

Artículo Científico

Estimación de la disponibilidad de forraje y de parámetros asociados a la calidad nutricional del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero a partir de imágenes multiespectrales

Estimation of forage availability and parameters associated with the nutritional quality of Urochloa humidicola cv Llanero based on multispectral images

RAÚL ALEJANDRO DÍAZ GIRALDO¹, MAURICIO ÁLVAREZ DE LEÓN¹, ÁLVARO RINCÓN CASTILLO¹, OTONIEL PÉREZ LÓPEZ¹, EDGAR CÁRDENAS ROCHA² Y WILLIAM POSADA ASPRILLA³

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria–Agrosavia. Centro de Investigación La Libertad, Meta, Colombia. agrosavia.co

²Departamento de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. bogota.unal.edu.co

³Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación GAMMA, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia. udea.edu.co

Resumen

El uso de imágenes multiespectrales en la evaluación de pasturas se ha convertido en una herramienta práctica para la gestión de los sistemas pastoriles a nivel predial, ya que estas permiten construir índices de vegetación (IV) los cuales se relacionan con diferentes características productivas y fisiológicas de las plantas. El objetivo de este estudio fue estimar la oferta de forraje y la calidad nutricional de una pastura de *Urochloa humidicola* cv Llanero a partir de IV. La oferta de forraje (OF) y la altura de planta (ALP) fueron evaluadas en campo a los 28 días de rebrote, tomando muestras para análisis espectro radiométrico y para determinar los contenidos de proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y lignina (LIG). Los vuelos se realizaron a 70 metros de altura y se evaluaron siete IV (NDVI, GCI, SRPI, SR, GNDVI, SAVI y RDVI). El análisis de los datos se realizó por medio de componentes principales (CP) y modelos aditivos generalizados (GAM). Las variables que más contribuyeron a la formación del CP1 fueron las asociadas a la calidad nutricional del pasto y para el CP2 se agruparon las variables asociadas a la disponibilidad de forraje. El índice que mejor se relacionó con la OF fue el NDVI, con un efecto significativo por parte de la ALP ($p \leq 0.001$) y para la PC con el GNDVI. Los resultados para FDN, FDA y LIG, presentaron un R^2 bajo.

Palabras claves: Ganadería de precisión, índice de vegetación, pasturas, teledetección, vehículo aéreo no tripulado.

Abstract

The use of multispectral images for pasture evaluation has become a practical tool for the management of pastoral systems at farm level, as those images allow the construction of vegetation indexes (IV) which are related to different productive and physiological characteristics of the plants. The objective of this study was to use IV for estimating the forage supply and nutritional quality of *Urochloa humidicola* cv Llanero pastures. Forage availability (OF) and plant height (ALP) were measured in the field after 28 days of regrowth, and samples were taken for spectrum radiometric analysis to determine the crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and lignin (LIG) contents. Flights were made at 70 meters and 7 vegetation indexes (NDVI, GCI, SRPI, SR, GNDVI, SAVI and RDVI) were evaluated. Data analysis was performed by using principal components (PC) and generalized additive models

Correspondencia: Raúl Alejandro Díaz Giraldo, Centro de Investigación La Libertad. Km 17, vía Puerto López, Villavicencio, Meta, Colombia. Correo electrónico: rdiazg@agrosavia.co

(GAM). The variables that contributed the most to PC1 were those associated with pasture nutritional quality and for PC2 were those associated with forage availability. NDVI was the index best related to OF with a significant effect by ALP ($p \leq 0.001$), and for CP with GNDVI. The NDF, ADF and LIG values showed low R^2 .

Keywords: Pastures, precision livestock, remote sensing, unmanned aerial vehicle, vegetation index.

Introducción

Los sistemas de pastoreo de gramíneas son la forma más económica de alimentación de rumiantes productores de carne o leche, apoyan la sostenibilidad de la producción bovina en general, contribuyen a disminuir costos, proporcionan mayor bienestar animal y no crean problemas de competencia con granos útiles para la alimentación humana (O'Mara 2012). La gestión adecuada de las áreas pastoriles es una tarea que puede ser compleja para ganaderos y técnicos, ya que en ella interactúan aspectos relacionados con la fisiología y crecimiento de las especies forrajeras, las condiciones intrínsecas de los suelos, aspectos de meteorología y de etología animal, y cada uno de ellos son agentes dinámicos que interactúan y se expresan en el resultado final (Fournel et al. 2017).

Con el advenimiento de la ganadería de precisión (GdP), entendida como una extensión de las estrategias productivas derivadas de la agricultura de precisión, se ha prestado más atención al uso de un conjunto de tecnologías tales como, los sistemas globales de navegación por satélite, la teledetección tanto satelital como mediante Aeronaves Tripuladas a Distancia (RPA, por sus siglas en inglés), los sistemas de información geográfica, el aprendizaje automático (*machine learning*) y otras técnicas de inteligencia artificial (Kharuf-Gutierrez et al. 2018). La teledetección es una de las herramientas fundamentales para la GdP, ya que tiene el potencial de promover un manejo más dinámico de las pasturas a partir de la respuesta espectral de las plantas, para generar índices de vegetación (IV) relacionados con la producción agrícola (Shanahan et al. 2001).

Los IV son medidas cuantitativas basadas en los niveles de reflectancia obtenidos por un sensor y corresponden a combinaciones algebraicas de varias bandas espectrales (Chuvieco 2002; Ramírez 2013), las cuales resaltan las propiedades específicas de la vegetación como son: la biomasa, la radiación absorbida y el contenido de clorofila (Mitsikostas 2017).

Los IV han sido utilizados para evaluar sistemas ganaderos, estudiando el comportamiento temporal y espacial de la disponibilidad forrajera. En Colombia, Posada-Asprilla et al. (2019) utilizaron un sensor

multiespectral para estimar la oferta y composición química del pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov) Morrene] con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.90. Mientras que Pereira et al. (2015) en Brasil evaluaron la respuesta espectral y las características productivas en pasturas tropicales con diferentes dosis de fertilización. De forma similar en Alemania (Capolupo et al. 2015) estudiaron la capacidad de un sensor hiperespectral a bordo de un RPA, en la detección de variaciones estructurales y bioquímicas en parcelas de pastos que habían recibido diferentes dosis de nitrógeno.

También los IV han sido utilizados en estudios etológicos en Brasil para conocer patrones en el pastoreo de bovinos (Chiacchio 2017). En sistemas pastoriles de Escocia, Maire et al. (2018) evaluaron la capacidad de una cámara con lente modificado (RGNir) para la determinación de parches de orina y poder mejorar las estimaciones de óxido nítrico (N_2O) a nivel de potrero.

En el Cerrado Brasileiro (Pessi et al. 2020) utilizaron el algoritmo *k-mean* de clasificación no supervisada en imágenes multiespectrales, para identificar el pasto *Urochloa* spp; siendo el algoritmo asertivo para cada una de las clases observadas en campo, mientras que (Neves et al. 2019) en la región del Rio Grande del Sur en Brasil, determinaron el potencial de estos sensores a bordo de un RPA, para identificar y generar mapas de infestación de la hierba “capimannoni” (*Eragrostis plana* Nees) en pasturas nativas.

Mientras tanto Sankey et al. (2019) en Arizona central (EEUU), monitorearon las tendencias en la condición de la salud y la degradación de los pastizales a partir de imágenes multiespectrales obtenidas por un RPA y concluyeron que estas imágenes, junto a estudios de campo, permiten realizar estimaciones cuantitativas de la composición, cobertura y distribución espacial de la vegetación.

Los sensores a bordo de las RPA también han sido incorporados en diferentes sistemas de análisis. Insua et al. (2019) en Michigan (EEUU), integraron datos de NDVI recolectados por un sensor multiespectral en pasturas, a un modelo de predicción de crecimiento (SALUS, por sus siglas en inglés) y a un modelo predictivo del valor nutritivo del forraje (MDP, por sus

siglas en inglés), donde encontraron un alto grado de asociación entre el NDVI y la biomasa aforada en campo. Por otro lado, en Luxemburgo, Brenner et al. (2018) utilizaron imágenes termográficas de alta resolución a bordo de un RPA y datos micrometeorológicos obtenidos por una torre de flujo “Eddy Covariance”, para generar mapas de evapotranspiración en pastizales a partir de patrones térmicos, como resultado del comportamiento heterogéneo del flujo del calor (calor sensible y calor latente).

Mientras que Michez et al. (2019) en Gembloux (Bélgica), desarrollaron un modelo para evaluar la biomasa en pasturas de *Lolium perenne* (ryegrass) a partir de los índices derivados de un sensor multiespectral junto a modelos digitales de superficie (DSM, por sus siglas en inglés) y concluyeron que este modelo puede ser integrado a programas de pastoreo de precisión.

Sobre la base de los trabajos citados previamente, el objetivo de este estudio fue evaluar el uso de diferentes índices de vegetación provenientes de un RPA para la estimación de la disponibilidad de forraje y composición química asociada a la calidad nutricional de una pastura de *Urochloa humidicola* cv Llanero, manejada bajo pastoreo, lo cual es un avance metodológico necesario para la gestión de las pasturas en la Orinoquia colombiana.

Materiales y Métodos

Localización

El estudio se desarrolló en áreas de pastoreo bovino en el Centro de Investigación La Libertad de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, georreferenciado en las coordenadas 4°03'49.55" N y 73°27'44.16" W, a 328 m.s.n.m.

El área de estudio se ubica en la subregión del Piedemonte Llanero que hace parte de la región Orinoquia, en el municipio de Villavicencio, del departamento del Meta-Colombia (Figura 1).

La topografía es plana y homogénea, con un suelo Oxisol franco arcillo-arenoso de buen drenaje, caracterizado por alta saturación de aluminio (Al) y baja disponibilidad de fósforo (P) (Rincón et al. 2019).

La temperatura promedio es de 26 °C, la humedad relativa de 80 % y la precipitación promedio anual de 2,953 mm; la época seca va entre los meses de enero y mediados de marzo, con lluvias esporádicas que alcanzan los 110 mm y la época de lluvias va desde finales de marzo hasta el mediados de diciembre, con 322 mm/mes en promedio (Rincón y Álvarez 2010; Rincón et al. 2018).

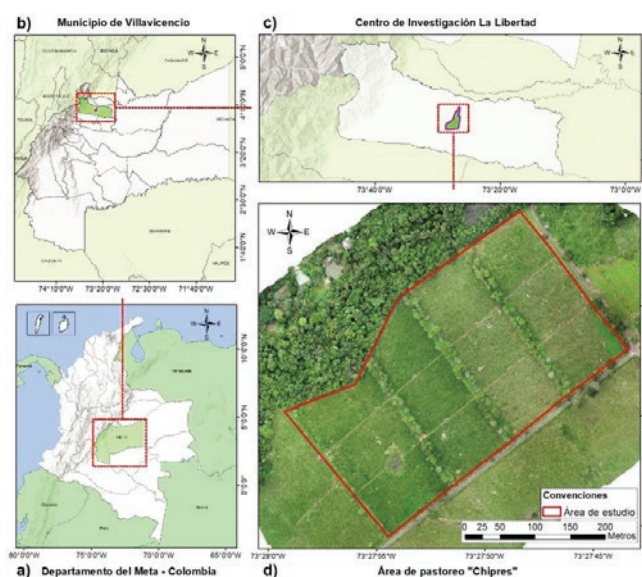


Figura 1. Ubicación del área de pastoreo en el C.I. La Libertad. a) Departamento del Meta en la República de Colombia; b) Municipio de Villavicencio en el Departamento del Meta; c) C.I. La Libertad; d) Área de pastoreo.

Imágenes ópticas del área de estudio

Se utilizó la cámara Mapir Survey 3W® de resolución espectral: verde (550nm), rojo (660nm) e infrarrojo cercano - NIR (850nm), la cual iba acoplada en un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) Phantom 4Pro®; los vuelos se realizaron entre las 12:00 y 14:00 horas; previo a cada vuelo se tomaron imágenes al panel reflectante de calibración (versión 2) de Mapir® con el propósito de realizar las correcciones radiométricas, y reducir las distorsiones de la respuesta electromagnética del suelo y de los fenómenos atmosféricos. Los planes de vuelo fueron programados en el software Pix4D Capture®; se fijó la altura de vuelo a 70 metros, resolución espacial de 10.5 cm² por pixel, traslape ≥ 75 % y velocidad de la aeronave de 6 metros/segundo.

Los ortomosaicos fueron generados en el software Pix4D Mapper pro®, y los niveles digitales de la imagen fueron convertidos a reflectancia en el aplicativo control de cámara Mapir® (versión 16/10/2019). El recorte de las imágenes en los puntos muestreados y la generación de los índices espectrales se realizó con el software ArcMap 10.8® (Cuadro 1).

Área de pastoreo

El área experimental incluyó potreros de *Urochloa humidicola* cv Llanero (pasto Llanero), (sin. *Brachiaria*

humidicola; antes considerada como *Brachiaria dictyoneura*) (Cook y Schultze-Kraft 2015), manejados en un sistema de pastoreo rotacional por más de cinco años luego de haber sido establecida y con vocación productiva para la ceba de ganado bovino. Se recolectaron un total de 200 muestras entre los meses de junio a agosto de 2019, que corresponde a la ventana meteorológica de la época de lluvias

Se determinó la altura de planta (ALP) (cm) y la oferta forrajera (OF) (kg MS/ha). Las evaluaciones se efectuaron a los 28 días de rebrote contados a partir del momento en que el ganado salió del potrero. Veintiocho días es el periodo modal de descanso para el pastoreo de esta gramínea en la región, tal como ha sido recomendado por Costa et al. (2019). La ALP fue evaluada mediante una regla desde la base la planta hasta la canopia y las muestras de forraje verde se cortaron a 20 cm del suelo de acuerdo con su hábito de crecimiento (Rincón 2011), se pesaron y posteriormente fueron secadas en una estufa de aire forzado por 72 horas a 60 °C; la materia seca (MS) se obtuvo por diferencia entre el peso verde y seco.

Cuadro 1. Índices de vegetación y relación de bandas espectrales propuestos.

| Índice espectral de vegetación | Fuente |
|--|----------------------------|
| $NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$ | Rouse et al. (1974) |
| $GCI = \left(\frac{NIR}{G} \right) - 1$ | Gitelson et al. (2003) |
| $SRPI = \frac{R - G}{NIR}$ | Peñuelas et al. (1995) |
| $SR = \frac{NIR}{R}$ | Birth y McVey (1968) |
| $GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$ | Gitelson y Merzlyak (1998) |
| $SAVI = \frac{1.5 * (NIR - R)}{(NIR + R + 0.5)}$ | Huete (1988) |
| $RDVI = \frac{(NIR - R)}{\sqrt{(NIR + R)}}$ | Roujean y Breon (1995) |

NDVI=Índice de vegetación de diferencia normalizada; GCI=Índice verde de clorofila; SRPI=Índice de reflectancia de planta senescente; SR=Proporción simple; GNDVI=Índice de vegetación de diferencia normalizada verde; SAVIA=Índice de vegetación de suelo ajustado; RDVI=Índice de vegetación de diferencia renormalizada; G=banda espectral del verde, R=banda espectral del rojo y NIR=banda espectral del infrarrojo cercano.

Los contenidos de proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente acida (FDA) y lignina (LIG), se estimaron a partir de espectro radiometría del infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés) con el equipo de barrido VIS/NIR modelo 6500 FOSS® en el Laboratorio de Nutrición Animal del Centro de Investigación (C.I.) Tibaitatá, de Agrosavia, según la metodología propuesta por Ariza-Nieto et al. (2018).

Modelo de disponibilidad de forraje y composición química asociada a la calidad nutricional

Para identificar las relaciones existentes entre los IV y las variables evaluadas (PC, FDN, FDA, LIG), se realizó un análisis de componentes principales usando el software R (R Core Time 2016) mediante la librería FactorMinerR (Lê et al. 2008). Una vez realizado esto, se probaron tres modelos aditivos generalizados - GAM, por medio de la librería mgcv (Wood 2019), donde se evaluaron diferentes interacciones con funciones suavizadas no parametrizadas (*splines*) de regresión cúbica (Posada y Cerón 2019) entre el IV y ALP. En la Figura 2, se presenta el esquema de análisis y los modelos utilizados.

Para seleccionar el modelo que mejor se ajustaba a la estimación de la disponibilidad de forraje se utilizó el criterio de información Bayesiano (BIC), el criterio de información de Akaike (AIC), por medio de la librería MASS (Ripley et al. 2020) en el software R (R Core Time 2016).

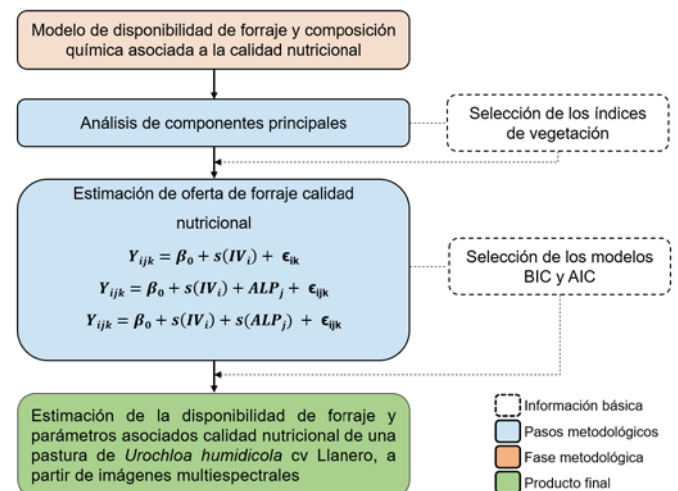


Figura 2. Modelos GAM utilizados en el estudio. Dónde: Y representa las variables evaluadas, β_0 es el intercepto, s es la función de suavizado para la variable, IV representa el índice espectral, ALP es la altura de la planta y ϵ es el efecto residual.

Resultados

Evaluación de la disponibilidad de forraje

Durante el periodo de evaluación, la precipitación en los meses de julio y agosto fue superior (9.2 % y 17.7 %, respectivamente) al promedio acumulado de los últimos 30 años, (Figura 2); esta condición favoreció el ataque poco común del mión de los pastos (*Aeneolamia* spp) (Calderón et al. 1982; CIAT 1991) (Figura 3).

El pasto Llanero presentó una ALP promedio de 44 ± 3 cm, resultado superior al reportado por Rincón (2011) para la época de lluvias en el departamento de Meta. Con relación a la OF se obtuvo un rendimiento promedio de 1,054 kg MS/ha, valor que se encuentra dentro del rango de 950 y 1,700 kg MS/ha reportado por el Instituto Colombiano Agropecuario [ICA] (1987) para la temporada de máxima precipitación.

Composición química asociada a la calidad nutricional del forraje

En el Cuadro 2, se presentan los resultados de la calidad nutricional del pasto Llanero obtenidos por medio de la técnica NIRS, en donde se evidencia que, a pesar de la alta precipitación y un ataque de mión de los pastos, la composición química del pasto no se vio afectada, lo cual demuestra su buena capacidad de recuperación y adaptación a condiciones desfavorables.

Índices de vegetación asociados a la disponibilidad de biomasa del forraje

En el Cuadro 3, se presenta los valores promedios, mínimos y máximos de los IV evaluados en esta investigación. Los resultados son relativamente bajos si se comparan con los que se pueden obtener con otras imágenes multiespectrales, lo cual es atribuido a la forma como el sensor Sony Exmor R IMX117 12MP (Bayer Red-Green-Blue) específico de la cámara Mapir Survey 3W[®] capta las imágenes (diseñado para obtener imágenes RGB). Según el fabricante: “las bandas del filtro se superponen con las del patrón Bayer en el sensor y eso afecta su transmisión. Esto puede producir un contraste diferente al esperado y valores inferiores de los que se pueden obtener con un índice proveniente de otros sensores” (MAPIR – Inc, comunicación personal - Re: [#6974402], 3 de febrero de 2020). Esta situación se evidenció a pesar de haber seguido el proceso de calibración de las imágenes recomendado por el fabricante.

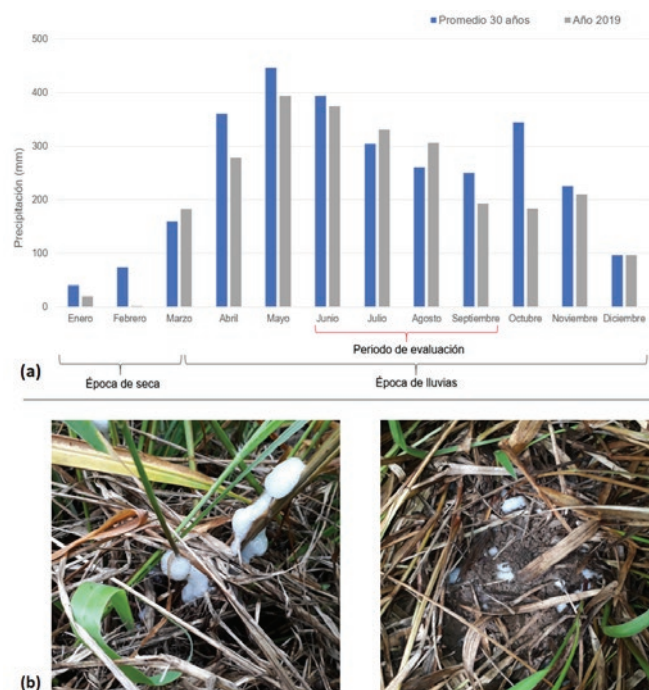


Figura 3. (a) Precipitación del 2019 comparada con el promedio de 30 años en el C.I. La Libertad, (b) presencia de *Aeneolamia* spp. en el pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero.

Cuadro 2. Composición química del *Urochloa humidicola* cv Llanero en la época lluviosa.

| Estadísticos | PC* (g/kg) | FDN* (g/kg) | FDA* (g/kg) | LIG* (g/kg) |
|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Promedio | 105 | 676 | 358 | 82 |
| Mínimo | 79 | 651 | 322 | 70 |
| Máximo | 134 | 712 | 391 | 92 |
| Des | 14 | 17 | 13 | 5 |

Des=desviación estándar. Dónde: PC=proteína cruda; FDN=fibra en detergente neutro; FDA=fibra en detergente ácido y LIG=lignina. *Para transformar estos valores a % multiplicar por el factor 0.1

Cuadro 3. Índices de vegetación calculados para *Urochloa humidicola* cv Llanero.

| Índice | Media \pm DE | Mínimo | Máximo |
|--------|--------------------|--------|--------|
| NDVI | 0.3542 ± 0.014 | 0.3099 | 0.3822 |
| GCI | 1.0040 ± 0.038 | 0.9014 | 1.0874 |
| SRPI | 0.0554 ± 0.011 | 0.0331 | 0.0899 |
| SR | 2.3432 ± 0.069 | 2.1663 | 2.4527 |
| GNDVI | 0.3334 ± 0.008 | 0.3107 | 0.3448 |
| SAVI | 0.3727 ± 0.055 | 0.2845 | 0.4469 |
| RDVI | 0.3621 ± 0.018 | 0.3165 | 0.3902 |

Estimación de la disponibilidad y composición química del forraje a partir imágenes multispectrales

Se generó la matriz de correlación con el objetivo de identificar el IV que tiene mayor relación con la oferta de forraje y la calidad nutricional del pasto. En la Figura 4, se observa que la OF se correlacionó de forma positiva con la ALP (0.65) y con los índices NDVI y SR (0.74 y 0.68, respectivamente); la PC se correlacionó con el SR y GNDVI ($r=0.52$ y 0.69), mientras que para el FDN y LIG se observó una correlación negativa para el SR ($r=-0.52$ y -0.67), GNDVI ($r=-0.69$ y -0.55) y GCI ($r=-0.32$ y -0.44). Para el FDA, igualmente se presentaron correlaciones negativas de -0.53 , -0.55 , -0.78 y -0.40 para los índices SR, RDVI, GNDVI y GCI, respectivamente. Todos los coeficientes presentaron significancia de $p<0.001$.

Se realizó el test de Bartlett, que arrojó una $p<0.001$, lo que indica que la matriz de correlaciones es distinta a la matriz de identidad, por lo que se procedió a realizar el análisis de componentes principales (ACP) a partir de la matriz de varianzas (Figura 5).

En el ACP, los dos primeros componentes explicaron el 64.18 % de la varianza total observada, donde el CP1 explica el 49 % de la varianza y en él se agruparon variables relacionadas con la composición química del pasto Llanero. Las variables más importantes fueron la PC, FND, FDA, LIG, y los IV GCI, SR, GNDVI y RDVI, donde la variable que más contribuyó a la formación de este componente fue el GNDVI (12.38). El CP2 explicó el 15.18 % de la varianza relacionada con la disponibilidad del forraje, las variables agrupadas son OF, ALP y los IV NDVI y GCI; donde el índice que más

contribuyó a la conformación de este eje fue el NDVI (15.58). En el Cuadro 4, se presentan los *autovectores* que permiten identificar la contribución de cada una de las variables para la conformación de los componentes principales (CP1 y CP2).

A partir de los resultados obtenidos del ACP se construyeron los GAM para relacionar las características de OF y de composición química del pasto Llanero con los IV. Los IV utilizados corresponden a los que tuvieron mayor contribución en la formación del CP1 (GCI, SR, GNDVI y RDVI) y CP2 (NDVI y GCI), para un total 22 GAM probados (CP1=16 y CP2=6). En el Cuadro 5, se presenta la estructura de los modelos.

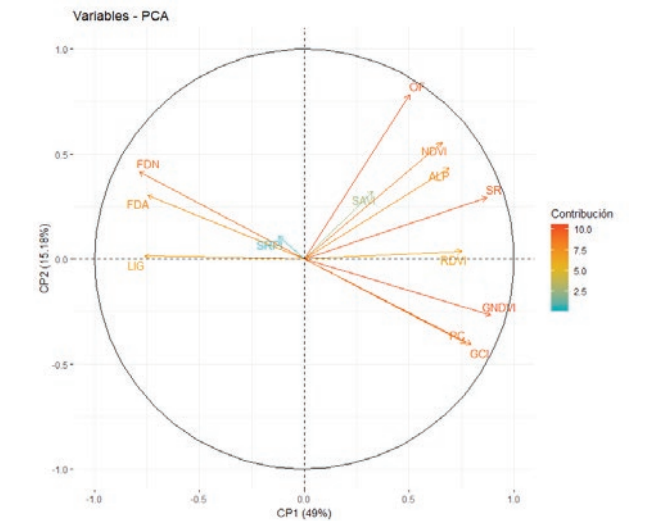


Figura 5. Análisis de componentes principales para las variables evaluadas

Cuadro 4. Autovectores reportados para cada una de las variables evaluadas.

| Variables | CP1 | CP2 |
|-----------|-----------|-----------|
| NDVI | 6.7671789 | 15.588463 |
| GCI | 9.9610747 | 8.3934135 |
| SRPI | 0.2340676 | 0.6038061 |
| SR | 11.902275 | 4.3834425 |
| GNDVI | 12.389612 | 3.6173191 |
| SAVI | 1.6580291 | 5.2876 |
| RDVI | 8.8789385 | 0.0697551 |
| OF | 3.9561736 | 31.005273 |
| ALP | 7.4469754 | 9.5775559 |
| PC | 9.3085735 | 8.1223782 |
| FDN | 9.6872631 | 8.6764744 |
| FDA | 8.7488051 | 4.6648082 |
| LIG | 9.0610334 | 0.0097109 |



Figura 4. Matriz de correlación de las variables de crecimiento y los índices de vegetación.

Cuadro 5. Estructura de los GAM utilizados en el estudio.

| ACP | Modelo | Ecuación |
|-----|---|------------|
| CP1 | $Z_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$ | Ecuación 1 |
| | $U_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$ | Ecuación 2 |
| | $V_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$ | Ecuación 3 |
| | $W_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$ | Ecuación 4 |
| CP2 | $Y_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$ | Ecuación 5 |
| | $Y_{ijk} = \beta_0 + s(IV_i) + ALP_j + \epsilon_{ijk}$ | Ecuación 6 |
| | $Y_{ijk} = \beta_0 + s(IV_i) + s(ALP_j) + \epsilon_{ijk}$ | Ecuación 7 |

El modelo que mejor explicó la OF fue el que consideró el IV y la ALP en función suavizada [$Y_{ijk} = \beta_0 + s(IV_i) + s(ALP_j) + \epsilon_{ijk}$] (Cuadro 5 - Ecuación 7), sin presentar una diferencia marcada; pero al probar este modelo con el NDVI se obtuvieron valores de R^2 superiores (0.78), desviación explicada (0.79) y con valores inferiores de BIC y AIC, en comparación con el GCI (Cuadro 6); para ambos casos, el IV y la ALP obtuvieron un valor de $p \leq 0.001$. En la Figura 6a, se

presenta los valores ajustados entre el NDVI y la OF, y se observa una respuesta curvilínea; en la Figura 6b, se presentan los valores ajustados entre el NDVI, ALP y la OF, y se observa que la OF está relacionada con diferentes rangos del índice de vegetación y a diferentes alturas, como se presenta en el Cuadro 7.

Con relación a la PC, el modelo que utilizó el GNDVI en función suavizada presentó un efecto significativo con la variable dependiente ($p \leq 0.001$) (Figura 7) con un R^2 de 0.764, desviación explicada de 0.77, menor BIC (2,558) y menor AIC (2,517), en comparación a los otros índices (Cuadro 6). El modelo presenta de la siguiente forma:

$$Z_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$$

Donde, Z es la PC (g/kg), β_0 es el intercepto, IV es el índice GNDVI, s es la función de suavizado para la variable y ϵ es el efecto residual.

El uso del RDVI para estimar el FDN, presentó un R^2 con la variable dependiente de 0.583 y desviación explicada de 0.593 (Figura 8a); mientras que para estimar el FDA se obtuvo un R^2 de 0.378 y una desviación explicada de 0.392 con el IV SR (Figura 8b); así mismo, el SR contribuyó en la estimación de la LIG con valores de R^2 y desviación explicada de 0.392 y 0.446 (Figura 8c) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Criterios de selección para los modelos evaluados

| Parámetro | Índice | BIC | AIC | R^2 | Desviación explicada |
|-----------|--------|-------|-------|-------|----------------------|
| OF | NDVI | 5,238 | 5,177 | 0.788 | 0.795 |
| | GCI | 5,290 | 5,227 | 0.758 | 0.767 |
| PC | RDVI | 2,838 | 2,799 | 0.541 | 0.561 |
| | SR | 2,723 | 2,682 | 0.557 | 0.575 |
| | GNDVI | 2,490 | 2,449 | 0.764 | 0.77 |
| | GCI | 2,558 | 2,517 | 0.712 | 0.72 |
| FDN | RDVI | 2,981 | 2,938 | 0.583 | 0.593 |
| | SR | 3,051 | 3,013 | 0.491 | 0.501 |
| | GNDVI | 3,187 | 3,164 | 0.234 | 0.242 |
| | GCI | 3,142 | 3,100 | 0.361 | 0.375 |
| FDA | RDVI | 2,672 | 2,633 | 0.362 | 0.375 |
| | SR | 2,663 | 2,623 | 0.378 | 0.392 |
| | GNDVI | 2,415 | 2,773 | 0.278 | 0.286 |
| | GCI | 2,402 | 2,764 | 0.284 | 0.291 |
| LIG | RDVI | 2,111 | 2,068 | 0.366 | 0.381 |
| | SR | 1,993 | 1,951 | 0.435 | 0.446 |
| | GNDVI | 2,070 | 2,029 | 0.328 | 0.341 |
| | GCI | 2,037 | 1,994 | 0.379 | 0.391 |

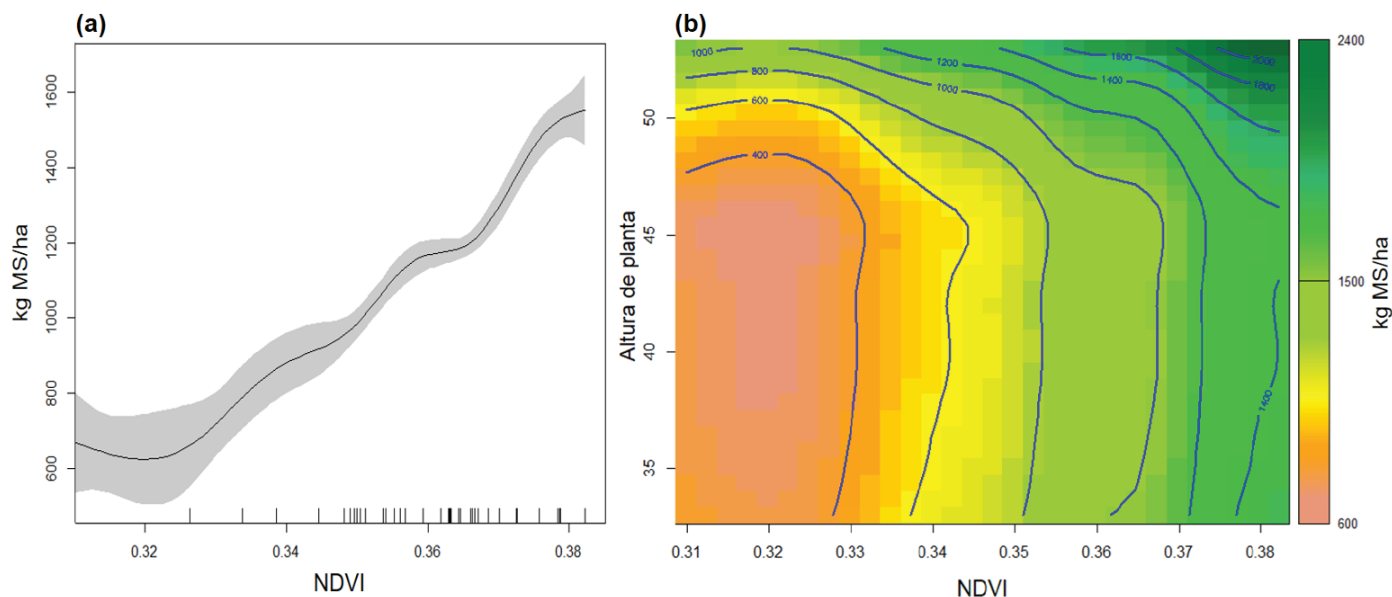


Figura 6. (a) Ajuste entre los valores del IV NDVI y la oferta de forraje del pasto Llanero, (b) Ajuste entre los valores del NDVI, la altura de planta y la oferta de forraje del pasto Llanero.

Cuadro 7. Relación de la oferta de forraje con respecto al NDVI y ALP.

| NDVI | ALP (cm) | Oferta de forraje (kg MS/ha) |
|--------------|-----------|------------------------------|
| 0.31–0.34 | ≤ 50 | 400–600 |
| 0.341–0.36 | ≥ 30 | 600–1,000 |
| 0.361–0.38 | ≥ 30 | 1,000–1,600 |
| ≥ 0.381 | ≥ 50 | 1,600–2,000 |

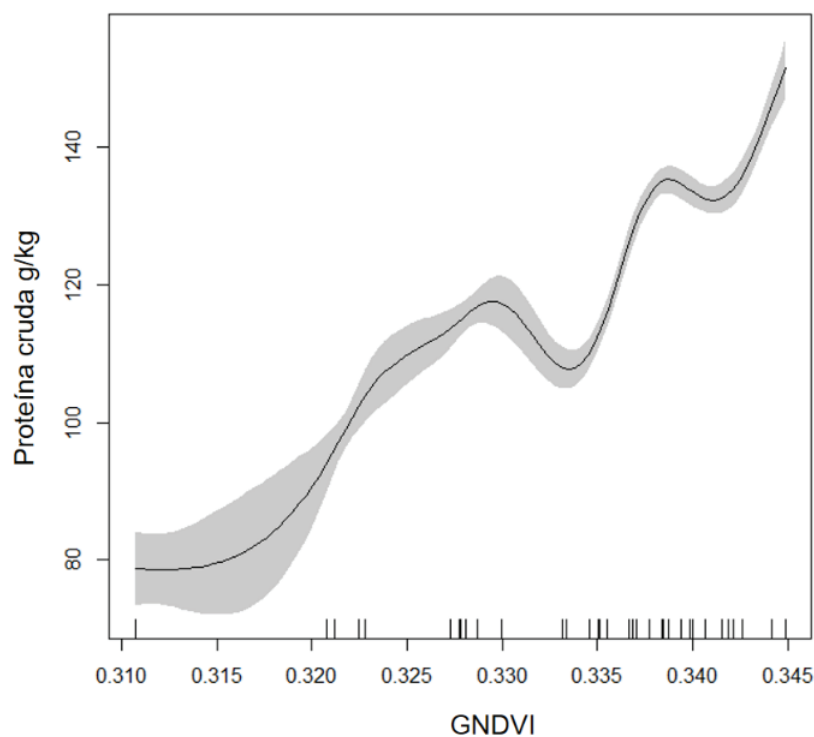


Figura 7. Ajuste entre los valores del IV GNDVI y la proteína cruda del pasto Llanero.

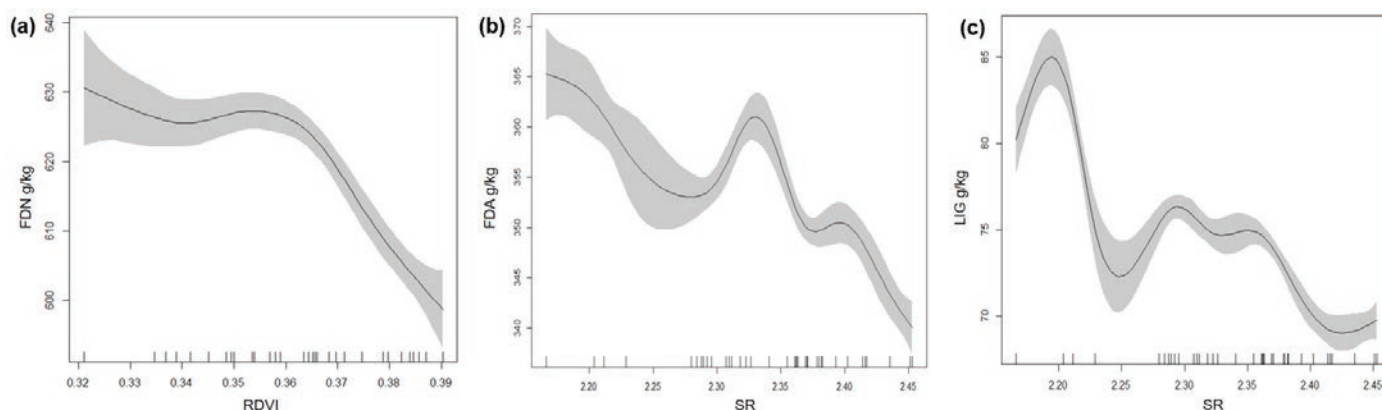


Figura 8. (a) Ajuste entre los valores del RDVI y la fibra en detergente neutra (FDN) del pasto Llanero, (b) Ajuste entre los valores del SR y la fibra en detergente acida (FDA) del pasto Llanero y (c) Ajuste entre los valores del SR y la lignina del pasto Llanero.

Discusión

Evaluación de la disponibilidad de forraje

En este estudio, la disponibilidad promedio de forraje fue de 1,054 kg MS/ha, valores muy cercanos a los reportados por Rincón et al. (2018), que obtuvieron una producción de 958 kg MS/ha para el pasto Llanero (testigo sin fertilizar), en el Piedemonte del departamento del Meta, mientras que Pérez et al. (2019), en la Altillanura colombiana obtuvieron una OF de 1,030 kg MS/ha.

Por su parte Giraldo et al. (1989) reportaron una producción de 750 kg MS/ha en el municipio de Amalfi, Antioquia, y Sánchez et al. (1989), Carulla et al. (1991), Passoni et al. (1992) y Vela y Flores (1996) presentaron valores más altos a los obtenidos en este estudio, con disponibilidades de biomasa de 1,500; 1,538; 1,200 y 2,000 kg MS/ha, respectivamente. Según Insua et al. (2019) las pasturas que no sobrepasan los 3,000 kg MS/ha antes de ser pastoreadas, pueden ser monitoreadas a partir de imágenes multiespectrales. Por consiguiente, los resultados obtenidos en la presente investigación están dentro del rango óptimo descritos por dichos autores.

Composición química asociada a la calidad nutricional del forraje

Los contenidos promedio de PC, FDN, FDA y lignina fueron 10.5 %, 67.6 %, 32.2 % y 8.2 %, respectivamente. Los valores de PC obtenidos en este estudio fueron similares a los reportados por Rincón et al. (2018), Pérez y Cuesta, (1994), Pardo y Pérez (2010) y Pérez et al. (2019) quienes obtuvieron valores de PC de 8.6 a 12 % en gramíneas que crecen en los Llanos Orientales. En relación con los contenidos de FDN y FDA, los valores son similares a los reportados por Giraldo et al. (2007), Rincón

et al. (2018), Canchila et al. (2009), Sánchez et al. (2000) y Nguku (2015) con valores para FDN que varían entre 63.4 a 75.4 % y FDA entre 35.1 y 40 %, respectivamente.

Índices de vegetación asociados a la disponibilidad de biomasa del forraje

Sinde et al. (2020) obtuvieron promedios de NDVI de 0.363, 0.371 y 0.362, en pasturas de kikuyo (*Cenchrus clandestinus*), ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) y ryegrass perenne (*Lolium perenne*) respectivamente, que son similares a los obtenidos en este estudio usando el lente NIR GP39728 Green, que es fabricado por la casa comercial *Peauproductions* anexa a Mapir.

Las cámaras Mapir Survey® también han sido incorporadas con resultados satisfactorios en diferentes niveles de análisis; así por ejemplo, Maimaitjiang et al. (2020) obtuvieron un $R^2=0.72$ cuando estimaron el rendimiento de la producción de grano de soya (*Glicine max*) en un modelo de análisis de aprendizaje profundo, a partir de la respuesta espectral de la planta y características térmicas y de textura. Por otro lado, Kerkech et al. (2020) obtuvieron un 92 % en la detección de enfermedades en viñedos de la región del Valle de Loira en Francia a partir de imágenes RGB y multiespectrales

Estimación de la disponibilidad y composición química del forraje a partir imágenes multiespectrales

Las relaciones obtenidas en el ACP fueron inversas a las reportadas por Posada-Asprilla et al. (2019), quienes encontraron para el CP1 una varianza explicada de 46.2 %, con variables asociadas a la oferta de forraje del pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone] y el CP2 explicó el 24.1 % de la varianza, donde se agruparon las variables relacionadas

con la composición química; sin embargo, este estudio coincidió que el NDVI, fue el que más contribuyó a la formación del componente asociado a la disponibilidad de forraje. El SRPI y SAVI fueron los que menos contribuyeron en la conformación del CPI (Tabla 4).

Para la estimación de la OF se probaron los índices de vegetación NDVI y GCI, junto con la interacción de la ALP, se obtuvo una correlación positiva con estos índices de 0.74 y 0.63, respectivamente (Figura 3).

La correlación del NDVI con la OF y la ALP concuerda con lo reportado por la literatura en relación con las características de crecimiento de las pasturas, donde el NDVI es un indicador de biomasa, en especial cuando la vegetación evaluada presenta buena cobertura (Zerbato et al. 2016). Esta característica es propia de una pastura bien manejada de *Urochloa humidicola* cv Llanero, que es un genotipo de crecimiento postrado, y que bajo esas condiciones presenta una alta producción de estolones y buena cobertura del suelo (Rincón 2011; Rincón et al. 2018).

La correlación de la ALP con la OF fue de 0.65, valor similar al reportado por Blanco et al. (2014), quienes indican que la altura de la especie (*U. decumbens* y *U. humidicola*) es la variable que mayor probabilidad tiene (0.59) de estar directamente relacionada con los valores de NDVI generados de la imagen de satélite. De forma similar Scarabotti et al. (2011) argumentaron que la ALP a pesar de ser un parámetro de fácil obtención, no ofrece mayor ventaja en la estimación de la biomasa en macollas de *Spartina argentinensis*; sin embargo, resaltan que la acción del pastoreo mejora el ajuste entre ALP y la OF. En contraposición a esto, Braga et al. (2009) especificaron que los modelos para estimar la OF de *Urochloa brizantha* cv Marandú, a partir de ALP obtenida por medidor de placa ascendente, deben ser específicos para cada mes o temporada de evaluación, frente a los modelos que cubren la temporada total, y autores como Santillán et al. (1979), Arruda et al. (2011) y Bernardi y Pérez (2014) encontraron resultados satisfactorios en la estimación de la biomasa con esta misma metodología.

Con respecto a la estimación de la disponibilidad de forraje a partir de índices espectrales, el coeficiente de determinación (R^2) obtenido en esta investigación, es similar a lo reportado por Díaz et al. (2021) quienes obtuvieron un R^2 de 0.712 en una pastura de *Urochloa humidicola* cv Llanero en la Altillanura colombiana entre el NDVI y la oferta de biomasa. En cambio, Gargiulo et al. (2020) encontraron una relación exponencial entre el NDVI y la oferta de

biomasa, con un R^2 (0.77) en pasturas de ryegrass anual (*Lolium multiflorum* Lam) en New South Wales, Australia. De igual manera Posada-Asprilla et al. (2019), estimaron la oferta de biomasa verde a partir de modelos GAM en pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.)], y encontraron que el NDVI explicaba mejor la biomasa, con un R^2 de 0.993.

En relación con la PC, el GNDVI utiliza la diferencia normalizada entre las bandas espectrales verde y NIR, lo que genera una medición en un rango menor (Cuadro 3) en comparación al NDVI; sin embargo, Gitelson y Merzlyak (1998) encontraron que este índice presenta alta sensibilidad a la clorofila en diferentes coberturas vegetales, obteniendo un valor de R^2 de 0.96. El contenido de clorofila en las hojas tiene alta relación con la concentración de nitrógeno (N) lo cual refleja el estado nutricional con respecto a este nutriente (Alonso et al. 2008; Rincón y Ligarreto 2010; Kharuf-Gutierrez et al. 2018), el cual está relacionado con el contenido proteico de las hojas (Rincón et al. 2019).

El modelo para estimar la FDN a partir del RDVI reportado en este estudio coincidió con lo encontrado por Pullanagari et al. (2012) en una pradera compuesta por ryegrass perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.), quienes obtuvieron un R^2 de 0.40 para un modelo exponencial. Estos autores también estimaron la relación entre FDA y LIG con IV y obtuvieron R^2 de 0.58 y 0.40, respectivamente, cuando usaron modelos lineales. Ellos argumentaron que estos valores bajos pueden estar relacionados con el hecho que longitudes de onda amplias enmascaran información espectral esencial y por consiguiente no permiten explicar las características detalladas de los pastos. En apoyo a lo anterior, Starks et al. (2006) trabajando con pasto Bermuda (*Cynodon dactylon*) recomendaron el uso de bandas más estrechas para evaluar sustancias químicas foliares, y recalcaron la importancia de la región del borde rojo en la predicción de la bioquímica foliar. Sin embargo, Posada-Asprilla et al. (2019) a partir de modelos GAM, trabajando con pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.)], no encontraron mayores diferencias con el uso del borde rojo para la estimación del FDN y FDA, logrando valores igualmente bajos de R^2 (0.43 y 0.24, respectivamente).

Conclusiones

Con los resultados obtenidos en pasturas de *Urochloa humidicola* cv Llanero fue posible determinar que el NDVI es el índice de vegetación que mejor se

correlaciona con la disponibilidad de forraje y el GNDVI con la proteína cruda.

Los modelos GAM propuestos para las estimaciones de disponibilidad de biomasa y contenido de proteína a partir de los índices NDVI y GNDVI generados con imágenes multiespectrales de un VANT, son un buen estimador de la disponibilidad forrajera y el contenido de proteína cruda en pasturas de *Urochloa humidicola* cv Llanero; en cambio, con el tipo de sensor evaluado las estimaciones de los contenidos de fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y lignina no funcionan como buenos estimadores.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia por el apoyo financiero y al personal administrativo y operativo del Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia, quienes con su apoyo hicieron posible el desarrollo de las actividades del proyecto Estrategias Ecoeficientes para Optimizar el Establecimiento y Manejo de Pastos y Forrajes en Sistemas de Producción, del cual formó parte el presente estudio.

Referencias

(Nota de los editores: Enlaces verificados el 20 de enero de 2023).

- Alonso M; Rozados MJ; Ignacio MF Rozas V; Lamas S; Chapela D; Fontúrbel MT. 2008. Nitrógeno foliar como estimador de clorofila en una población en de *Laurus nobilis* del parque nacional de las islas atlánticas, Galicia (No España). Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 25:61–66. [bit.ly/3J4IdDs](https://doi.org/10.1177/0967033517746900)
- Ariza-Nieto C; Mayorga OL; Mojica B; Parra D; Afanador-Tellez G. 2018. Use of LOCAL algorithm with near infrared spectroscopy in forage resources for grazing systems in Colombia. Journal of Near Infrared Spectroscopy 26(1):44–52. doi: [10.1177/0967033517746900](https://doi.org/10.1177/0967033517746900)
- Arruda DSR; Canto MW do; Jobin CC; Carvalho PCF. 2011. Estimate methods of the herbage mass on stargrass submitted to grazing intensities. Ciência Rural 41(11):2004–2009. (En Portugués). doi: [10.1590/S0103-84782011005000141](https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000141)
- Bernardi ACC; Pérez NB. 2014. Agricultura de precisão em pastagens. En: Bernardi ACC; Naime JM; Resende AV de; Bassoi LH; Inamasu, RY (Ed.) Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa 492–499. [bit.ly/3CUIWVi](https://doi.org/10.1177/0967033517746900)
- Birch GS; McVey GR. 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. Agronomy Journal 60(6):640–643. doi: [10.2134/agronj1968.00021962006000060016x](https://doi.org/10.2134/agronj1968.00021962006000060016x)
- Blanco JC; Rojas AC; Rodríguez CH; Malagón R. 2014. Relación entre índices de vegetación y estados de degradación de pasturas en zonas de lomerío del departamento de Caquetá. Momentos de Ciencia 11:35–41.
- Braga GJ; Pedreira CGS; Herling VR; Luz PHC; Marchesin WA; Macedo FB. 2009. Quantifying herbage mass on rotationally stocked palisade grass pastures using indirect methods. Scientia Agricola 66(1):127–131. doi: [10.1590/S0103-90162009000100018](https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100018)
- Brenner C; Zeeman M; Bernhardt M; Schulz K. 2017. Estimation of evapotranspiration of temperate grassland based on high-resolution thermal and visible range imagery from unmanned aerial systems. International Journal of Remote Sensing 39(15–16):5141–5174. doi: [10.1080/01431161.2018.1471550](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1471550)
- Calderón M; Varela A; Valencia CA. eds. 1982. Descripción de las plagas que atacan los pastos tropicales y características de sus daños [conjunto audiotutorial]. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. 1 carrusel, 106 diapositivas, casete (42 min.) + guía de estudio (52 p.) + guión (23 p.). (Serie 04SP-03.01). hdl.handle.net/10568/54648
- Canchila ER; Soca M; Ojeda F; Machado R. 2009. Evaluación de la composición bromatológica de 24 accesiones de *Brachiaria* spp. Pastos y Forrajes 32(4). [bit.ly/3iIZAk5](https://doi.org/10.1177/0967033517746900)
- Capolupo A; Kooistra L; Berendonk C; Boccia L; Suomalainen J. 2015. Estimating plant traits of grasslands from UAV-acquired hyperspectral images: A comparison of statistical approaches. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4):2792–2820. doi: [10.3390/ijgi4042792](https://doi.org/10.3390/ijgi4042792)
- Carulla JE; Lascano CE; Ward JK. 1991. Selectivity of resident and oesophageal fistulated steers grazing *Arachis pintoi* and *Brachiaria dictyoneura* in the Llanos of Colombia. Tropical Grasslands 25:317–324. [bit.ly/3XyMDsb](https://doi.org/10.1177/0967033517746900)
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 1991. Tropical Pasture Program 1987–1991. Annual Report v.1. En: Tropical Pastures Program Annual Reports-CIAT Informes Anuales de Programa de Pastos Tropicales: 1979–2010. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture (CIAT). hdl.handle.net/10568/69061
- Chiacchio SSR. 2017. Unmanned aerial vehicle Rotary-wing in the activity of mapping and image collection on precision agriculture and monitoring of animals. MSc. Tesis. Universidade de Sao Paulo, São Paulo, Brasil. (En Portugués). doi: [10.11606/D.74.2017.tde-24042017-104340](https://doi.org/10.11606/D.74.2017.tde-24042017-104340)
- Chuvieco E. 2002. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. 1a. ed. Barcelona. Editorial Ariel.
- Cook BG; Schultze-Kraft R. 2015. Botanical name changes-nuisance or a quest for precision? Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales 3(1):34–40. doi: [10.17138/tgft\(3\)34-40](https://doi.org/10.17138/tgft(3)34-40)
- Costa NL; Rodrigues ANA; Malgalhaes JA; Bendahan AB; Rodrigues BHN; Santos FJS. 2019. Morphogenesis and chemical composition of *Brachiaria humidicola* cv. Llanero under rest periods. Research, Society and Development 8(10):e228101356. (En Portugués). doi: [10.33448/rsd-v8i10.1356](https://doi.org/10.33448/rsd-v8i10.1356)
- Díaz RA; Alvarez M; Pérez O. 2021. Use of remote sensors

- to determine forage availability in grazed pastures of *Urochloa humidicola* cv. Llanero in the Colombian Altillanura. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*. 9(3):376–382. doi: [10.17138/tgft\(9\)376-382](https://doi.org/10.17138/tgft(9)376-382)
- Fournel S; Rousseau AN; Laberge B. 2017. Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming. *Biosystems Engineering* 155(March):96–123. doi: [10.1016/j.biosystemseng.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.005)
- Gargiulo J; Clark C; Lyons N; de Veyrac G; Beale P; Garcia S. 2020. Spatial and temporal pasture biomass estimation integrating Electronic Plate Meter, Planet CubeSats and Sentinel-2 Satellite Data. *Remote Sensing* 12(19):3222. doi: [10.3390/rs12193222](https://doi.org/10.3390/rs12193222)
- Giraldo LA; Hincapié AC; Vásquez ME; Zapata CM. 1989. Evaluación de gramíneas y leguminosas forrajera en Amalfi, Colombia. *Pasturas Tropicales* 11(2):20–24. bit.ly/3j59yMF
- Giraldo LA; Ranilla MJ; Tejido ML; Carro MD. 2007. Efecto de la sustitución de *Brachiaria dictyoneura* por *Acacia mangium* sobre la fermentación ruminal in vitro. *Pasturas Tropicales* 29(1):39–46. bit.ly/3j39AEL
- Gitelson AA; Merzlyak MN. 1998. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research* 22(5):689–692. doi: [10.1016/S0273-1177\(97\)01133-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2)
- Gitelson AA; Gritz Y; Merzlyak MN. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160(3):271–282. doi: [10.1078/0176-1617-00887](https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887)
- Huete AR. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3):295–309. doi: [10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Instituto Colombiano Agropecuario. 1987. Pasto Llanero, *Brachiaria dictyoneura* (fig. and De Nuf) Stapf. Boletín Técnico (151). hdl.handle.net/20.500.12324/20308
- Insua JR; Utsumi SA; Basso B. 2019. Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PLOS ONE* 14(3):e0212773. doi: [10.1371/journal.pone.0212773](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773)
- Kerkech M; Hafiane A; Canals R. 2020. Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. *Computers and Electronics in Agriculture* 174:105446. doi: [10.1016/j.compag.2020.105446](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105446)
- Kharuf-Gutierrez S; Orozco-Morales R; Aday OC; Pineda E. 2018. Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. *Sistemas & Telemática* 16(47):45–58. doi: [10.18046/syt.v16i47.3221](https://doi.org/10.18046/syt.v16i47.3221)
- Lê S; Josse J; Husson F. 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* 25(1):1–18. doi: [10.18637/jss.v025.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01)
- Maimaitijiang M; Sagan V; Sidike P; Hartling S; Esposito F; Fritsch FB. 2020. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment* 237:111599. doi: [10.1016/j.rse.2019.111599](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111599)
- Maire J; Gibson-Poole S; Cowan N; Reay DS; Richards KG; Skiba U; Rees RM; Lanigan GJ. 2018. Identifying urine patches on intensively managed grassland using aerial imagery captured from Remotely Piloted Aircraft Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2:10. doi: [10.3389/fsufs.2018.00010](https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00010)
- Michez A; Lejeune P; Bauwens S; Herinaina AAL; Blaise Y; Castro E; Lebeau F; Bindelle J. 2019. Mapping and monitoring of biomass and grazing in pasture with an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing* 11(5):473. doi: [10.3390/rs11050473](https://doi.org/10.3390/rs11050473)
- Mitsikostas A. 2017. Monitorización y optimización de tierras con drones y fotogrametría aérea para aplicaciones de precisión en agricultura. MSc. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. hdl.handle.net/10251/86353
- Neves MC; Perez NB; Luiz AJB; Deibler A; Pinho LB de. 2019. Avaliação de sensor multiespectral em mapeamentos da infestação de pastagens naturais pelo capim-anã. *Anais de XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 14 a 17 de abril. Santo, Brasil. [handle/doc/1117339](https://hdl.handle.net/doc/1117339)
- Nguku S. 2015. An evaluation of *Brachiaria* grass cultivars productivity in semi arid Kenya MSc. Tesis. Universidad del Sureste de Kenia, Kitui County, Kenia. [handle/123456789/1380](https://hdl.handle.net/123456789/1380)
- O'Mara FP. 2012. The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany* 110(6):1263–1270. doi: [10.1093/aob/mcs209](https://doi.org/10.1093/aob/mcs209)
- Pardo O; Pérez O. 2010. Alternativas forrajeras para los llanos orientales de Colombia. En: Rincón A; Jaramillo CA (Ed.) *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Corpoica, 27–70. hdl.handle.net/20.500.12324/35795
- Passoni F; Rosemberg M; Flores A. 1992. Evaluación de gramíneas y leguminosas forrajeras en Satipo, Perú. *Pasturas Tropicales* 14(1):32–35. bit.ly/3WxGvzc
- Peñuelas J; Bart F; Filella I. 1995. Semi-empirical indexes to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31(2):221–230. bit.ly/3whJfWO
- Pereira PAR; Días JLA; Silva AM; Ferreira TA; Silva TL da; Neto SPS. 2015. Imagens multiespectrais para estimar características produtivas de gramíneas tropicais. Instituto Federal de Tocantins, 6a JICE-Jornada de Iniciação Científica e Extensão. bit.ly/3HgTQHF
- Pérez RA; Cuesta PA. 1994. Especies forrajeras para el piedemonte llanero, su fertilización y manejo. En: CORPOICA; SEAGRO (Ed.) *Producción de pasto en el piedemonte llanero*. 4–14. [handle/20.500.12324/13485](https://hdl.handle.net/20.500.12324/13485)
- Pérez, O; Bueno, G; Baquero J; Onofre HG; Cassalet E; Molina AM; Arango MA; Velásquez JG; Rodríguez

- NS; Moreno LM; Amaya CV; Bernal JH ; Correal WA; Pabón DM; Villalobos MA; Velásquez JH; Fuentes JC. 2019. Modelo productivo tecnologías integrales para sistemas de producción de bovinos de cría en la altillanura colombiana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Mosquera, Colombia. 203 p. hdl.handle.net/20.500.12324/35060
- Pessi DD; José JV; Miotto CL; Silva NM da. 2020. Remotely piloted aircraft (drone) of low cost in the invasive species study in Cerrado areas. *Nativa* 8(1):66–80. (En Portugués). doi: [10.31413/nativa.v8i1.8433](https://doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8433)
- Posada-Asprilla W; Cerón-Muñoz M. 2019. Influencia del ángulo de iluminación solar y la altura de la toma de la imagen multiespectral sobre la estimación de biomasa de pasto kikuyo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 22(2):e1338. doi: [10.31910/rudca.v22.n2.2019.1338](https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1338)
- Posada-Asprilla W; Medina-Sierra M; Cerón-Muñoz M. 2019. Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Morrone] usando imágenes multiespectrales. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 22(1):e1195. doi: [10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195](https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195)
- Pullanagari RR; Yule IJ; Hedley MJ; Tuohyet MP; Dynes RA; King WM. 2012. Multi-spectral radiometry to estimate pasture quality components. *Precision Agriculture* 13:442–456. doi: [10.1007/s11119-012-9260-y](https://doi.org/10.1007/s11119-012-9260-y)
- R Development Core Team. 2016. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Version 4.0.0 2020-04-24, Arbor Day.
- Ramírez A. 2013. Evaluación del crecimiento de pastos usando índices de vegetación calculados a partir de información satelital MSc. Tesis. Universidad Nacional, Medellín, Colombia. [handle/unal/75325](https://hdl.handle.net/unal/75325)
- Rincón A. 2011. Efecto de alturas de corte sobre la producción de forraje de *Brachiaria* sp. en el Piedemonte Llanero de Colombia. *Revista Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 12(2):107–112. [10.21930/rcta.vol12_num2_art:219](https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num2_art:219)
- Rincón A; Álvarez M. 2010. Características agroecológicas de la Orinoquia colombiana. En: Rincón A; Jaramillo CA (Ed.) Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Corpoica, 9–26. hdl.handle.net/20.500.12324/1708
- Rincón A; Álvarez M; Pardo O; Amaya MA; Díaz RA. 2019. Estimación de la concentración de clorofila y su relación con la concentración de proteína cruda en tres especies del pasto *Urochloa* en el Piedemonte Llanero, Colombia. *Tropical Grasslands* 7(5):533–537. doi: [10.17138/tgft\(7\)533-537](https://doi.org/10.17138/tgft(7)533-537)
- Rincón A; Flórez H; Ballesteros H; León LM. 2018. Efectos de la fertilización en la productividad de una pastura de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 6(3):158–168. doi: [10.17138/tgft\(6\)158-168](https://doi.org/10.17138/tgft(6)158-168)
- Rincón A; Ligarreto GA. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano. *Revista Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 11(2):122–128. doi: [10.21930/rcta.vol11_num2_art:202](https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num2_art:202)
- Ripley BD; Venables B; Bates D; Hornik K; Gebhardt A; Firth D. 2020. Package “MASS”. Version 7.3-57. bit.ly/3XLpN0h
- Roujean JL; Breon FM. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 51(3):375–384. doi: [10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
- Rouse J; Haas RH; Schell JA; Deering DW. 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA p. 309–317. Paper A20 ntrs.nasa.gov
- Sánchez G; Osorio E; Alvarez JA; Marín J; Sánchez A; Gil JO. 1989. Adaptación y producción de gramíneas y leguminosas forrajeras en el departamento de Antioquia, Colombia. *Pasturas Tropicales* 11(3):8–15. bit.ly/3H4iKc8
- Sánchez J; Villareal M; Soto H. 2000. Caracterización nutricional de los componentes forrajeros de cuatro asociaciones gramíneas/*Arachis pintoi*. *Nutrición Animal Tropical* 6(1): 1–22. [handle/10669/13522](https://hdl.handle.net/10669/13522)
- Sankey T; Leonard JM; Moore MM. 2019. Unmanned aerial vehicle-based rangeland monitoring: examining a century of vegetation changes. *Rangeland Ecology & Management*, 72(5):858–863. doi: [10.1016/j.rama.2019.04.002](https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.04.002)
- Santillán RA; Ocumpaugh WR; Mott GO. 1979. Estimating Forage Yield with a Disk Meter. *Agronomy Journal* 71(1):71–74. doi: [10.2134/agronj1979.00021962007100010017x](https://doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100010017x)
- Scarabotti DS; Feldman SR; Refi R. 2011. Evaluación de distintos métodos para estimar la biomasa aérea en macollas de *Spartina argentinensis* parodi. *Pastos* 32(1):69–79. bit.ly/3iPWJWw
- Shanahan JF; Schepers JS; Francis DD; Varvel GE; Wilhelm WW; Tringe JM; Schlemmer MR; Major DJ. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal* 93(3):583–589. doi: [10.2134/agronj2001.933583x](https://doi.org/10.2134/agronj2001.933583x)
- Sinde I; Yáñez D; Grefa J; Arza M; Gil M. 2020. Estimación del rendimiento del pasto mediante NDVI con imágenes multiespectrales de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Revista Geoespacial* 17(1):25–38. bit.ly/3kvIruv
- Starks PJ; Zhao D; Phillips WA; Coleman SW. 2006. Development of canopy reflectance algorithms for real-time prediction of Bermuda grass pasture biomass and nutritive value. *Crop Science* 46(2):927–934. doi: [10.2135/cropsci2005.0258](https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0258)
- Vela JW; Flores A. 1996. Productividad animal de la asociación *Brachiaria dictyoneura* CIAT 6133-*Desmodium ovalifolium* CIAT 350 en Pucallpa. *Pasturas Tropicales* 18(1): 13–18. bit.ly/3XRvVnO
- Wood S. 2019. Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation. Package “mgcv”. Version 1.8-31. bit.ly/3XP4ba3

Zerbato C; Rosalen DL; Furlani CEA; Deghaid J; Voltarelli MA. 2016. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in

the peanut crop. Australian Journal of Crop Science 10(5):758–764. doi: [10.21475/ajcs.2016.10.05.p7167](https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7167)

(Recibido para publicación 23 de junio 2022; aceptado 31 de diciembre 2022; publicado 31 de enero 2023)

© 2023



Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales is an open-access journal published by *International Center for Tropical Agriculture (CIAT)*, in association with *The Tropical Crops Genetic Resources Institute of The Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences (TCGRI-CATAS)*. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.