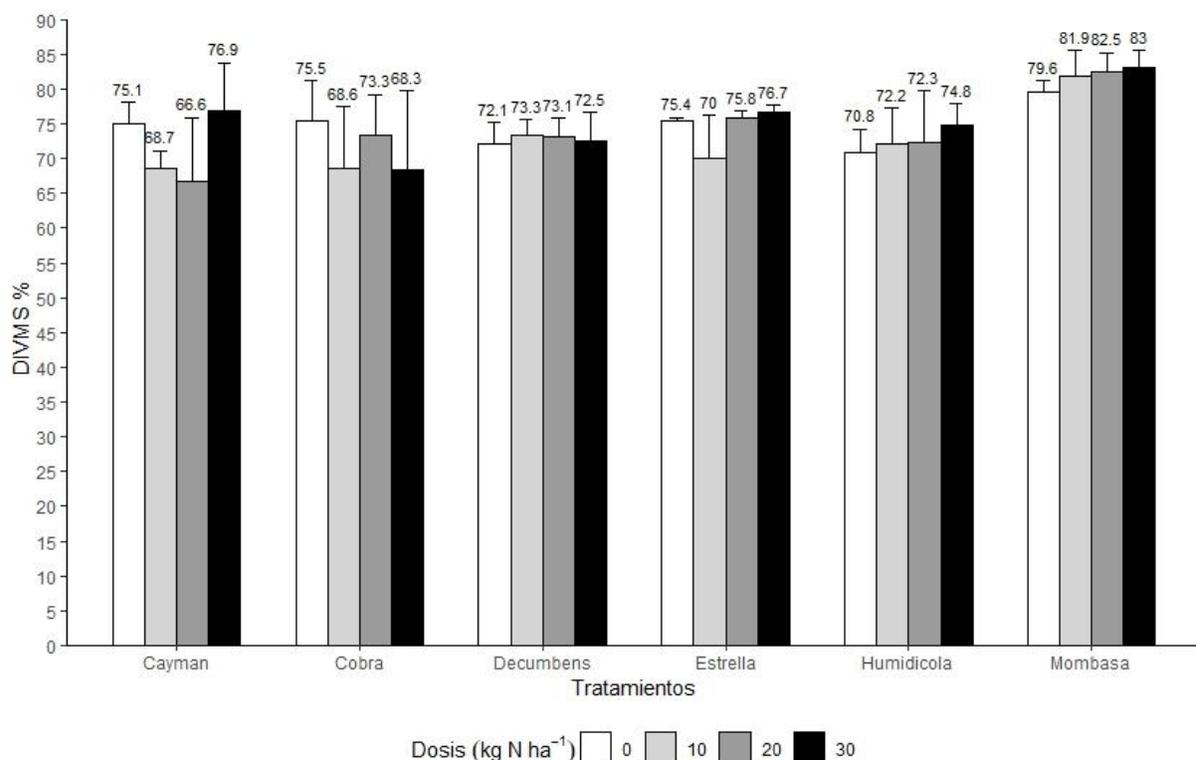
Valores representan la media ± desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

El cultivar Cayman con 30 kg N ha⁻¹ presentó el mayor valor (10.2 %) el menor contenido lo tuvo sin la aplicación de N (7.2 %), siendo el último tratamiento en la comparación de medias. Según Gándara et al., (2017) el aumento de las dosis de fertilización ocasionan un aumento similar en contenido de proteína, además que esta puede aumentar el doble con respecto al tratamiento sin fertilizar. Méndez et al., (2019) comprobaron que el contenido de proteína en Estrella subía mediante el aumento en la dosis de N, sin embargo el valor máximo fue mucho menor al encontrado en el presente estudio (7.24%); los valores centrados por Fioreli et al., (2018) fueron similares en donde el contenido de PC fue de 21.36%. En Mombasa Galindo, Buzetti, Filho, & Dupas, (2019) evaluaron diferentes tasas de fertilización nitrogenada (0, 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹) encontrando un aumento gradual de proteína (9.5, 10.1, 10.5, 13.1 y 13.7 % respectivamente); a pesar de que las dosis utilizadas fueron mayores, los valores de proteína se asemejan a los encontrados en el presente estudio. Por otro lado Lopes et al., (2005) reportó aumento en la proteína de pasto elefante, pasando de 14.2 a 16.5% mediante la aplicación de 100 y 400 kg de N ha⁻¹ respectivamente.

Digestibilidad In-vitro de la materia seca. Se realizó la comparación de medias de Tukey (Figura 30), se muestra que la mayor DIVMS la presentó Mombasa con las diferentes dosis (30, 20, 10 y 0 kg N ha⁻¹) con 83, 82.5, 81.9 y 79.6 % DIVMS respectivamente. Se logra apreciar un ligero aumento en la digestibilidad con el aumento en la fertilización, siendo este factor que contribuye a mejorar la calidad nutricional de los forrajes (Cerdas R., 2011). La DIVMS para los genotipos evaluados fue mayor (más de 70 % DIVMS) a la considerada por Peters et al., (2011) y (Arango et al., 2016).

Figura 30

Digestibilidad in vitro de materia seca (DIVMS) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3.

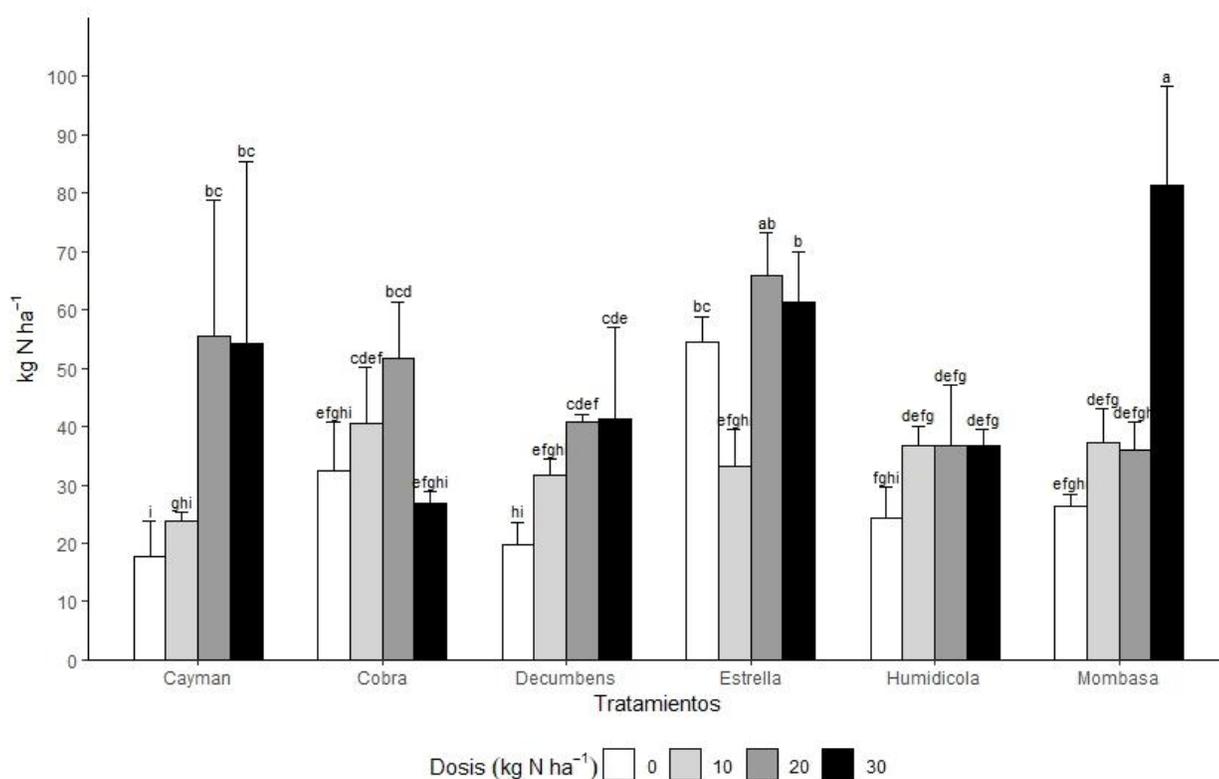
4.2.4 Absorción de nitrógeno

En la comparación de medias de Tukey (Figura 31) la mayor absorción de N la presentaron los tratamientos Mombasa a una dosis de 30 kg N ha⁻¹ con una absorción en el forraje de 81.4 kg N ha⁻¹, seguida de Estrella a 20 kg N ha⁻¹ (65.8 kg N ha⁻¹), Estrella a 30 kg N ha⁻¹ (61.2 kg N ha⁻¹) y Cayman a 20 kg N ha⁻¹ con 55.4 kg N ha⁻¹.

Si se analiza por especie, es importante resaltar el aumento de 45.3 kg N ha⁻¹ en Mombasa a una dosis de 30 kg N ha⁻¹ en comparación con el testigo (0 kg N ha⁻¹). En estrella se aprecia que la mayor absorción se dio a una dosis de 20 kg N ha⁻¹, sin embargo, el menor valor se presentó a una dosis de 10 kg N ha⁻¹. En Cayman se aprecia una curva de absorción, siendo la dosis 20 kg N ha⁻¹ la que ocasionó la mayor absorción, la menor se dio sin la aplicación de N siendo el tratamiento con menor absorción (17.6 kg N ha⁻¹). En Cobra se aprecia un aumento proporcional en la absorción de nitrógeno y el aumento de las dosis hasta 20 kg N ha⁻¹, en donde encontró la máxima absorción (51.6 kg N ha⁻¹).

Figura 31

Absorción de nitrógeno (kg N ha^{-1} pastoreo $^{-1}$) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media \pm desviación estándar, $n = 3$. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

Para Decumbens la fertilización con 20 y 30 kg N ha^{-1} no presento gran diferencia (40.9 y 41.4 kg N ha^{-1} en el forraje) pero si fue significativamente mayor que con las dosis 0 y 10 kg N ha^{-1} (19.8 y 31.7 kg N ha^{-1}). En Humidicola no se aprecian diferencias para esta variable frente a las diferentes dosis (10, 20 y 30 kg N ha^{-1}) con una absorción de 36.7, 36.8 y 36.7 respectivamente, pero si es significativamente mayor que sin la aplicación de N con 24.4 kg N ha^{-1} . La extracción o cantidad de macroelementos por hectárea de la forrajera Tithonia presentó una tendencia conforme se incrementaba la dosis de nitrógeno aplicado, pero solo la diferencia entre la aplicación de 100 kg y 200 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Cerdas, 2018). Por otro lado Galindo, Buzetti, Filho, & Dupas, (2019) no encontraron diferencias estadísticas en el rendimiento en *M. maximus* cuando se evaluó bajo la fertilización.

4.2.5 Uso eficiente del nitrógeno

La disponibilidad de N debe ajustarse a la necesidad de la dinámica temporal de un cultivo, en los forrajes en general, la dosis que permite obtener la mayor eficiencia en la fertilización nitrogenada es 20 kg de N ha⁻¹, con un 93% de eficiencia. Para este análisis se realizó la comparación de medias de Tukey para el factor Dosis (Tabla 13).

Tabla 13

Comparación de medias de Tukey del factor Dosis nitrogenada para la variable UEN en respuesta a diferentes dosis de N

Dosis (kg N ha ⁻¹)	UEN %	groups
20	93	a
30	70	a
10	47	ab
0	0	b

Los valores representan la media. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

En la tabla 14 se aprecia la comparación de medias por genotipo. Al fertilizar las gramíneas con la fuente de N adecuada a diferentes dosis Cayman, Mombasa, Decumbens Humidicola y Cobra son las especies con mayor UEN (93, 85, 74, 56 y 40 % respectivamente). Además, que estrella es una especie con baja eficiencia en el uso de nitrógeno si no se aplica la cantidad óptima.

Tabla 14

Comparación de medias de Tukey del factor Especie para la variable UEN en respuesta a diferentes dosis de N

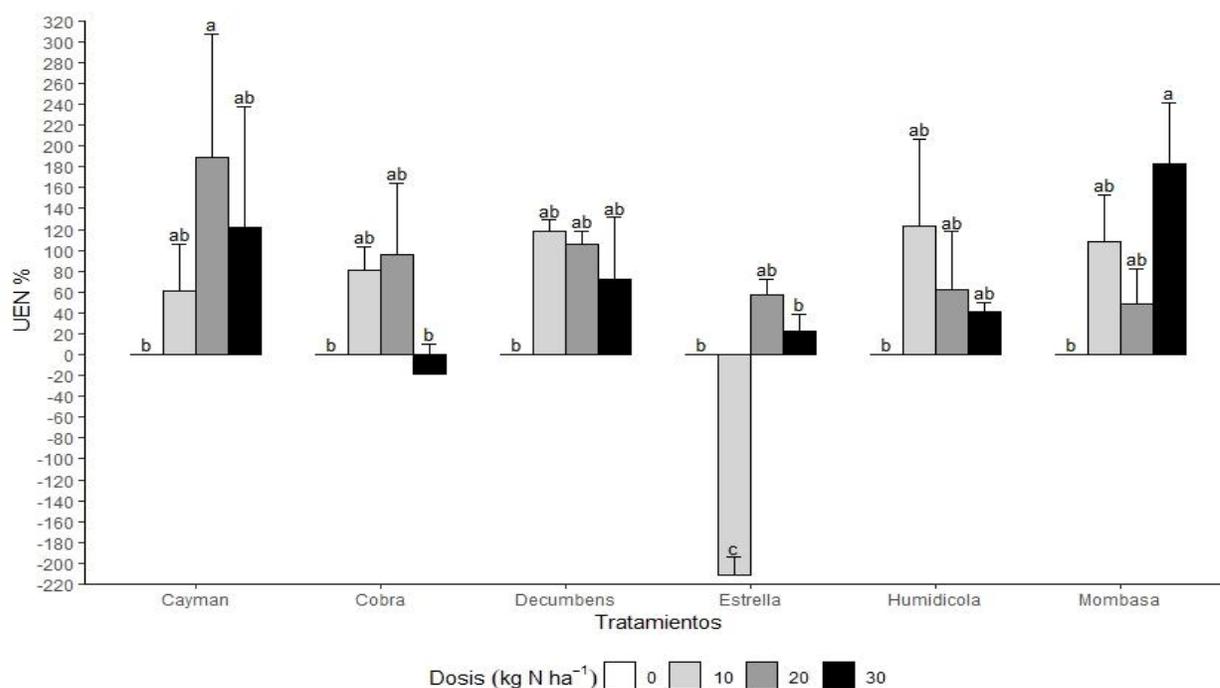
Especie	UEN	groups
Cayman	93	a
Mombasa	85	a
Decumbens	74	a
Humidicola	56	a
Cobra	40	a
Estrella	-33	b

Los valores representan la media. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

El UEN es el mejor indicador para determinar el punto óptimo en la aplicación de N, ya que incorpora las variables de productividad y calidad nutricional en el forraje en función a la cantidad del fertilizante aplicado (Lammerts van Bueren & Struik, 2017). En la figura 32 se muestra el resultado de la combinación de los factores, de esta se puede decir que Cayman con 20 kg N ha⁻¹ y Mombasa con 30 kg N ha⁻¹ son los tratamientos con mayor UEN (189 y 183% respectivamente). Se aprecia una curva de asimilación de N, con la que es posible determinar la dosis óptima de aplicación. En Cayman, Cobra y Estrella se alcanzó a 20 kg N ha⁻¹ encontrándose entre las dosis del extremo inferior (0 kg N ha⁻¹) y el extremo superior (30 kg N ha⁻¹) con 189, 96 y 57 % respectivamente).

Figura 32

Uso eficiente de nitrógeno (UEN) en seis especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Datos proyecto CIAT-YARA

Valores representan la media ± desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

En Decumbens y Humidicola si bien a 10 kg N ha⁻¹ se dio el mayor UEN, no se puede determinar el punto óptimo de aplicación, ya que no hay una curva que permita deducir que a una dosis menor, se obtenga un mayor valor para esta variable. Lo mismo ocurre para Mombasa en donde el mayor UEN fue con 30 kg N

ha⁻¹, no es posible determinar si con dosis mayores la eficiencia sea proporcional y por tanto sea otro el punto óptimo de aplicación. Además, se puede apreciar que Estrella es una especie con bajo UEN. En los forrajes tropicales existe suficiente variación genética para mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno, y puede ser complementada con el manejo agronómico, el conocimiento de la fisiología del cultivo y las estrategias de selección. Los ganaderos pueden contribuir a optimizar la EUN de los sistemas, produciendo carne con especies y cultivares con una alta eficiencia en el uso de nitrógeno, es decir, que producen una gran cantidad de biomasa de buena calidad nutricional cosechable, por unidad de N suministrada a través de fuentes y dosis óptimas de fertilizantes.

4.3 Objetivo específico 3. Evaluar el flujo del nitrógeno (planta-suelo-ambiente) en los genotipos forrajeros que sean contrastantes con alto y bajo UEN

4.3.1 Comportamiento climático durante el tiempo de evaluación

El desarrollo de este objetivo en campo se realizó simultáneo al objetivo 2. En la figura 33 se presentan las condiciones climáticas durante el periodo de evaluación de emisión de óxido nitroso, las precipitaciones se presentaron en el día 0, 1, 2 y en menores proporciones en el día 4 con 14, 27, 16 y 2 mm respectivamente, y sin precipitaciones en el resto de días. Por otro lado, la temperatura fue constante, oscilando entre los 22.7 y 25.5 °C.

4.3.2 Flujos diarios de N₂O

La Figura 34 de flujos diarios de óxido nitroso para Cayman A 0 kg de N ha⁻¹, indica que las emisiones de N₂O fue cercana a 0, los mayores valores se dieron con la aplicación de 30 kg de N ha⁻¹. Además se aprecia que los picos en las emisiones se dieron en el segundo y tercer día posterior a la aplicación de fertilizantes, estas fueron disminuyendo paulatinamente y encontraron estabilidad después del día 7 de medición. Si se observa el comportamiento climático durante la evaluación (figura 33) los mayores flujos se dieron posterior a las precipitaciones.

Figura 33

Comportamiento climático durante la medición de gases (N_2O)

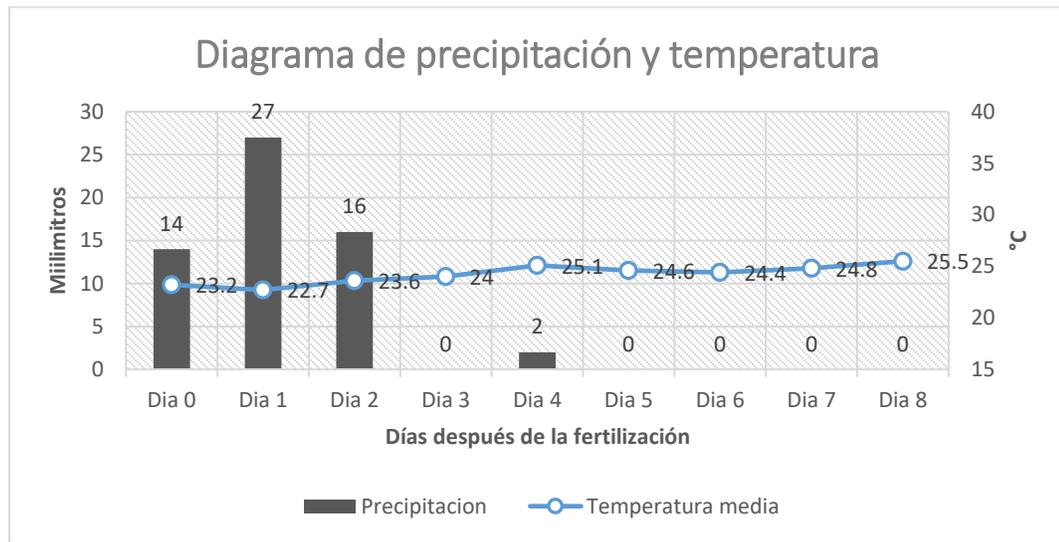
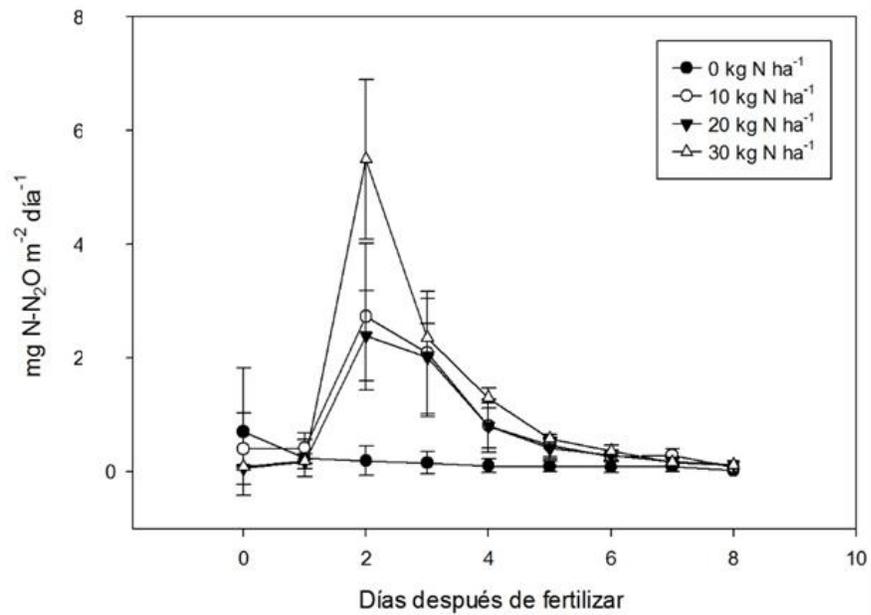


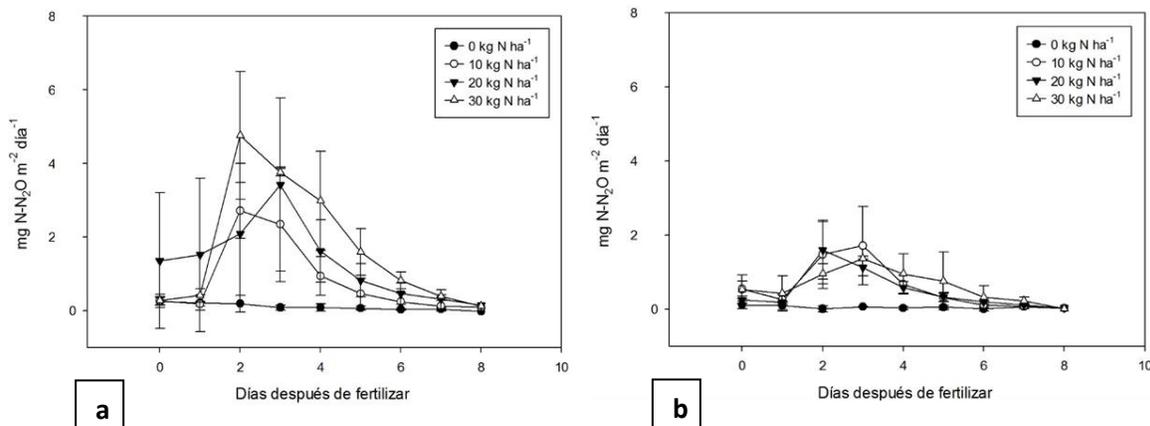
Figura 34

Flujos diarios de N_2O para Cayman



Para la especie Estrella y Mombasa, el comportamiento diario en emisiones fue similar a Cayman, encontrando los máximos valores en el segundo y tercer día posterior a la aplicación de N y emisiones mínimas en los controles (sin la aplicación de N). En Mombasa no se aprecia diferencias en las emisiones diarias entre las diferentes dosis (Figura 35).

Figura 35
Flujos diarios de N₂O. a. Estrella; b. Mombasa

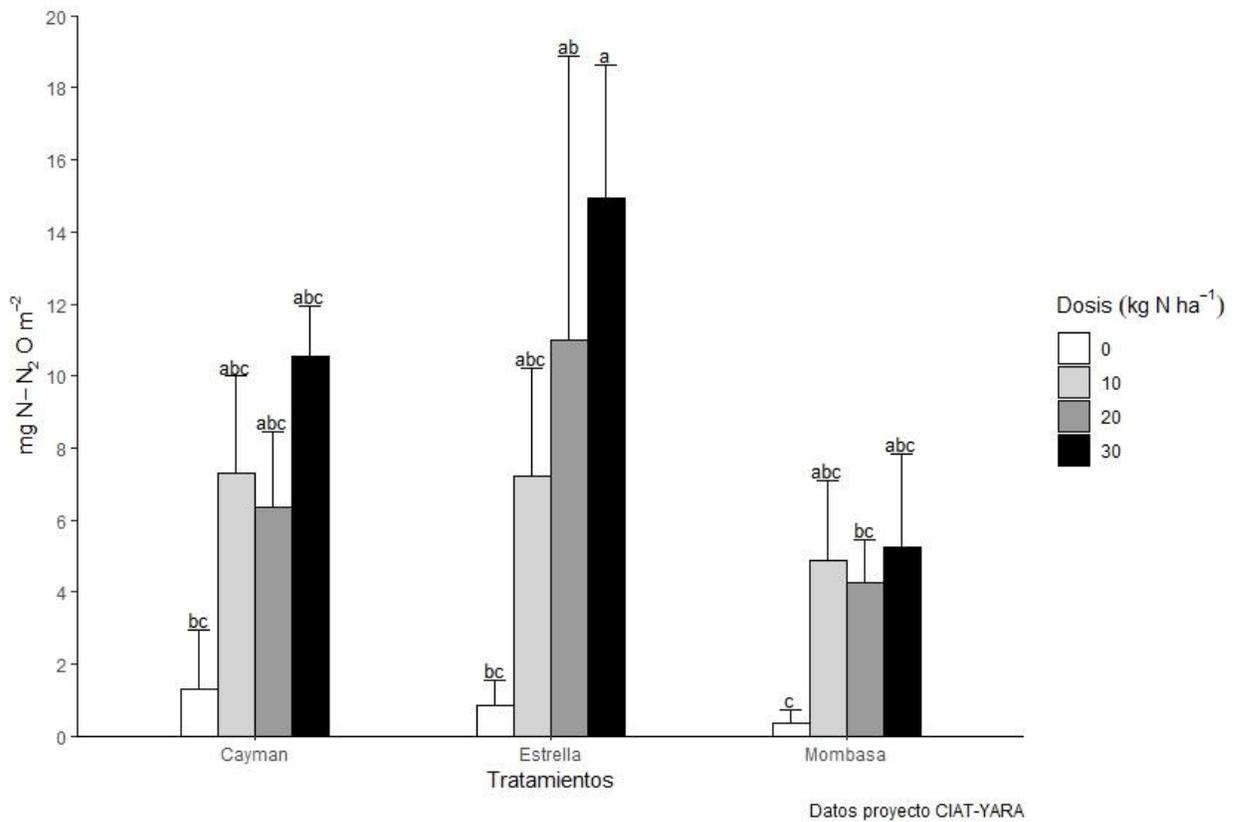


4.3.3 Flujos acumulados

El análisis de varianza ANOVA indicó que existen diferencias estadísticas entre los tratamientos, en la comparación de medias Tukey se encontró que para los flujos acumulados durante el transcurso de evaluación, existe una relación proporcional entre el aumento en las dosis y el aumento en las emisiones de N₂O (figura 36). Estrella, Cayman y Mombasa con 30 kg N ha⁻¹ presento las mayores emisiones (14.92, 10.54 y 5.25 mg N-N₂O m⁻² respectivamente), mientras que sin aplicación de N las emisiones fueron mucho menores (0.85, 1.31 y 0.38 mg N-N₂O m⁻² respectivamente). Se aprecia además que las especies fertilizadas con Nitromag (Estrella y Cayman) presentaron mayores emisiones que Mombasa fertilizada con Urea. Mombasa es una especie con baja tasa de emisiones de N₂O, en el estudio de inhibición biológica de nitrificación en una colección de *M. maximus*, Villegas et al., (2020) encontró resultados similares. Los resultados presentados representan los flujos acumulados durante 8 días posterior a la aplicación de N, aunque el patrón de emisiones no cambia significativamente se recomienda realizarlas durante todo el ciclo de recuperación de los pastos.

Figura 36

Flujos acumulados de N₂O en tres especies forrajeras de trópico bajo como respuesta a tres dosis de N



Valores representan la media \pm desviación estándar, n = 3. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey HSD.

Las menores emisiones de N₂O en Mombasa pueden encontrar explicación en tres hipótesis.

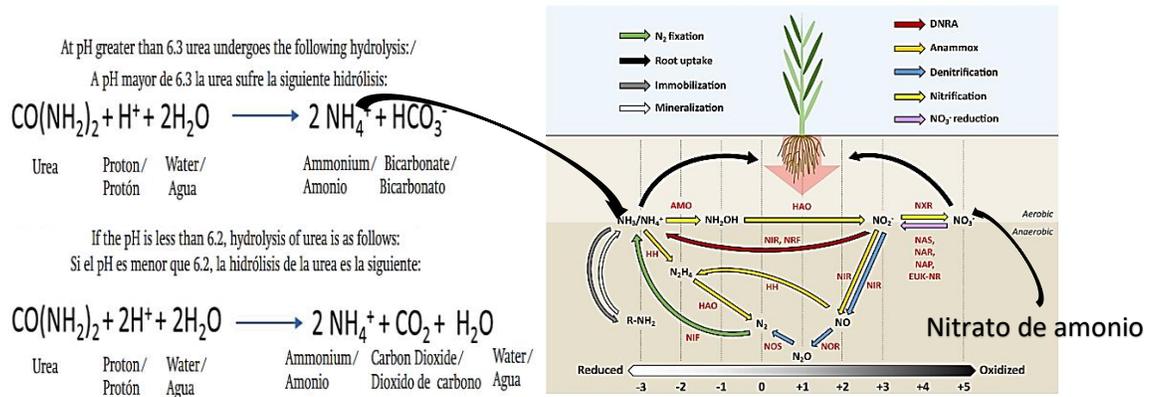
- **Capacidad BNI.** La nitrificación es la principal causa de emisiones de N₂O en los suelos agrícolas del trópico, esta es llevada a cabo por microorganismos autótrofos y heterótrofos (Soares et al., 2016). En otros estudios se ha observado que las plantas con alta capacidad de BNI reducen las emisiones de N₂O (Byrnes et al., 2017; Subbarao et al., 2006). Según Villegas et al. (2020) la capacidad de BNI de Mombasa puede disminuir las emisiones de N₂O de un 30 a 70%.

- **Fuente nitrogenada.** Es probable que las menores emisiones en Mombasa se deba a que las otras dos gramíneas se fertilizaron con Nitromag, la cual tiene una ruta de transformación más rápida que la Urea, ya que la disponibilidad de

nitrato es inmediata. En contraste para que la Urea esté disponible para la planta (NO_3^- y NH_4^+) primero se hidroliza, haciendo que el ciclo sea más lento (Figura 37) (Coskun, Britto, Shi, & Kronzucker, 2017; De Jesús Rodríguez-Jiménez, Ojeda-Barrios, Blanco-Macías, Valdez-Cepeda, & Parra-Quezada, 2016).

Figura 37

Hidrólisis de la Urea y proceso de reducción a NO_3^- en el suelo

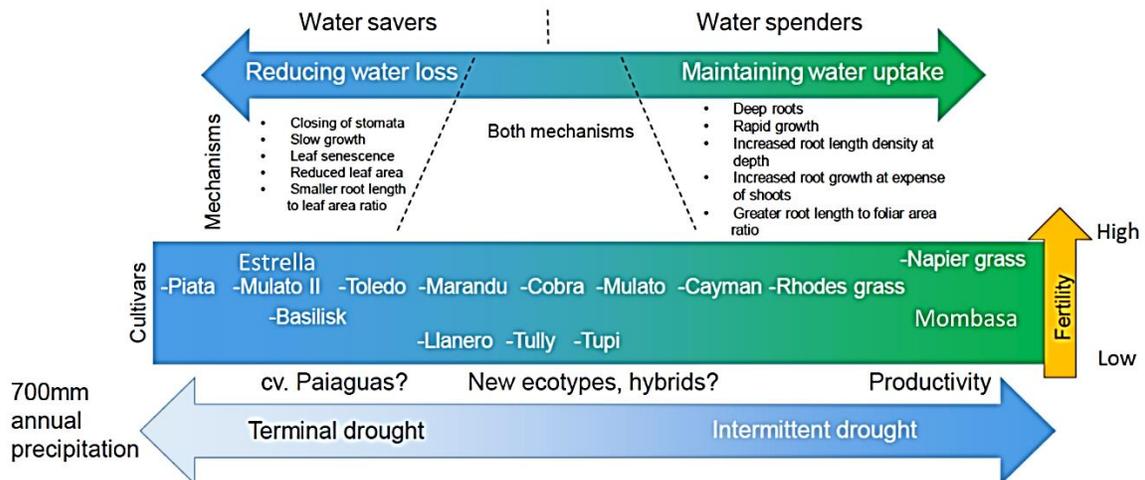


Fuente: Modificado de (Coskun et al., 2017; De Jesús Rodríguez-Jiménez et al., 2016).

- **Especie.** Las especies forrajeras pueden ser catalogadas como ahorradoras o gastadora de agua; Mombasa al ser una especie gastadora de agua (Figura 38), una vez recibió las precipitaciones al inicio de la evaluación probablemente asimilo el agua disponible rápidamente (Cardoso, Pineda, Jiménez, Vergara, & Rao, 2015).

Figura 38

Clasificación de gramíneas según los requerimientos hídricos

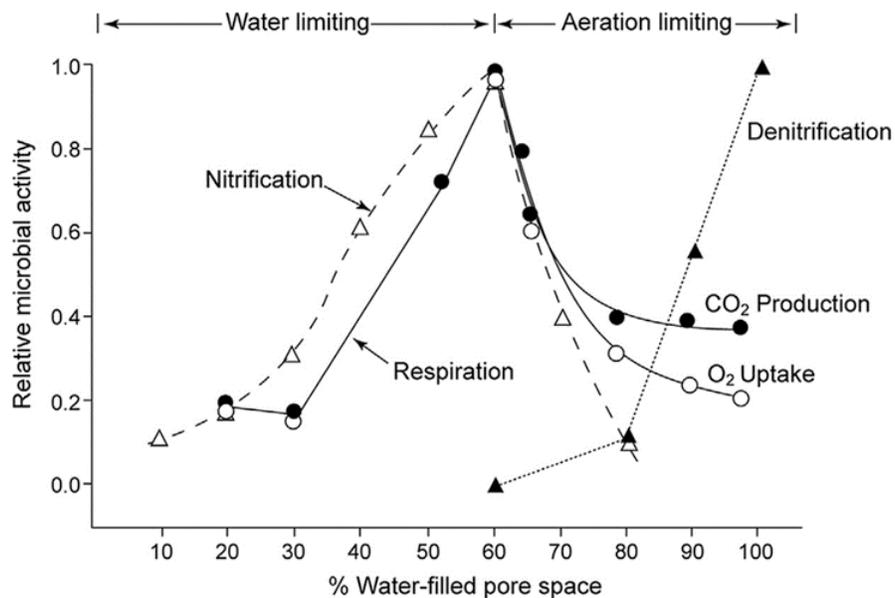


Fuente: Juan A. Cardoso (CIAT), unpublished.

Las tasas de actividad biológica en el suelo aumentan cuando la humedad y la temperatura son favorables, conduciendo a una mayor actividad microbiana y al potencial de altas tasas de mineralización e inmovilización del N. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede atribuir las menores emisiones de N_2O al consumo de agua asociado a Mombasa, ya que puede disminuir el espacio poroso lleno de agua (WFPS) en comparación con los otros tratamientos. Según Robertson & Groffman, (2015) cuando WFPS es cercada a 60% la nitrificación en el suelo es máxima, facilitando la transformación de amonio a nitrato y permitiendo vías de transformación a N_2O (Figura 39).

Figura 39

Relación entre el espacio poroso lleno de agua (una medida de la disponibilidad de humedad del suelo) y la cantidad relativa de actividades microbianas



Fuente: Linn & Doran (1984)

Cuando se calculó este valor en los tratamientos, para Mombasa (Figura 40) fue menor a 60%, lo cual indica que hay posibilidad de transformación a nitrato.

4.3.4 Relación entre productividad, UEN y emisiones de N_2O

En la figura 41 se aprecia un resumen de la producción de materia seca, emisiones de N_2O y UEN, en Cayman y Estrella el pico de productividad entre las tres dosis (10, 20, 30 kg N ha⁻¹), se encontró a 20 kg de N ha⁻¹, siendo este el punto óptimo de fertilización, además se encontró que en esta dosis las emisiones fueron menores. En Mombasa el pico no fue visible, la mayor productividad se dio cuando se aplicaron 30 kg de N ha⁻¹. En Estrella no se observaron diferencias en la producción, pero si en las emisiones, indicando que es una especie con un bajo UEN.

Figura 40

Espacio poroso lleno de agua en Cayman, Estrella y Mombasa a una dosis de fertilización de 30kg N ha⁻¹

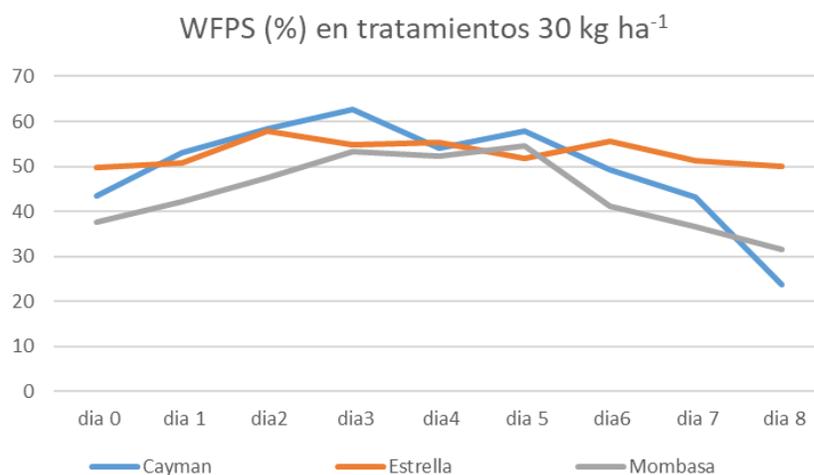
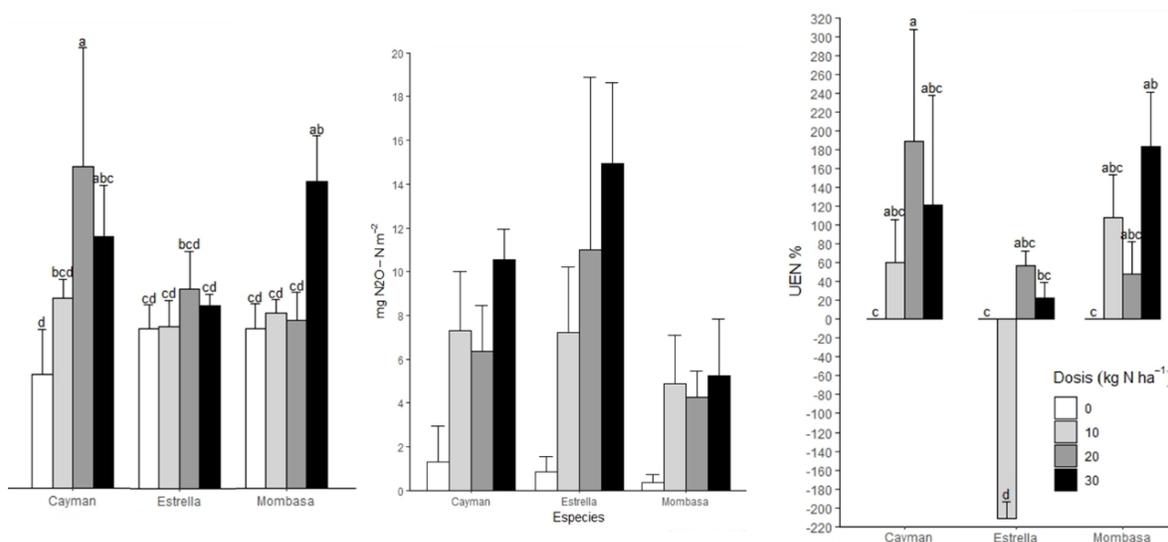


Figura 41

Gráficas de producción, emisiones de N₂O y UEN para Cayman, Estrella y Mombasa en respuesta a tres dosis de N



4.3.5 Intensidad de emisiones

Teniendo en cuenta los resultados de producción de materia seca y emisiones totales de N₂O, se realizó el cálculo de la cantidad de gases emitidos (µg N-N₂O) por kg MS⁻¹ producido (Tabla 15). Cayman con una dosis de 20 kg de N ha⁻¹ tuvo la

mayor producción de MS que con 30 kg N ha⁻¹ (22% más) y un 47% menos en emisiones, la intensidad de emisiones fue de 1.65 µg N-N₂O kg MS⁻¹. En Estrella la dosis 20 kg de N ha⁻¹ permitió un aumento en la productividad y disminución en la emisión de gases con respecto a las demás dosis, la intensidad de emisiones fue de 4.6 µg N-N₂O kg MS⁻¹. Mombasa con 30 kg de N ha⁻¹ presento un aumento aproximado del 60% en la productividad de material seca, a un costo en emisiones muy bajo (1.43 µg N-N₂O kg MS⁻¹). Es importante aclarar que los cálculos se hacen en base a los flujos acumulados durante los 9 días de medición, aunque las emisiones al finalizar se estabilizaron (valores cercanos a 0) y el patrón de emisiones hasta el día de pastoreo será el mismo, se recomienda monitorear el flujo durante todo el ciclo de recuperación.

Tabla 15

Intensidad de emisiones de N₂O por kilogramo de materia seca de forraje producido

Tratamiento	Dosis (kg N ha ⁻¹)	Producción (kg MS ha ⁻¹ pastoreo-1)	Emisiones N ₂ O acumuladas (µg N-N ₂ O m ⁻²)	Intensidad de emisiones (µg N-N ₂ O kg MS ⁻¹)
Cayman	0	1359	1312.5	0.97
Cayman	10	2280	7306.3	3.2
Cayman	20	3855.9	6350.1	1.65
Cayman	30	3014	10537.1	3.5
Estrella	0	1906	848.2	0.45
Estrella	10	1933.3	7210.7	3.73
Estrella	20	2393.4	11007.5	4.6
Estrella	30	2186.7	14920.5	6.82
Mombasa	0	1906.7	376.2	0.2
Mombasa	10	2093.3	4890.1	2.34
Mombasa	20	2013.3	4243.2	2.11
Mombasa	30	3680.2	5245.5	1.43

4.4 Objetivo específico 4. Determinar el punto óptimo económico en la aplicación de N, el cual genere la mayor rentabilidad para el productor.

4.4.1 Costos e ingresos

En la Tabla 16 se presentan los resultados del análisis de costos e ingresos estático con degradación progresiva para la pastura Cayman, bajo el tratamiento de 20 kg N ha⁻¹ de Nitromag y su control. Lo más notorio de ambos escenarios es que el promedio de la utilidad neta para el horizonte productivo de diez años es negativo, el costo operativo promedio por año, en ambos casos, es mayor que los ingresos brutos promedio. Sin embargo, el desempeño de Cayman fertilizado es notoriamente mejor que el Cayman control. El uso del fertilizante triplicó (aumento del 200%) el ingreso bruto obtenido en la hectárea hipotética, elevando los costos operativos en un 150%.

El aumento marcado de los costos operativos se debió principalmente a un aumento en el costo más relevante del ejercicio de producción bajo sistema de ceba y levante: la compra de los destetos para engorde. En vista que la aplicación del fertilizante (20 kg N ha⁻¹) permite a la hectárea cultivada en Cayman soportar casi tres veces más animales, el costo de compra de animales para engorde, linealmente, casi se triplicó. El impacto sobre el ingreso bruto no fue el suficiente para hacer rentable la alternativa de implementar Cayman, pero logró reducir la brecha entre costo operativo e ingreso en un 73%, además de recortar el precio unitario de producción por kg en pío cebado en alrededor de mil pesos en términos absolutos, o una caída de 17% en términos relativos.

Tabla 16.

*Parámetros comparativos de costos e ingresos para Cayman tratamiento y control.
Horizonte productivo de diez años.*

Parámetro	Cayman (Nitromag 20 kg N ha⁻¹)	Cayman Control
Capacidad de carga inicial (animales/ha)	15.22	5.36
Capacidad de carga promedio (animales/ha)	12.62	4.45
Establecimiento pradera (\$/ha)	4381627	4381627
Establecimiento cerca eléctrica (\$/ha)	1761548	1761548
<u>Costos inversión año 0 (\$)</u>	<u>6143175</u>	<u>6143175</u>
Promedio compra de animales (\$/ha/año)	15438993	5440748
Promedio costo mantenimiento (\$/ha/año)	346745	286745
Promedio costo de transporte agroinsumos (\$/ha/año)	18000	6000
Promedio costo mano de obra permanente (\$/ha/año)	5049635	1779507
Promedio costo sanidad animal (\$/ha/año)	1434757	505613
Promedio costo arrendamiento de la tierra (\$/ha/año)	1518996	1518996
<u>Costo operativo promedio por año (\$)</u>	<u>23807126</u>	<u>9537608</u>
<u>Ingresos brutos promedio por año (\$)</u>	<u>23422240</u>	<u>7806685</u>
<u>Costo unitario de producción (\$/Kg)</u>	<u>4467</u>	<u>5405</u>
<u>Promedio utilidad neta (\$/ha/año)</u>	<u>-490578</u>	<u>-1836616</u>

En la Tabla 17 se exponen los resultados de costos e ingreso para la pastura Mombasa, tanto para el tratamiento con Urea 30 kg N ha⁻¹, como para el control sin el uso de fertilizantes. A diferencia de los resultados de Cayman, lo más notorio es que en ambos escenarios para Mombasa, bajo análisis estático, son rentables. Para control y para tratamiento el promedio de utilidad neta, con horizonte a diez años, es un valor positivo; el costo operativo promedio por año es menor que los ingresos brutos promedio por año.

Además, el desempeño de Mombasa fertilización a 30 kg N ha⁻¹ es significativamente mayor que la pastura sin fertilizante. Con esta dosis hubo un impactó el ingreso bruto promedio aumentándolo en 106%, mientras que el aumento en el costo operativo promedio fue de un 77%, principalmente por el incremento en el costo de compra de los animales para engorde y la mano de obra requerida para atender una carga animal de casi el doble en promedio. Este mayor impacto sobre el ingreso que en los costos, significó que la utilidad neta promedio del tratamiento con fertilizante fuera cuatro veces mayor que con el uso de la pastura sin fertilizar.

El uso de fertilización llevó a un costo unitario de producción casi 600 pesos menor por kg en píce cebado, o lo que es lo mismo, una reducción del 15% en dicho parámetro con respecto al costo unitario sin uso de fertilizante.

Tabla 17.

Parámetros comparativos de costos e ingresos para Mombasa tratamiento y control. Horizonte productivo de diez años.

Parámetro	Mombasa (Urea 30 kg N ha⁻¹)	Mombasa Control
Capacidad de carga inicial (animales/ha)	14.53	7.53
Capacidad de carga promedio (animales/ha)	8.98	4.65
Establecimiento pradera (\$/ha)	4104628	4104628
Establecimiento cerca eléctrica (\$/ha)	1761548	1761548
<u>Costos inversión año 0 (\$)</u>	<u>5866175</u>	<u>5866175</u>
Promedio compra de animales (\$/ha/año)	10990665	5695782
Promedio costo mantenimiento (\$/ha/año)	346745	286745
Promedio costo de transporte agroinsumos (\$/ha/año)	12000	6000
Promedio costo mano de obra permanente (\$/ha/año)	3594719	1862921
Promedio costo sanidad animal (\$/ha/año)	1021371	529313
Promedio costo arrendamiento de la tierra (\$/ha/año)	1518996	1518996
<u>Costo operativo promedio por año (\$)</u>	<u>17484497</u>	<u>9899757</u>
<u>Ingresos brutos promedio por año (\$)</u>	<u>23593847</u>	<u>11465970</u>
<u>Costo unitario de producción (\$/Kg)</u>	<u>3262</u>	<u>3818</u>
<u>Promedio utilidad neta (\$/ha/año)</u>	<u>6003657</u>	<u>1460520</u>

Ahora, seleccionando los resultados de ambos tratamientos para el análisis estático de costos e ingresos con degradación progresiva de las pasturas, sus principales parámetros se pueden comparar en la Tabla 18. Como ya se había presentado, el tratamiento de Cayman bajo una dosis de 20 kg N ha⁻¹ (con Nitromag) arrojó un promedio de utilidad neta negativo, mientras que el de Mombasa bajo 30 kg N ha⁻¹ (con Urea) tuvo un registro positivo, además de ser el mejor desempeño entre los cuatro escenarios analizados.

Sin embargo, resulta peculiar que Cayman tratamiento haya registrado un promedio de carga animal por hectárea mayor que Mombasa. El tratamiento con 20 kg N ha⁻¹, de hecho, aumentó más la capacidad de carga de Cayman que el tratamiento de 30 kg N ha⁻¹ a Mombasa. Es más, el ingreso bruto promedio en ambos casos con

tratamiento es muy similar, 23.6 millones de pesos en el caso de Mombasa, y 23.4 millones de pesos para Cayman. El diferencial radica en los costos incurridos para alcanzar ese nivel de ingreso bruto. Mientras Mombasa generó 17.5 millones de pesos en costos operativos promedio anual, Cayman incurrió en 23.8 millones de pesos. Analizando más a fondo las diferencias en costos, se encontró que los mayores costos de Cayman se explican por aquellos que dependen directamente de la carga animal, a saber, el promedio de costo de compra de animales para engorde, el costo de la mano de obra permanente y el costo de sanidad animal. El resto de los parámetros de costos son bastante similares entre ambas pasturas fertilizadas.

Ahora, una mayor capacidad de carga animal promedio por hectárea y una degradación más lenta en el caso de Cayman a 20 kg N ha^{-1} (11.3% anual para Mombasa, 4.25% anual para Cayman), a priori indicarían una mejor capacidad de Cayman tratamiento para generar mayores ingresos y rentabilidad. Pero este no es el caso en el análisis comparativo de costos e ingreso, el productor hipotético que utiliza Cayman con esta dosis de fertilización, está generando casi el mismo ingreso con un mayor número de animales que el productor hipotético que utiliza Mombasa a 30 kg N ha^{-1} , con el efecto que esto conlleva en los costos operativos. O lo que es lo mismo, el productor con Mombasa ceba menos animales, pero alcanza el mismo ingreso bruto que el productor con Cayman. La única variable que podría explicar esto es el peso final de los animales cebados al ser vendidos a final de año, que a su vez depende de la ganancia de peso por animal por día de cada pastura. Un mayor peso final de los animales cebados repercute en que los costos operativos se diluyen en un peso para venta mayor, de ahí que el costo unitario de producción de un kg de animal cebado para Mombasa con una dosis de Urea 30 kg N ha^{-1} sea 1200 pesos (27%) menor que el de Cayman con Nitromag 20 kg N ha^{-1} .

Tabla 18.

*Parámetros comparativos de costos e ingresos para Mombasa y Cayman tratamiento.
Horizonte productivo de diez años.*

Parámetro	Mombasa (Urea 30Kg)	Cayman (Nitromag 20Kg)
Capacidad de carga inicial (animales/ha)	14.53	15.22
Capacidad de carga promedio (animales/ha)	8.98	12.62
Establecimiento pradera (\$/ha)	4,104,628	4,381,627
Establecimiento cerca eléctrica (\$/ha)	1,761,548	1,761,548
<u>Costos inversión año 0 (\$)</u>	<u>5,866,175</u>	<u>6,143,175</u>
Promedio compra de animales (\$/ha/año)	10,990,665	15,438,993
Promedio costo mantenimiento (\$/ha/año)	346,745	346,745
Promedio costo de transporte agroinsumos (\$/ha/año)	12,000	18,000
Promedio costo mano de obra permanente (\$/ha/año)	3,594,719	5,049,635
Promedio costo sanidad animal (\$/ha/año)	1,021,371	1,434,757
Promedio costo arrendamiento de la tierra (\$/ha/año)	1,518,996	1,518,996
<u>Costo operativo promedio por año (\$)</u>	<u>17,484,497</u>	<u>23,807,126</u>
<u>Ingresos brutos promedio por año (\$)</u>	<u>23,593,847</u>	<u>23,422,240</u>
<u>Costo unitario de producción (\$/Kg)</u>	<u>3,262</u>	<u>4,467</u>
<u>Promedio utilidad neta (\$/ha/año)</u>	<u>6,003,657</u>	<u>-490,578</u>

4.4.2 Indicadores de rentabilidad y análisis de sensibilidad

Los principales indicadores de rentabilidad empleados en el presente estudio se resumen en la Tabla 19. Tal como se anticipaba en los resultados de costos e ingresos, el uso de Cayman en sus dos escenarios, con Nitromag a 20 kg de N ha⁻¹ y sin fertilizante, no es rentable. Presenta un VPN negativo en ambos casos bajo análisis estático, así como TIR indefinida, puesto que la inversión inicial del año 0 nunca se recupera superado el horizonte de diez años del ejercicio, y en ese sentido, no se obtiene una tasa máxima de rentabilidad en el proyecto. La relación Costo/Beneficio que relaciona los costos con el ingreso obtenido da menor a uno, lo que indica que los costos del escenario son mayores que los ingresos que probablemente se obtendrán.

Caso contrario para Mombasa con Urea a 30 kg N ha⁻¹ y sin fertilizante, que tanto en el análisis estático como en el simulado por medio del software @RISK, arrojan

indicadores financieros que permiten establecer que en ambos casos es rentable para el productor. Tanto el VPN del ejercicio estático, como el valor medio del ejercicio simulado, son positivos y apuntan a que habrá ganancias para el productor. Del mismo modo, la TIR tanto estática como su valor medio simulado está por encima de la tasa de descuento empleada para el modelo económico, indicando que la inversión inicial se recupera durante el ejercicio productivo, y en el caso de Mombasa tratamiento, se recupera prácticamente en el primer año operativo.

Comparando numéricamente los dos tratamientos, Cayman Nitromag a una dosis de 20 kg N ha^{-1} y Mombasa Urea a 30 kg N ha^{-1} , la primera arroja un VPN de alrededor de -7.7 millones de pesos para los diez años de operación hipotéticos bajo análisis estático, y -6.9 millones de pesos en la media del ejercicio simulado, asegurando una pérdida para el productor. Mientras tanto, Mombasa reporta un VPN de 34.5 millones de pesos en el análisis estático, y de 24.2 millones en el valor medio simulado. Por otro lado, la TIR estática para Cayman tratamiento está indeterminada, y el valor medio simulado es de 12.02%. En el caso estático la inversión inicial nunca logra una tasa máxima de rentabilidad, mientras que en el ejercicio simulado se logra una tasa de retorno superior en 0.5 puntos porcentuales sobre la tasa de descuento de la inversión. Mombasa tratamiento arroja una TIR estática de 146% y un valor medio simulado de 68.88%, indicando que bajo Mombasa con Urea a 30 kg N ha^{-1} el productor hipotético alcanza una tasa máxima de rentabilidad significativamente superior a la tasa de descuento. La relación costo/beneficio en el escenario estático de Cayman Nitromag a 20 kg N ha^{-1} es de 0.94, al ser menor a uno indica que los costos siempre superan al ingreso. Mombasa con urea 30 kg N ha^{-1} , por su lado, reporta una relación costo/beneficio estática de 1.29, señalando que los ingresos superan significativamente a los costos bajo esta tecnología.

Tabla 19.

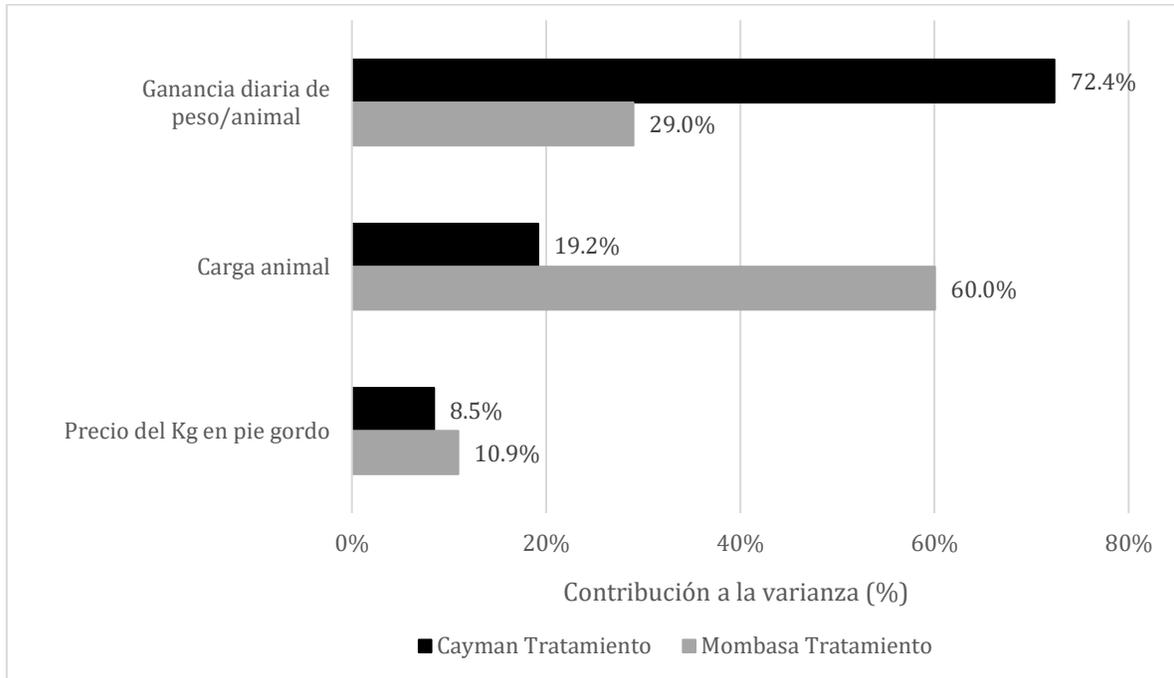
Principales indicadores financieros del análisis estático y simulación para cada una de las pasturas sin y con fertilizantes.

Criterio de decisión	Indicador	Cayman (Nitromag 20Kg)	Cayman Control	Mombasa (Urea 30Kg)	Mombasa Control
VPN	Estático	-7,673,714	-15,745,347	34,549,927	5,567,479
	Medio	-6,955,689	120,500,205	24,224,222	4,504,259
	Desviación	13,813,097	311,942,788	15,350,947	7,310,312
	IC (90%)	± 719.152	± 16.240.690	± 799.217	± 380.597
TIR	Estático	Indefinido	Indefinido	146%	29%
	Medio	12.02%	650.1%	68.88%	15.45%
	IC (90%)	± 2,16%	± 46,95%	± 2,14%	± 1,11%
Relación Beneficio/Costo	Estático	0.94	0.74	1.29	1.07

En la Figura 42 se presentan los gráficos de tornado para las variables de entrada que se detectaron como relevantes para el cálculo de la VPN en los cuatro escenarios estudiados. En el caso de Cayman tratamiento la variable de entrada que tiene mayor peso es la ganancia diaria de peso por animal y explica el 72.4% de la varianza del VPN. Las variables de carga animal de la hectárea y el precio del Kg en pío cebado explican el 19.2% y el 8.5% de la varianza del VPN para Cayman con Nitromag, respectivamente. Los efectos sobre el VPN de Mombasa tratamiento, en cambio, están más distribuidos entre las tres variables relevantes, y en este caso la más importante para explicar la varianza es la carga animal por hectárea con 60%, seguida por la ganancia diaria de peso por animal que explica el 29% de la variación, y el precio del Kg en pío gordo con 10.9% del efecto sobre la varianza.

Figura 42.

Gráfico de tornado para las variables de entrada relevantes sobre la varianza del VPN para Cayman y Mombasa tratamiento.



5. CONCLUSIONES

Basados en los resultados obtenidos, entre los forrajes tropicales existe suficiente variación genética para mejorar el UEN, y que puede ser complementada con el manejo agronómico como la utilización de fuentes y dosis óptimas de N.

La fuente nitrogenada Nitromag indujo a una mayor eficiencia en la utilización del nitrógeno por parte de los forrajes. Estrella, Cayman fertilizados con Nitromag y Mombasa con Urea presentaron la mayor eficiencia con 91.7, 87.9 y 89.9 % respectivamente.

Fuentes nitrogenadas como Nitromag y Urea permiten obtener una mayor productividad de forraje y N por hectárea en los sistemas ganaderos de clima cálido. Permitiendo aumentar hasta en un 43% estos parámetros.

La aplicación de nitrógeno mejora la calidad nutricional de los forrajes, aumentando el contenido de proteína, disminuyendo la fibra y como consecuencia mejorando la digestibilidad. Para %PC el mayor contenido lo presentó Estrella con aplicación de Amidas (15.3%), seguida de Estrella - Nitromag con 14.4% y Mombasa – Urea/sulfato de amonio con 12.9 %PC en su biomasa. Los cultivares Cobra, *B. decumbens* y Cayman sin la aplicación de nitrógeno presentaron el menor contenido con 8.4, 8.7 y 8.3 %PC respectivamente.

Como la disponibilidad de N debe idealmente ajustarse a la necesidad de la dinámica temporal de los forrajes en general, para las condiciones del ensayo, la dosis que permite obtener el mayor UEN es 20 kg de N ha⁻¹, con un 93% de eficiencia.

En los forrajes tropicales existe una curva de asimilación de N, teniendo en cuenta el UEN se puede decir que la mejor dosis para Cayman, Cobra y Estrella es 20 kg N ha⁻¹; en Decumbens y Humidicola si bien a 10 kg N ha⁻¹ se dio el mayor UEN, no se puede determinar el punto óptimo de aplicación; lo mismo ocurre para Mombasa en donde el mayor UEN fue con 30 kg N ha⁻¹, no siendo posible determinar si con dosis mayores el UEN sea mayor

Los ganaderos pueden contribuir a optimizar el UEN de los sistemas, produciendo carne con especies y cultivares con una alto UEN, es decir, que producen una gran cantidad de biomasa de buena calidad nutricional cosechable, por unidad de N suministrada a través de fuentes y dosis óptimas de fertilizantes.

Las emisiones de N₂O incrementaron proporcionalmente con la dosis de N aplicado por fertilización. El pasto Estrella es la especie que generó mayores emisiones de N₂O, seguido de Cayman, y por último Mombasa, debido probablemente a que la primera es poco eficiente en el uso de N.

Las menores emisiones en Mombasa podrían explicarse por la fuente de N empleada, la cual provee menos sustrato (respecto a Nitromag) para procesos de nitrificación/desnitrificación, o por mayor consumo de agua por parte de la planta, lo

cual reduce la actividad microbiana de nitrificantes y desnitrificantes del suelo. Una tercera hipótesis es la Actividad de inhibición biológica de la nitrificación.

Los tratamientos fertilizados que presentaron menor intensidad de emisiones fueron Cayman a 20 kg N ha⁻¹, Estrella a 20 kg N ha⁻¹ y Mombasa a 30 kg N ha⁻¹

Los resultados del ejercicio económico llevan a concluir que la mejor alternativa estudiada, tanto por su desempeño en UEN como por sus indicadores de rentabilidad, es Mombasa a una dosis de 30 kg N ha⁻¹. Además, el uso de fuentes de fertilización nitrogenadas demostró mejorar considerablemente la capacidad productiva de las dos variedades forrajeras analizadas; es decir, tanto Cayman como Mombasa fueron mejores que sus escenarios de control sin fertilización.

El análisis de costos indicó que el factor determinante para que Mombasa a 30 kg N ha⁻¹ fuera superior a Cayman a 20 kg N ha⁻¹, fue la ganancia de peso diaria por animal que logra cada cultivar. A pesar de que, en el escenario estático con degradación paulatina de las pasturas, Mombasa tiene una mayor tasa de pérdida anual de productividad (reflejada en la carga animal) frente a la tasa de Cayman, su ganancia diaria de peso es tan alta que compensa el efecto. Lo contrario sucede con Cayman, pues la ganancia diaria que alcanzan los animales es inferior. En este punto es importante mencionar, que la degradación de pasturas solo se reflejó en las cargas animales y no en la calidad nutricional de los forrajes, aspecto que debería considerarse para futuros estudios.

Lo anterior conlleva a que, si bien la hectárea cultivada en Cayman con 20 kg N ha⁻¹ logra sostener una mayor cantidad de animales en promedio durante el horizonte del ejercicio, esto también implica asumir mayores costos operativos para el mantenimiento de la hectárea; y así lograr un ingreso similar al que alcanza Mombasa con un número inferior de animales; es decir, para alcanzar la misma productividad por hectárea. Esto termina afectando el costo unitario de producción de un kilogramo de carne bajo el modelo Cayman, siendo más barato producir carne con Mombasa.

Estos resultados se mantienen en el ejercicio de sensibilidad bajo un escenario de riesgo. Además, coinciden en que las variables con mayor efecto en la variabilidad de los valores medios de los indicadores de rentabilidad son, para el caso de Cayman, la ganancia diaria de peso; característica que la relega frente a Mombasa. Mientras que para Mombasa, la variable con mayor relevancia sobre la varianza en los valores medios fue la carga animal, cuya degradación es más acelerada que la asumida para Cayman.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Santander de Quilichao. (2020). Alcaldía de Santander de Quilichao - Cauca. Retrieved November 23, 2020, from <http://santanderdequilichao-cauca.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Andreu, J., Beltran, J., Delgado, I., Espada, J., M, G., M, G., ... E, S. (2006). Fertilización Nitrogenada Guía de actualización. *Union Europea*.
- ANKOM Technology. (n.d.). Fiber Analyzer A200 | ANKOM Technology.
- Arango J; Gutiérrez JF; Mazabel J; Pardo P; Enciso K; Burkart S; Sotelo M; Hincapié B; Molina I; Herrera Y; Serrano G. (2016). Estrategias Tecnológicas para Mejorar la Productividad y Competitividad de la Actividad Ganadera: Herramientas para Enfrentar el Cambio Climático. *CIAT No. 414*, p. 58.
- Arango, J., Gutiérrez, J., Mazabel, J., Pardo, P., Enciso, K., Burkart, S., ... Serrano, G. (2016). Estrategias Tecnológicas para Mejorar la Productividad y Competitividad de la Actividad Ganadera: Herramientas para Enfrentar el Cambio Climático. In *CIAT No. 414*. Retrieved from https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/71101/CIAT_ESTRATEGIAS_TECNOLOGICAS_PARA_MEJORAR_LA_PRODUCTIVIDAD_Y_COMPETITIVIDAD_DE_LA_ACTIVIDAD_GANADERA.pdf
- Arteaga, D., Cedeño, G., Cedeño, G., Cargua, J., & Garay, M. (2019). *EFICIENCIA AGRONÓMICA DE NITRÓGENO Y PRODUCCIÓN FRECUENCIAS DE CORTE AGRONOMIC EFFICIENCY OF NITROGEN AND PRODUCTION OF Cynodon plectostachyus (K . Schum .) Pilg . DEPENDING ON TWO CUTTING*.
- Baptistella, J. L. C., de Andrade, S. A. L., Favarin, J. L., & Mazzafera, P. (2020). Urochloa in Tropical Agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(August), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- Báscones, E. (2014). Análisis de suelo y consejos de abonado. *Calidad Del Laboratorio de Analisis Agricola*, 2–57. Retrieved from https://www.larioja.org/npRioja/cache/documents/518266_inea_interpretacion_suelos.pdf;jsessionid=0F2FBABDE07705B0D39E642673FCF3BB.jvm1
- Borrero Tamayo, G. A., J., J., Ricaurte Oyola, J. J., Rivera, M., Polanía Perdomo, J. A., Núñez, J., ... Rao, I. M. (2017). *Manual de protocolos. Nutrición y fisiología de plantas - Forrajes y frijol*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/10568/89652>
- Brummell, M. E., Farrell, R. E., & Siciliano, S. D. (2012). Greenhouse gas soil production and surface fluxes at a high arctic polar oasis. *Soil Biology and Biochemistry*, 52, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.019>
- Byrnes, R. C., Núñez, J., Arenas, L., Rao, I., Trujillo, C., Alvarez, C., ... Chirinda, N. (2017). Biological nitrification inhibition by Brachiaria grasses mitigates soil nitrous oxide emissions from bovine urine patches. *Soil Biology and Biochemistry*, 107, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.029>
- Cardoso, J. A., Pineda, M., Jiménez, J. de la C., Vergara, M. F., & Rao, I. M. (2015). Contrasting strategies to cope with drought conditions by two tropical forage C 4 grasses . *AoB Plants*, 7(September), plv107. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv107>
- Carvajal, J. (2019). *Evaluación agronómica , nutricional y ambiental de 130*

- accesiones de *Megathyrus maximus* para selección en el Valle del Patía - Cauca Colombia Evaluación agronómica , nutricional y ambiental de 130 accesiones de *Megathyrus maximus* para selección en el Va. Retrieved from https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76308/2023-Juliana_Isabel_Carvajal_Tapia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cerdas R. (2011). Programa de fertilización de forrajes. *InterSedes: Revista de Las Sedes Regionales*, XII(24). Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/666/66622581007/>
- Cerdas, R. (2018). Extracción de nutrientes y productividad del botón de oro (*tithonia diversifolia*) con varias dosis de fertilización nitrogenada. *InterSedes*, 19(39), 170–187. <https://doi.org/10.15517/isucr.v19i39.34076>
- Colabelli, M., Agnusdei, M. G., Mazzanti, A., & Labreveux, M. (1998). El proceso de crecimiento y desarrollo de gramíneas forrajeras como base para el manejo de la defoliación. *Boletín Técnico N° 148*, (2), 1–12. Retrieved from http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo_sistemas/01-proceso_crecimiento.pdf
- Coskun, D., Britto, D. T., Shi, W., & Kronzucker, H. J. (2017). How Plant Root Exudates Shape the Nitrogen Cycle. *Trends in Plant Science*, 22(8), 661–673. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.05.004>
- Cruz, M. C., Rodríguez, L. C., Viera, R. G., Mouso, J. P., Muñoz, D. C., Escobar, Y. T., ... Socarrás, Y. C. (2012). Evaluación agronómica de tres gramíneas bajo condiciones edafoclimáticas. *Rev. Prod. Anim.*, 24(2).
- da Silva Santos, J. H., De Bona, F. D., & Monteiro, F. A. (2013). Growth and productive responses of tropical grass panicum maximum to nitrate and ammonium supply. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 42(9), 622–628. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000900003>
- De Jesús Rodríguez-Jiménez, T., Ojeda-Barrios, D. L., Blanco-Macías, F., Valdez-Cepeda, R. D., & Parra-Quezada, R. (2016). Ureasa y níquel en la fisiología de las plantas. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 22(2), 69–81. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.11.051>
- Del Pozo, P. P., Herrera, R. S., & García, M. (2004). Efecto de la fertilización nitrogenada en el crecimiento y desarrollo de los componentes morfológicos del pasto estrella. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola (Cuba)*, 38(2), 189–195.
- Emden, H. F. van. (2008). *Statistics for Terrific Biologists*.
- Fioreli, A. B., Ziech, M. F., Fluck, A. C., Gerei, J. C., Col, D., Berns, L., ... Costa, O. A. D. (2018). Valor nutritivo de gramíneas do gênero *Cynodon* consorciadas com amendoim forrageiro. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 70(6), 1970–1978. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-10048>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., & Dupas, E. (2019). Rates and sources of nitrogen fertilizer application on yield and quality of *Panicum maximum* cv. Mombasa. *Idesia*, 37(2), 67–73. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000200067>
- Gándara, L., Borrajo, C. I., Fernández, J. A., & Pereira, M. M. (2017). Efect of age regrowth and nitrogen fertilization on the nutritive value of *brachiaria brizantha*

- cv. "Marandú." *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(1), 69–77.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3rd ed.). Guzmán-sánchez, R. F., Beltrán-perafán, J. A., Montes-rojas, C., & Anaya, S. (2020). *MINERALIZADO EN LA PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN DE FORRAJES PARA PASTOREO EFFECT OF THE MINERALIZED LIQUID ORGANIC FERTILIZER*. 11(2), 13–27.
- IPNI. (2012). *Los 4 R equisitos*.
- Jácome, L., & Manuel Suquilanda. (2009). Fertilización Química y órgano-mineral del Pasto Mulato (*Brachiaria* Híbrido) y Xaraés. *Revista Científica de La Facultad de Arquitectura y Urbanismo*. Retrieved from file:///D:/OneDrive - CGIAR/Documents/Tesis/Bibliografía/43-Texto del artículo-72-1-10-20170914.pdf
- Kant, S., Bi, Y. M., & Rothstein, S. J. (2011). Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(4), 1499–1509. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq297>
- Lammerts van Bueren, E. T., & Struik, P. C. (2017). Diverse concepts of breeding for nitrogen use efficiency. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0457-3>
- Latimer George. (2019). *Métodos oficiales de análisis de AOAC INTERNATIONAL, 21ª edición (2019)* (21st ed.). Retrieved from https://www.aoac.org/aoac_prod_imis/AOAC/Publications/Official_Methods_of_Analysis/AOAC_Member/Pubs/OMA/AOAC_Official_Methods_of_Analysis.a_spx
- Latsague, M., Sáez, P., & Mora, M. (2014). Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio, sobre el contenido foliar de carbohidratos, proteínas y pigmentos fotosintéticos en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook.f. *Gayana - Botanica*, 71(1), 37–42. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432014000100007>
- Li, H., Hu, B., & Chu, C. (2017). Nitrogen use efficiency in crops: Lessons from *Arabidopsis* and rice. *Journal of Experimental Botany*, 68(10), 2477–2488. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx101>
- Linn, D. M., & Doran, J. W. (1984). Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1267–1272. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
- Lopes, R. dos S., Fonseca, D. M. da, Oliveira, R. A. de, Andrade, A. C., Nascimento Júnior, D. do, & Mascarenhas, A. G. (2005). Efeito da irrigação e adubação na disponibilidade e composição bromatológica da massa seca de lâminas foliares de capim-elefante. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 34(1), 20–29. <https://doi.org/10.1590/s1516-35982005000100003>
- Mejía, H. J., Aparicio, K. N., Rubi, R. D., & Ramirez, C. N. (2018). EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE EL PASTO *Brachiaria* híbrido CV CIAT BR02/1794 COMO MEDIDA DE MITIGACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 816–823. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6308>
- Melo Montes Nogueira Borges, B., Silveira, M., Cardoso, S., Moline, E., Neto, A., Lucas, F., ... Mendes Coutinho, E. (2017). Growth, Herbage Accumulation, and Nutritive Value of 'Tifton 85' Bermudagrass as Affected by Nitrogen

- Fertilization Strategies. *Crop Science*, 57.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2016.10.0890>
- Méndez, R., Fernández, J. A., & Yáñez, E. A. (2019). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y composición de *Cynodon plectostachyus*. *Revista Veterinaria*, 30(1), 48–53. <https://doi.org/10.30972/vet.3013899>
- Mohan Kumar Scholar, K., Mohan Kumar Scholar, C. K., Mohan Kumar, K., Hanumanthappa, M., Marimuthu, S., & Meenambigai, C. (2018). A review on enhancing the fertilizers use efficiency to minimize environmental impacts. ~ 2167 ~ *International Journal of Chemical Studies*, 6(3).
- Molina, I. C., Donney`s, G., Montoya, S., Rivera, J. E., Villegas, G., Chará, J., & Barahona, R. (2015). La inclusión de *Leucaena leucocephala* reduce la producción de metano de terneras lucerna alimentadas con *Cynodon plectostachyus* y *Megathyrus maximus*. *Livestock Research for Rural Development*, 27(5).
- Molina, N. L., Terrazas, L. A., & Mariazza, E. F. (2020). *Estrategias para mejorar los pastizales altoandinos : el rol del trébol y la fertilización con fósforo* *Strategies to improve High Andean rangelands : the role of clover and phosphorous fertilization*. 31(2).
- Näsholm, T., Kielland, K., & Ganeteg, U. (2009). Uptake of organic nitrogen by plants. *Tansley Review*, (2008), 275–294. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02682.x>
- Oliveira, A. B., Pires, A. J. V., Matos Neto, U. de, Carvalho, G. G. P. de, Veloso, C. M., & Silva, F. F. da. (2007). Morfogênese do capim-tanzânia submetido a adubações e intensidades de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36(4 suppl), 1006–1013. <https://doi.org/10.1590/s1516-35982007000500004>
- Ordoñez, M., Figueroa Casas, A., & Muñoz Gomez, F. (2012). *Plan Departamental de Ciencia Tecnología e Innovación del Cauca - Plan ConCiencia Cauca*.
- PAPALOTLA SEMILLAS. (2017). COBRA® *Brachiaria* híbrido cv. CIAT BR02/1794. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Pereira, V. J., de ASSIS, D. F., Lana, R. M. Q., Silva, A. de A., & Pereira, H. S. (2019). Fertilization with liquid swine manure increases productivity and improves the quality of *Urochloa decumbens*. *Bioscience Journal*, 35(6), 1862–1870. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n6a2019-46998>
- Peters, M., Franco, L. H., Schmidt, A., & Hincapié, B. (2011). Especies forrajeras Multipropósito: Opciones para productores del trópico Americano. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*, 212. Retrieved from [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Forrajes_Tropicales/pdf/Books/Especies Forrajeras MultipropositoTropico Americano.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Forrajes_Tropicales/pdf/Books/Especies_Forrajerias_MultipropositoTropico_Americano.pdf)
- Ramos-Trejo, O. S., Victoria-Graniel, C. A., & Sandoval-Gío, J. J. (2015). Season, fertilization, and yield of varieties of *Pennisetum purpureum*. *Agrociencia*, 49(8), 837–844.
- Rao, I. M., Ayarza, M. A., & Garcia, R. (1995). Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils I. Differences in plant growth, nutrient acquisition and nutrient utilization among C4 grasses and C3 legumes. *Journal of Plant Nutrition*, 18(10), 2135–2155. <https://doi.org/10.1080/01904169509365052>
- Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2015). NITROGEN TRANSFORMATIONS. In *SOIL MICROBIOLOGY, ECOLOGY, AND BIOCHEMISTRY* (Third Edit).

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50017-2>
- Sánchez, M., Valenzuela, Y., Morales, G., Rivas, M., Fraire, S., & Sánchez, S. (2019). Guinea grass (*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs) growth in response to chemical fertilization in warm humid climate. *Agroproductividad*, 12, 47–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1450>
- Santos, P. M., Thornton, B., & Corsi, M. (2002). Nitrogen dynamics in the intact grasses *Poa trivialis* and *Panicum maximum* receiving contrasting supplies of nitrogen. *Journal of Experimental Botany*, 53(378), 2167–2176. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf066>
- Serafim, R. S., & Galbiatti, J. A. (2012). Efeito da aplicação de água residuária de suinocultura na *Brachiaria Brizantha* cv Marandu. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 4(1), 185–203.
- Silva, A., Dilia, C., & Menjivar, J. (2006). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la actividad microbial y rendimiento de avena forrajera en un suelo andisol del departamento de Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 55(1), 55–63.
- Soares, J. R., Cassman, N. A., Kielak, A. M., Pijl, A., Carmo, J. B., Lourenço, K. S., ... Kuramae, E. E. (2016). Nitrous oxide emission related to ammonia-oxidizing bacteria and mitigation options from N fertilization in a tropical soil. *Scientific Reports*, 6(July), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep30349>
- Stewart, K. J., Brummell, M. E., Farrell, R. E., & Siciliano, S. D. (2012). N₂O flux from plant-soil systems in polar deserts switch between sources and sinks under different light conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.016>
- Subbarao, G., Ito, O., Sahrawat, K., Berry, W., Nakahara, K., Ishikawa, T., ... Rao, I. (2006). Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems - Challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(4), 303–335. <https://doi.org/10.1080/07352680600794232>
- Suchini, E., & Escuela, M. (2015). *Establecimiento y evaluación de parámetros productivos y agronómicos del pasto Cobra (Brachiaria híbrido CV. CIAT BR02/1794) bajo condiciones del trópico seco.*
- Teutscherova, N., Vazquez, E., Arango, J., Arevalo, A., Benito, M., & Pulleman, M. (2019). Native arbuscular mycorrhizal fungi increase the abundance of ammonia-oxidizing bacteria, but suppress nitrous oxide emissions shortly after urea application. *Geoderma*, 338(June 2018), 493–501. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.023>
- Toledo, J. M. (1982). Manual para la evaluación Agronómica RIEPT. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira*, pp. 91–110.
- Torres, A. G., Viramontes, U. F., Rangel, P. P., Hernández, G. N., & Guadalupe, J. (2016). *Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes * Efficient use and apparent recuperation of nitrogen in fodder corn at different grounds Resumen Introducción.* 7, 301–309.
- Trejo, O. R., Solis, J. C., & Vera, F. D. (2013). PRODUCCIÓN DE TRES VARIETADES DE *Pennisetum purpureum* FERTILIZADAS CON DOS DIFERENTES FUENTES NITROGENADAS EN YUCATÁN, MÉXICO

- PRODUCTION. *Revista Bio Ciencias*, 2(2), 60–68.
- Ueda, Y., Konishi, M., & Yanagisawa, S. (2017). Molecular basis of the nitrogen response in plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 63, 1–13.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1360128>
- Van Soest, P. ., Robertson, J., & Lewis, B. . (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Dairy Science*, 74, 3583–3597.
- Villegas, D., Arevalo, A., Nuñez, J., Mazabel, J., Subbarao, G., Rao, I., ... Arango, J. (2020). Biological Nitrification Inhibition (BNI): Phenotyping of a Core Germplasm Collection of the Tropical Forage Grass *Megathyrsus maximus* Under Greenhouse Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 11(June), 1–14.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00820>
- Brâncio, P., Nascimeto, Jr., Batista, V., da Fonseca, D., de Almeida, R., Motta, M., & Barbosa, R. (2003). Evaluation of three varieties of *Panicum maximum* Jacq. under grazing: Diet composition, dry matter intake and animal weight gain. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol. 32(5), 1037-1044.
- Bouathong, C., Hare, M., Losirikul, M., & Wongpichet, K. (2011). Effect of nitrogen rates on plant growth, seed yield and seed quality of three lines of brachiaria hybrid grass. *Khon Kaen Agriculture Journal*, Vol. 39, 295-306.
- Buamool, O., & Phakamas, N. (2018). Effects of different forms nitrogen fertilizer on growth and yield of four tropical pasture grass. *International Journal of Agricultural Technology*, Vol. 14(7), 1065-1076.
- Canto, M., Filho, A., de Moraes, A., Hoeschl, A., Gasparino, E. (2009). Animal production in Tanzania grass swards fertilized with nitrogen. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol. 38(7), 117-1182.
- DANE. (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) [Base de datos]. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena> (noviembre 2020)
- de Oliveira, R., Chaves, F., Miranda, J., Feliz, L., Barros, I., Araújo, V., & Restle, J. (2020). Effects of increasing nitrogen levels in Mombasa grass on pasture characteristics, chemical composition, and beef cattle performance in the humid tropics of the Amazon. *Tropical Animal Health and Production*, Vol. 52, 3293-3300.
- Delevatti, L., Cardoso, A., Barbero, R., Leite, R., Romanzini, E., Ruggieri, A., & Reis, R. (2019). Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. *Scientific Reports*, Vol. 9(1), article No. 7596
- Ecured. (s.f.). Pasto Cayman o Pasto Yacaré. Recuperado de https://www.ecured.cu/Pasto_Caym%C3%A1n_o_Pasto_Yacar%C3%A9#Persistencia (noviembre 2020)

- FEDEGAN. (2008). Índice de costos ganaderos. *Revista Carta FEDEGAN*, 17-32.
- FEDEGAN. (2013). Programa nacional de alimentación bovina – PAB. Fondo Nacional del Ganado. Recuperado de <https://www.fedegan.org.co/programas/programa-de-alimentacion-bovina> (noviembre 2020)
- Galindo, F., Buzetti, S., Filho, M., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. (2017). Application of different nitrogen doses to increase nitrogen efficiency in Mombasa guinegrass (*Panicum maximum* cv. mombasa) at dry and rainy seasons. *Australian Journal of Crop Science*, Vol. 11(12), 1657-1664.
- Guerrero, A., & Londoño, M. (2014). Análisis del cambio climático y el ambiente en las cuencas lecheras del Valle de Ubaté-Chinquinquirá y de Caquetá cómo herramienta para el fortalecimiento de la política pública del sector lechero colombiano. Recuperado de <https://propais.org.co/wp-content/uploads/ue/informe-final-ue-sector-lacteo-guerrero.pdf> (diciembre 2020)
- Hare, M., Pizarro, E., Phengphet, S., Songsiri, T., & Sutin, N. (2015). Evaluation of new hybrid brachiaria lines in Thailand. *Tropical Grasslands*, Vol. 3, 83-93.
- Hare, M., Phengphet, S., Songsiri, T., & Sutin, N. (2015). Effect of nitrogen on yield and quality of *Panicum maximum* cvv. Mombasa and Tanzania in Northeast Thailand. *Tropical Grasslands*, Vol. 3(1), 27-33.
- Holmann, F., Argel, P., Rivas, L., White, D., Estrada, R., Burgos, C., Pérez, E., Ramírez, G., & Medina, A. (2004). Degradación de pasturas y pérdidas de productividad animal: una evaluación económica desde la perspectiva de los productores y extensionistas pecuarios en Honduras. Cali, Colombia. pp. 42
- Holmann F., & Estrada, R. (1997). Alternativas agropecuarias en la región Pacifico Central de Costa Rica: un modelo de simulación aplicable a sistemas doble propósito. En Lascano, C., & Holmann, F., (Eds.), *Conceptos y metodologías de investigación en finas con sistemas de producción animal de doble propósito*. Cali, Colombia. 134-150.
- IDEAM, & U.D.C.A. (2015). Síntesis. Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. IDEAM. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf> (noviembre 2020)
- Peters, M., Franco, L., Schmidt, A., & Hincapié, B. (2010). Especies forrajeras multipropósito: opciones para productores del trópico americano. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Semillano, Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ). pp. 222.

- Pezo, D., & García, F. (2018). Uso eficiente de fertilizantes en pasturas. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Serie técnica. Boletín técnico / CATIE No. 98. pp 56.
- Pizarro, E. (2013). Un Nuevo híbrido para el mundo tropical: Brachiaria híbrida cv. CIAT BR02/1752 "Cayman". *Pasturas de América*, Junio 2013. Recuperado de <http://www.pasturasdeamerica.com/articulos-interes/notas-tecnicas/brachiaria-hibrida-cayman/> (diciembre 2020)
- Pizarro, E., Hare, M., Mutimura, M., & Changjun, B. (2013). Brachiaria hybrids: potential, forage use and seed yield. *Tropical Grasslands*, Vol. 1, 31-35.
- Tapasco, J., LeCoq, J. F., Ruden, A., Rivas, J. S., & Ortiz, J. (2019). The Livestock Sector in Colombia: Toward a Program to Facilitate Large-Scale Adoption of Mitigation and Adaptation Practices. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00061>
- Tapasco, J., Martínez, J., Calderón, S., Romero, G., Ordóñez, D. A., Álvarez, A., Sánchez-Aragón, L., & Ludeña, C. E. (2015). Impactos económicos del cambio climático en Colombia: Sector Ganadero. In Monografía No. 254. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0000131>
- Tropical Forages. (s.f.). Urochloa spp. Híbridos. En *Tropical forages*. Gobierno Australiano & Alianza Bioversity International-Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Recuperado de https://www.tropicalforages.info/text/entities/urochloa_spp._hybrids.htm (diciembre 2020)
- UPRA-SIPRA. (s.f.). Sistema para la planificación rural agropecuaria. Recuperado de <https://sipra.upra.gov.co/> (diciembre 2020)