



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE SENSORAMIENTO REMOTO EN
LA EVALUACIÓN DE UNA PASTURA DE *Urochloa humidicola*
cv Llanero, BAJO PASTOREO EN EL PIEDEMONTE DEL
DEPARTAMENTO DEL META**

Raúl Alejandro Díaz Giraldo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia
Departamento de Producción Animal
Bogotá D.C., Colombia

2022

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE SENSORAMIENTO REMOTO EN
LA EVALUACIÓN DE UNA PASTURA DE *Urochloa humidicola* cv
Llanero, BAJO PASTOREO EN EL PIEDEMONTE DEL
DEPARTAMENTO DEL META.**

Raúl Alejandro Díaz Giraldo

Tesis como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Producción Animal

Director:

Ph.D., Álvaro Rincón Castillo

Codirector:

Ph.D., Edgar Cárdenas Rocha

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia
Departamento de Producción Animal
Bogotá D.C., Colombia

2022

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi Madre Amparo de Fátima Giraldo Arismendi, a mi Padre Raúl Alberto Díaz Soto, muchas gracias por su apoyo y paciencia. Todo por ellos y para ellos.

DECLARACIÓN DE OBRA ORIGINAL

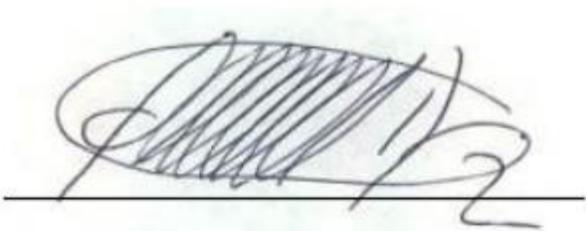
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Raúl Alejandro Díaz Giraldo', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Nombre:

Raúl Alejandro Díaz Giraldo

Fecha 10/06/2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al doctor Mauricio Álvarez de León, mi amigo, gracias por sus consejos acertados e incondicionales, su paciencia, su valiosa asesoría y el apoyo académico brindado durante mis estudios de maestría.

Al doctor Álvaro Rincón Castillo, por su excelencia y disciplina inculcada.

Al doctor Otoniel Pérez, por permitir desarrollar este trabajo de tesis, bajo el proyecto que se encontraba a su cargo.

Al doctor Edgar Cárdenas, por su confianza y apoyo brindado.

A Carlos Toro Sarmiento, por su amistad y compromiso con las actividades de campo.

A José Armando Cumaco, por su amistad y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
Capítulo 1- MARCO TEÓRICO	17
1.1 La pastura en el agroecosistema ganadero.....	17
1.1.1 El pasto <i>Urochloa humidicola</i> cv Llanero	18
1.1.2 Característica de producción y composición nutricional.	18
1.2 Evaluación de la oferta de forraje	21
1.3 El sensoramiento remoto.....	23
1.5 Aspectos de fisiología vegetal asociado al sensoramiento remoto	24
1.4 Índices de vegetación.....	26
1.5 Aplicación del sensoramiento remoto en el monitoreo de pasturas	28
1.6 Bibliografía	36
Capítulo 2 - Influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote para estimar la oferta de forraje del pasto <i>Urochloa humidicola</i> cv Llanero, a partir de imágenes multiespectrales.	59
2.1 Resumen.....	59
2.2 Introducción.....	60
2.3 Metodología	61
2.4 Localización	62
2.5 Imágenes ópticas del área de estudio	63
2.6 Cartografía básica	65
2.7 Área de pastoreo.....	66
2.8 Modelo de productividad de biomasa	66
2.9 Resultados y discusión.....	68
2.9.1 Caracterización productiva del pasto.	68

2.9.2 Correlación entre oferta de forraje y los índices de vegetación	69
2.9.3 Influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote del pasto.	72
2.10 Conclusiones.....	78
2.11 Recomendaciones.....	78
2.11 Bibliografía	79
Capítulo 3 - Estimación de la oferta de forraje y la calidad nutricional del pasto	
<i>Urochloa humidicola</i> cv Llanero partir de imágenes multiespectrales.....	86
3.1 Resumen.....	86
3.2 Introducción.....	87
3.3 Metodología	88
3.4 Imágenes ópticas del área de estudio	90
3.5 Cartografía básica	92
3.6 Área de pastoreo.....	93
3.7 Modelo de oferta de forraje y calidad nutricional.....	94
3.8 Resultados y discusión.....	96
3.8.1 Descripción de la pastura.....	96
3.8.1.1. Evaluación de la oferta de forraje.	96
3.8.1.2. Evaluación de la calidad nutricional.....	97
3.8.1.3. Índices de vegetación asociados a la pastura.....	99
3.8.2 Estimación de la oferta y calidad nutricional del pasto.	100
3.10. Conclusiones.....	110
3.11. Recomendaciones.....	111
3.11 Bibliografía	112

RESUMEN

Es una obligación por parte de la ciencia y el conocimiento proporcionar alternativas y soluciones a problemas identificados como limitantes para el aumento de la eficiencia y productividad de los sistemas ganaderos. El objetivo de esta tesis es la aplicación de las técnicas de sensoramiento remoto para la estimación de la producción y calidad del forraje en pasturas de *Urochloa humidicola* cv Llanero, bajo pastoreo en el piedemonte del departamento del Meta.

Para esta investigación se utilizaron herramientas e instrumentos de análisis espacial como: los vehículos aéreos no tripulados (VANT), los sistemas de navegación por satélite (GNSS, por sus siglas en ingles), los sistemas de información geográfica (SIG) y los softwares especializados. Se realizó caracterización productiva de la pastura, donde se obtuvo una producción promedio de 1.054kg MS/ha, una altura de planta de 44 ± 3 cm y valores promedios de proteína cruda (PC), fibra en detergente neutro (FDN), fibra en detergente acida (FDA) y lignina (LIG) de 105, 676, 358 y 82 g/kg respectivamente; se probaron siete índices de vegetación (IV) (NDVI, GCI, SRPI, SR, GNDVI, SAVI y RDVI), y los datos obtenidos se analizaron a partir de modelos aditivo generalizado (GAM).

Los resultados arrojaron que la altura de vuelo recomendable para la plataforma y sensor es de 70 metros; que el índice de vegetación con mayor correlación con la oferta de forraje es el NDVI (0.77); que respecto a la calidad nutricional, el IV que mayor se relacionó con la PC es el GNDVI (R^2 0.764); y que para FDN, FDA y LIG las relaciones encontradas no son concluyentes. Estos resultados obtenidos fueron específicos para las condiciones de la evaluación y se recomienda su validación en áreas mayores con la incorporación de series multitemporales de imágenes en ciclos hidrometeorológicos contrastantes.

Palabras clave: ganadería de precisión, imágenes multiespectrales, NDVI, pastura, vehículo aéreo no tripulado.

ABSTRACT

APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNIQUES IN THE EVALUATION OF A PASTURE OF *Urochloa humidicola* cv Llanero, UNDER GRAZING IN THE FOOTHILLS OF THE DEPARTMENT OF META

It is an obligation of science and knowledge to provide alternatives and solutions to problems identified as limiting for the increase of efficiency and productivity of livestock systems. The objective of this thesis is the application of remote sensing techniques for the estimation of forage production and quality in pastures of *Urochloa humidicola* cv Llanero, under grazing in the foothills of the department of Meta.

Spatial analysis tools and instruments were used for this research, such as: unmanned aerial vehicles, satellite navigation systems (GNSS), geographic information systems (GIS) and specialized software. A productive characterization of the pasture was carried out, obtaining an average production of 1,054 kg DM/ha, a plant height of 44 ± 3 cm and average values of crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and lignin (LIG) of 105, 676, 358 and 82 g/kg, respectively; seven vegetation indices (IV) were tested (NDVI, GCI, SRPI, SR, GNDVI, SAVI and RDVI), and the data obtained were analyzed from generalized additive models (GAM).

The results showed that the recommended flight height for the platform and sensor is 70 meters; that the vegetation index with the highest correlation with forage supply is NDVI (0.77); that with respect to nutritional quality, the IV with the highest correlation with CP is GNDVI (R^2 0.764); and that for FDN, FDA and LIG the relationships found are not conclusive. These results obtained were specific for the conditions of the evaluation and it is recommended to validate them in larger areas with the incorporation of multitemporal series of images in contrasting hydrometeorological cycles.

Key words: precision livestock, multispectral images, NDVI, pasture, unmanned aerial vehicle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Curva de la respuesta espectral de la vegetación.	25
Figura 1-2 Ejemplificación de las diferentes escalas en el sensoramiento remoto	29
Figura 2-1 Flujograma de actividades para el cumplimiento del primer objetivo específico.	61
Figura 2-2 Ubicación del área de pastoreo “Chipres” en el C.I. La Libertad.	62
Figura 2-3 Precipitación del 2019 comparada con el promedio de 30 años en el C.I. La Libertad.....	63
Figura 2-4 Ubicación de los puntos de control GCP.	65
Figura 2-5 Modelos GAM utilizados en el estudio	67
Figura 2-6 Presencia de la Aeneolamia spp en el pasto Urochloa humidicola c.v Llanero.	68
Figura 2-7 Matriz de correlación de las variables de crecimiento y los índices de vegetación.	70
Figura 2-8 Matriz de correlación de las variables de crecimiento y el índice de vegetación NDVI en las alturas de vuelo de 30, 50 y 70 metros.....	72
Figura 2-9 (a) Valores promedios del NDVI, (b) incremento promedio de la oferta de forraje y NDVI (c) cobertura del pasto en un punto de muestreo.....	75
Figura 2-10 Ajuste entre los valores del NDVI y la oferta de forraje.	77
Figura 3-1 Flujograma de actividades para el cumplimiento del segundo objetivo específico.	89
Figura 3-2 Ubicación del área de pastoreo “Chipres” en el C.I. La Libertad.	90
Figura 3-3 Ubicación de los puntos de control GCP.	93
Figura 3-4 Modelos GAM utilizados en el estudio.	95
Figura 3-5 (a) Precipitación del 2019 comparada con el promedio de 30 años en el C.I. La Libertad, (b) presencia de la Aeneolamia spp en el pasto Urochloa humidicola cv Llanero.	97
Figura 3-6 Matriz de correlación de las variables de crecimiento y los índices de vegetación.	101
Figura 3-7 Análisis de componentes principales.	102
Figura 3-8 (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.....	106
Figura 3-9 Ajuste entre los valores del IV GNDVI y la proteína cruda del pasto Llanero.	108
Figura 3-10 (a) Ajuste entre los valores del IV RDVI y la fibra en detergente neutra del pasto Llanero, (b) Ajuste entre los valores del IV SR y la fibra en detergente acida del pasto Llanero (c) Ajuste entre los valores del IV SR y la lignina del pasto Llanero.....	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 Ganancias de peso vivo en sistemas pastoriles de Urochloa humidicola c.v Llanero. (Sin. Brachiaria).	20
Tabla 1-2 Utilización de índices de vegetación en la evaluación de pasturas.	27
Tabla 1-3 Aplicaciones de sensores remotos orbitales en la evaluación de pasturas.	30
Tabla 1-4 Aplicaciones de sensores remotos transportados por VANT en la evaluación de pasturas.	33
Tabla 1-5 Aplicaciones de sensores remotos terrestres en la evaluación de pasturas.	34
Tabla 2-1 Características de la cámara utilizada	64
Tabla 2-2 Índices de vegetación y relación de bandas espectrales propuestos.	64
Tabla 2-3 Características productivas del pasto Urochloa humidicola c.v Llanero.	68
Tabla 2-4 Tamaños de pixel obtenidos a 30, 50 y 70 metros de altura de vuelo.	73
Tabla 2-5 Criterios de selección y coeficientes de determinación obtenidos a las tres alturas de vuelo.	74
Tabla 2-6 <i>Criterios de selección y coeficiente de determinación obtenidos para los seis modelos evaluados.</i>	76
Tabla 3-1 Características de la cámara utilizada.	91
Tabla 3-2 Índices de vegetación y relación de bandas espectrales propuestos.	91
Tabla 3-3 Calidad nutritiva del Urochloa humidicola cv Llanero en la época lluviosa.	98
Tabla 3-4 <i>Índices de vegetación calculados para Urochloa humidicola cv Llanero.</i>	99
Tabla 3-5 Estructura de los modelos GAM utilizados en el estudio.	104
Tabla 3-6 Criterios de selección para los modelos evaluados.	107

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción ganadera de carne y leche proporcionan alimentos básicos para la población en las áreas tropicales de América del Sur y son una actividad estratégica para las economías regionales. En Colombia el piedemonte del departamento del Meta, tiene 1'760.000 hectáreas que representan el 11% de su área en sistemas ganaderos bajo pastoreo, con aproximadamente 750.000 cabezas de ganado y una capacidad de carga de 1 animal/ha. Parámetro relativamente bajo si se compara con otras regiones del país, el cual se relaciona principalmente por la degradación de las praderas y consecuentemente con la disminución en la disponibilidad y calidad del forraje (Rincón y Flórez, 2018; FEDEGAN, 2006).

La degradación de las pasturas afecta directamente la productividad ganadera, causa pérdidas económicas a los productores y genera impactos ambientales negativos. Impactos provocados por la ampliación de la frontera agrícola en los predios para el sostenimiento de la carga animal. De acuerdo con el plan estratégico de la ganadería (PEGA) (FEDEGAN, 2006), se plantea la transformación de los sistemas ganaderos que han sido manejados bajo criterios tradicionales hacia una ganadería moderna, productiva y ambientalmente sostenible, donde es necesario generar alternativas que permitan esta transición, por lo cual, el monitoreo y la evaluación de las áreas pastoriles no solamente debe involucrar características centradas en el rendimiento de las plantas basados en métodos agronómicos convencionales, sino que debe requerir un enfoque que considere su entorno, la dinámica como sistema y las interacciones que existen entre los elementos funcionales y estructurales que lo constituyen (Zimmerer, 2010; Álvarez y Rincón, 2010; Preston *et al.*, 2015).

Dentro del monitoreo y gestión de las pasturas se encuentran las variables que se cuantifican en campo, como lo son: la oferta forrajera, la cobertura del pasto, la altura de planta, la calidad nutricional, las acciones de manejo como la implementación del pastoreo rotacional y el ajuste de carga animal. En la actualidad existen metodologías para realizar estas labores, pero presentan problemas ya que

son destructivas, costosas y demandan elevada mano de obra y tiempo, y por consiguiente su limitación se centra en que, aunque la muestra individual se mida con precisión, cada punto evaluado representa una observación de una cobertura que tiene un comportamiento heterogéneo y no permite un análisis espacial de esta y su aplicación en áreas extensas.

Los desarrollos tecnológicos han abierto la posibilidad de implementar nuevos enfoques de estudio al permitir monitorear las transformaciones antrópicas que afectan los espacios biofísicos (Rebordosa y López, 2010). Entre estos, el sensoramiento remoto permite estudiar las variaciones espaciales y temporales de las coberturas pastoriles, lo que contribuye de manera decisiva en la planificación del territorio, el desarrollo económico y el ordenamiento del uso del suelo (Dorigo et al., 2007; Paruelo, 2008).

Son diversos los trabajos de investigación que se han realizado en este tema con resultados satisfactorios, en Alemania, Capolupo *et al.*, (2015) evaluaron la eficiencia del uso de nitrógeno en pasturas; de forma semejante en Brasil, Rodrigues *et al.*, (2015) y Rodrigues (2017) evaluaron las características productivas en pasturas con diferentes dosis de fertilización y establecieron patrones de pastoreo bovino. En Colombia, Ramírez (2013) y Posada *et al.*, (2019) cuantificaron la oferta forrajera en los potreros y la calidad nutricional en el pasto Kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov) Morrene).

La aplicación de los sensores remotos a bordo de vehículos aéreos no tripulados para el manejo de las áreas pastoriles en el Piedemonte Llanero, tiene grandes posibilidades para incrementar la producción de carne y leche en la región, dado el gran número de hectáreas que existen; sin embargo, hay un limitado conocimiento sobre el manejo de esta tecnología en aspectos como la operación de las plataformas de vuelo, el procesamiento de las imágenes, la respuesta espectral de las especies forrajeras predominantes y el análisis de la información.

Este trabajo responde a la necesidad de desarrollar alternativas para la gestión de las áreas pastoriles en aspectos de oferta y calidad nutricional del pasto *Urochloa*

humidicola cv Llanero, a partir de imágenes multiespectrales, con el fin de aportar conocimiento y recomendaciones prácticas para asistentes técnicos y productores, que les permita incrementar la eficiencia y la productividad ganadera en el Piedemonte del departamento del Meta.

La estructura general de esta tesis se encuentra dividida en capítulos, el primero de ellos corresponde al marco teórico, el cual aborda el contexto general de la investigación, antecedentes, estado del arte, perspectivas de análisis y muestra el sensoramiento remoto como herramienta eficaz para el monitoreo de coberturas vegetales y su importancia para los sistemas de producción bovina. En el segundo capítulo se desarrollan los temas del primer objetivo específico y aborda el tema de la influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote en la estimación de la oferta forraje (OF). En el tercer capítulo se desarrolla el segundo objetivo específico, en el que se estima la OF y la calidad nutricional de este pasto. Los capítulos dos y tres fueron redactados como artículos científicos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Aplicar las técnicas de sensoramiento remoto para estimar la producción y calidad del forraje en pasturas de *Urochloa humidicola* cv Llanero, bajo pastoreo en el piedemonte del departamento del Meta.

Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote en la estimación de la oferta de forraje del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero, a partir de diferentes índices de vegetación provenientes de un VANT.
- Estimar la oferta de forraje y la calidad nutricional de una pastura de *Urochloa humidicola* cv Llanero, a partir de diferentes índices de vegetación provenientes de un VANT.

Capítulo 1 MARCO TEÓRICO

1.1 La pastura en el agroecosistema ganadero

El agroecosistema se define como la interacción de elementos económicos, sociales y ambientales que forman una unidad global (Casanova *et al.*, 2016). Es un sistema complejo de carácter abierto, resultado de la alteración o modificación de un ecosistema natural por parte del ser humano para la producción agrícola y pecuaria (García, 2008; Zimmerer, 2010; Toro-Mújica *et al.*, 2011; Castillo *et al.*, 2012; Preston *et al.*, 2015; Sarandón y Flores, 2016).

Los agroecosistemas ganaderos poseen componentes estructurales y funcionales que definen su naturaleza; los estructurales representan los aspectos tangibles o de forma, mientras que los funcionales se refieren a la transformación de la materia, la energía y la información en el agroecosistema (Gastó, 1979; Marten, 1988; Alcaraz, 2006; Hoffmann, From y Boerma, 2014).

Los atributos estructurales dependen del número y tipo de componentes, e incluyen todos los elementos propios del agroecosistema; algunos de ellos son de origen antrópico como los cultivos, obras de irrigación y adecuación de tierras, y otros son de tipo biótico como las malezas, las plagas, los animales y los microorganismos (Altier, 1999; Paruelo *et al.*, 2011; Glissman, 2014). Los atributos funcionales son consecuencia de la estructura, y consisten en los movimientos de materia, energía e información dentro y fuera del agroecosistema (Marten, 1988; García, 2006; Paruelo *et al.*, 2011).

La pastura dentro del agroecosistema ganadero tiene como función contribuir a la productividad animal, así como de brindar servicios ambientales y ecológicos. Además, el valor pastoril, en términos de oferta y calidad nutricional, está determinada por la naturaleza de la pastura y el contexto donde se desarrolla esta actividad (Holmes *et al.*, 2007; Pullanagari *et al.*, 2016).

1.1.1 El pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero

El pasto cultivar Llanero, *Urochloa humidicola* CIAT 6133, (sin. *Brachiaria humidicola*; antes considerada como *Brachiaria dictyoneura*) (Cook y Schultze-Kraft, 2015; Rincón *et al.*, 2018); es originario de Zambia, África del Sur (Kelemu *et al.*, 1995, Nguku *et al.*, 2016), fue introducido a Colombia en 1978 y posteriormente liberado en el año 1987 por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Este pasto tiene una gran aceptación en las diferentes regiones de país, especialmente en el piedemonte de los llanos orientales, sus características productivas y morfológicas hacen que esta gramínea tenga una alta demanda por parte de los productores (ICA, 1987; Cardozo, Sanches y Ferguson, 1991; Belalcazar *et al.*, 1994; Rincón, 1995; Rincón y Bueno, 1997).

El pasto Llanero tiene buen crecimiento en regiones desde los 0 a los 1,800 m s.n.m, se caracteriza por su adaptación a suelos ácidos de baja fertilidad, saturación de aluminio y preferiblemente de buen drenaje. Aunque crece bien en suelos con saturación temporal de agua (Rincón *et al.*, 2018); tolera la sequía, el ataque cercópidos del genero *Aeneolamia spp* (mión de los pastos), y a la *Rizoctonia solani*; es palatable para el ganado y una vez establecido proporciona una eficiente cobertura al suelo por su crecimiento estolonifero y rizomatoso; tiene buena capacidad de carga y es persistente bajo sobrepastoreo (Toledo, 1982; ICA, 1987; Cardozo *et al.*, 1991; Belalcazar *et al.*, 1994; Pardo y Pérez, 2010; Rincón, 2011; Peters *et al.*, 2011).

1.1.2 Característica de producción y composición nutricional.

La producción de materia seca (MS) es variable, pues depende de la precipitación y las condiciones de fertilidad del suelo (Pardo y Pérez, 2010). En las sabanas bien drenadas de los llanos orientales de Colombia, Carulla *et al.*, (1991) encontraron producciones de 669 y 1.538 kg MS/ha, en los periodos de sequía y de lluvia respectivamente; de forma similar Sánchez *et al.*, (1989) obtuvieron valores para la época seca de 700 kg MS/ha y en época de lluvias 1.500 kg MS/ha en la sub-región del Urabá antioqueño, y en la sub-región suroeste del departamento de Antioquia,

la producción fue contrastante al obtener 1.200 kg MS/ha en la época seca y 4.100 kg MS/ha en la época de lluvias.

El asocio del pasto Llanero con leguminosas de porte rastrero mejora la producción de forraje y mantiene una carga animal constante (Sánchez *et al.*, 2000; Pardo y Pérez, 2010; Nguku *et al.*, 2016). Lascano *et al.*, (1991) encontraron ofertas de biomasa estables durante tres años de 1.900 y 2.200 kg MS/ha, con una carga de 3.6 animales por hectárea (UA/ha) en asocio con *Desmodium ovalifolium* CIAT 350; Vela y Flores (1996) obtuvieron valores de 1.420 y 2.000 kg MS/ha con una carga animal que varió de 2 a 3 UA/ha; mientras que Carulla *et al.*, (1991), en la mezcla con *Arachis pintoii* CIAT 17434, encontraron una mejor proporción de consumo pasto-leguminosa durante la época seca con una producción de forraje de 669 kg MS/ha.

Esta gramínea también ha sido evaluada en otras regiones tropicales, en Ucayali - Amazonia peruana, Vela y Flores (1996) determinaron el efecto de la carga animal en la producción de carne, donde la disponibilidad del forraje ofrecido en la época seca fue 960 kg MS/ha y en la época de lluvias de 1.500 kg MS/ha; también en el estado de Veracruz – México, Cruz *et al.*, (2011) evaluaron el desempeño productivo de diferentes ecotipos de *Brachiaria humidicola*, donde el cultivar Isleño CIAT 6133 = cultivar Llanero, obtuvo unas producciones de 2.705, 683 y 479 kg MS/ha en las épocas de lluvia, vientos y sequía; y Nguku *et al.*, (2016) en la provincia semiárida de Machakos - Kenia, durante el periodo prolongado de lluvias obtuvieron una producción de 2.282 kg MS/ha.

Las condiciones del suelo también determinan el rendimiento de la biomasa, Pardo *et al.*, (1999) reportan producciones de forraje en diferentes condiciones texturales de suelo, Franco Arenosos, Francos, Franco Arcillosos y Arcillosos, con valores de 1.306, 1.492, 1.424 y 755 kg MS/ha, cortados cada 8 semanas, en los Llanos Orientales de Colombia y Gichangi *et al.*, (2017) obtuvieron valores de 1.270 y 900 kg MS/ha en cortes cada 8 semanas, en suelos Franco Arcilloso Arenoso y Arcilloso Arenoso respectivamente, en las regiones de Kitui y Makueni, en Kenia. Con relación a la productividad animal en la Tabla 1-1, se describe algunos de los

resultados obtenidos en relación a la capacidad de carga (animales/hectárea) y las ganancias de peso (g/animal/día).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 *Ganancias de peso vivo en sistemas pastoriles de Urochloa humidicola c.v Llanero. (Sin. Brachiaria).*

Especies	Carga (animal/ha)	Ganancias de peso (g/día)	Fuente
	2	330	Pardo y Pérez (2010)
	3	393	Rincón <i>et al.</i> , (1992)
<i>B. humidicola</i> c.v Llanero	3	490	Belalcazar <i>et al.</i> , (1994)
	3	445	Rincón <i>et al.</i> , (2018)
	3	368	
	3	380	Pardo y Pérez (2010)
<i>B. humidicola</i> c.v Llanero + <i>A. pintoi</i>	3	460	Rincón <i>et al</i> (1992)
	3	400	
<i>B. humidicola</i> c.v Llanero + <i>P. phaseoloides</i>	3	409	Pérez y Lascano, (1992)
<i>B. humidicola</i> c.v Llanero + <i>D. ovalifolium</i>	3	270	Vela, Keller y Pinedo (1990)
<i>B. humidicola</i> c.v Llanero + <i>D. heterocarpon</i>	3 a 6	400 a 500	ICA (1987)
<i>B. humidicola</i> c.v Llanero + <i>C. acutifolium</i>	-	400 a 600	ICA (1987)

Aunque el valor nutritivo de las especies de *Urochloa* es alto, existen diferencias considerables entre ellas, especialmente se ve reflejada en los valores de proteína cruda (PC). Cuando a estos pastos se les aplica fertilización nitrogenada y reciben buen manejo, producen forraje de alta digestibilidad y calidad nutricional. Como resultado, la producción animal que se obtiene es alta y relativamente estable en el tiempo (Lascano y Euclides, 1996; Díaz y Sierra. 2004; Peters *et al.*, 2011).

La calidad nutricional del pasto Llanero se considera media en términos de constitución química, digestibilidad y consumo. En épocas de lluvias Pardo y Pérez

(2010), reportaron valores de PC superiores al 12%, con promedio de 9.5% y degradabilidad *in situ* de la materia seca (DISMS) del 67%, mientras que Belalcazar *et al.*, (1994), han reportado valores entre 6 y 8% de PC y con DISMS entre el 55 y 60% y Rincón *et al.*, (2018) obtuvieron valores para esta misma época de 8.1% de PC, 68.9% DISMS, 73.5% de Fibra en detergente neutra (FDN) y 35.8% de Fibra en detergente acida (FDA).

Para la época seca el contenido de PC puede variar entre 3 a 4% y la DISMS de 45 a 50% (ICA, 1987), valores similares han sido obtenidos por Belalcazar *et al.*, (1994) con PC de 3% y DISMS entre el 5 a 45%; de igual forma Pardo y Pérez (2010) reportaron disminuciones en la PC a 6% y DISMS a 56%, y Giraldo *et al.*, (2007) obtuvo valores de PC, FDN y FDA de 8.4, 75.4 y 49.1% respectivamente. Sin embargo, Sánchez *et al.*, (2000) obtuvieron un valor menor de PC (7.3%) para la época de lluvia, en comparación a la época seca de 9.8%, lo que fue atribuido a que esta pastura no tolera el exceso de humedad.

1.2 Evaluación de la oferta de forraje

La oferta de forrajera es definida como la cantidad de material vegetal presente en un área determinada y en un momento específico; se representa en unidades de masa de materia seca por superficie y la expresión más utilizada en la pascicultura es (kg/MS ha) (Mendoza y Lascano, 1985; Gómez, 2008; Barrachina *et al.*, 2009; Barrachina, Cristóbal y Tulla, 2010; Arruda *et al.*, 2011; Posada, 2018). Otro término que ha sido utilizado por diferentes autores para denominar a la oferta de forraje es, Producción Primaria Neta Aérea (PPNA), definiéndola como la tasa de producción de biomasa vegetal aérea por unidad de espacio y de tiempo (Cristiano, 2010; Baeza y Paruelo, 2011; Irisarri *et al.*, 2013; Gallego *et al.*, 2017; Padilla, 2017; Pezzani *et al.*, 2017).

El contenido de humedad en los pastos es heterogéneo, el cual puede variar de acuerdo a los constituyentes celulares que tienen propiedades de absorber y retener agua; también varía de acuerdo a las condiciones ambientales presentes en el momento de la recolección de la biomasa verde (en fresco). Por lo cual, la oferta de forraje es preferible expresarla en biomasa seca, como resultado de un proceso de

deshidratación (Nancy *et al.*, 2002; Gómez, 2008; Barrachina *et al.*, 2010; Hepp *et al.*, 2017).

En los sistemas ganaderos, un paso previo a la toma de decisiones de tipo productivo es la evaluación de la disponibilidad de forraje de la pastura, para esto se han desarrollado diferentes metodologías agrupadas en directas e indirectas. En la primera, las estimaciones se obtienen a partir del corte y pesaje de la biomasa; sin embargo, este método es destructivo, costoso y demanda elevada mano de obra (Cardoso, Sánchez y Ferguson, 1991; Ramírez, 2013). Por consiguiente, la efectividad del método puede variar de acuerdo al número de cortes; aunque la muestra individual se mida con precisión, la limitación sigue siendo que cada punto evaluado representa una muestra de una cobertura que tiene un comportamiento heterogéneo (Haydock y Shaw, 1975; Edvan *et al.*, 2016; Díaz *et al.*, 2019a).

Dentro de las metodologías indirectas para la evaluación de pasturas, se encuentra el sistema BOTANAL (Tohill, Hargreaves y Jones, 1978), el cual incluye el método de doble muestreo por rango visual (Wilm, Costello y Klipple, 1944; Haydock y Shaw, 1975), y el método del rango de peso seco. El primero estima la oferta forrajera y el segundo estima la composición botánica (Jones y Hargreaves, 1979, Squella *et al.*, 1990; Mendoza y Lascano, 1995).

Otros métodos para evaluar la biomasa del forraje son: el disco medidor (Santillan *et al.*, 1979; Bernardi y Pérez, 2014) o también llamado medidor de placa ascendente (Arruda *et al.*, 2011), la sonda de capacitancia (Fletcher y Robinson, 1956; Campbell *et al.*, 1962, Toledo *et al.*, 1981), la atenuación beta (Mitchell, 1972), el medidor de altura no disturbada (Hepp *et al.*, 2017), la regla aforadora de forraje (Díaz, Fernández y González, 2011), el método de obstrucción visual (Robel *et al.*, 1970), y la estimación visual (Baars, 1981).

También se han desarrollado dispositivos electrónicos como el *Rapid Pasture Meter* © (www.pasturemeter.co.nz), que mide la biomasa del pasto por medio de sensores adentro de un túnel remolcado; lo que permite el registro y transferencia de datos

vinculados a un GNSS (Un Sistema Global de Navegación por Satélite) para crear mapas de rendimiento (Rennie *et al.*, 2009; Bareth y Schellber, 2018).

Otro método que ha tomado relevancia en los últimos años es el sensoramiento remoto, el cual ha contribuido a la implementación de otras perspectivas de estudio sobre parámetros productivos de los pastos, a partir sus propiedades ópticas (Rebordosa, y López, 2010).

1.3 El sensoramiento remoto

La expresión Sensoramiento remoto proviene de las locuciones latinas *Sensus*, más el sufijo *or* de sentir, y *remotus - a - um* de retirado, y fue usado por primera vez por el geógrafo Evelyn Pruitt a mediados de 1950's, en el análisis de datos meteorológicos (NASA, 1998, Pullanagari, 2011). Este término ha sido definido como la forma de adquirir información sobre un objeto o área geográfica desde un punto distante, sin que exista contacto físico a través de los instrumentos de teledetección (Lillesand, 2004; Jensen, 2005; Sanches, 2009; Campbell y Wynne, 2011); para que esto sea posible, el sensor capta las interacciones entre la radiación electromagnética (REM) y los objetos o fenómenos de estudio (Chuvieco, 2002; Gebbers y Adamchuk, 2010).

Los sensores remotos se clasifican de acuerdo a la fuente de radiación que perciben; en este sentido se encuentran dos grupos: los sensores pasivos y los sensores activos. Los primeros, obtienen la información de la REM que proviene del sol, luego de que ésta sea reflejada por la superficie de la tierra; entre estos están los sensores a bordo de satélites, las cámaras multiespectrales y algunos sensores de contacto. Los sensores activos, obtienen información de la radiación emitida por su propio sensor, luego de que el haz de energía sea reflejado por la superficie que se está observando; entre estos se encuentran, el radar, el sonar y el lidar (Pullanagari, 2011; Liang *et al.*, 2012; Dusseux, 2014, Barcelos, 2017).

En la teledetección, las especificaciones de la plataforma y la calidad del sensor generalmente están determinadas por la capacidad para obtener información. Por consiguiente, las características técnicas que dan idea del potencial de esta

herramienta es la unidad de visualización, la temporalidad, el rango de la longitud de onda (λ) y la intensidad de radiación que captura (Chuvienco, 2002; Liang, Li y Wang, 2012). Estas hacen referencia a:

Resolución espacial: corresponde al tamaño de pixel (del inglés *picture element*) de una imagen y es la unidad de medida en la cual el objeto más pequeño puede ser distinguido por el sensor. En consecuencia, a mayor tamaño de pixel, menor será la resolución espacial de la imagen (Posada, 2018; Chen *et al.*, 2019).

Resolución espectral: este término hace referencia al rango del espectro electromagnético en que una banda puede registrar, e involucra tres aspectos de medición. En los cuales es, el número de bandas que tiene el sensor, el ancho de la longitud de onda de cada banda y la posición en la que se ubican las bandas en el espectro electromagnético (Menezes y Almeida, 2012; Lima, Oliveira y Ferri, 2015).

Resolución temporal: es la frecuencia con la que el sensor adquiere imágenes de la misma superficie de la tierra. Esta característica es determinada por las propiedades de la plataforma, como la altura, la velocidad, la inclinación, y en el caso de los satélites por el patrón de orbita (Batista, 2003; Gebbers y Adamchuk, 2010; Dusseux, 2014).

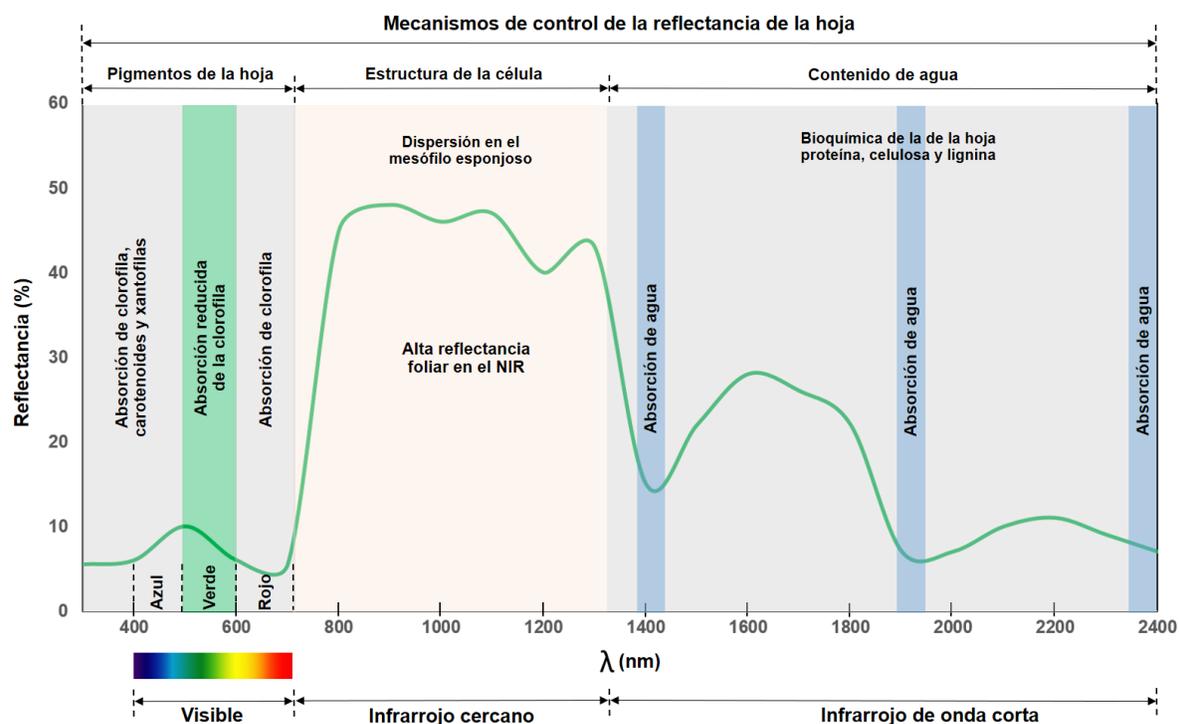
Resolución radiométrica: hace referencia a la capacidad con la que el sensor detecta y registra la intensidad de la energía emitida por una superficie, la cual se almacena en niveles digitales a cada pixel de la imagen. Como resultado, esta resolución se expresa en bits (Pullanagari, 2011; Barcelos, 2017).

1.5 Aspectos de fisiología vegetal asociado al sensoramiento remoto

El monitoreo de la vegetación a partir de sensores remotos se fundamenta en las propiedades que tienen las plantas para interactuar con la REM. Dentro del espectro electromagnético la región visible e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) (400 – 1300 nm) son las más utilizadas en las aplicaciones agrícolas, puesto que la luz proveniente del sol es la energía que la activa el proceso de fotosíntesis (Pinter, 2003; Hernández, 2017).

La radiación fotosintéticamente activa (RFA) es la fracción visible del espectro de la radiación solar, cuya longitud de onda está comprendida entre los 400 – 700 nm (Figura 1-1), y es utilizada por las plantas para el proceso de la fotosíntesis (Di Leo, 2007; Ferreira, 2018). En esta región, la reflectividad de las plantas es baja, debido a la fuerte absorción de los pigmentos de las hojas; principalmente clorofila, carotenoides, xantofilas y polifenoles. Todos ellos absorben en la banda situada en torno a los 445nm (B- azul), mientras que la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los 645nm (B- rojo). La clorofila *a* y *b* absorben radiación en las longitudes de onda de los 430nm y 450nm de la B-azul, y en la B-roja en los 650nm y 660nm respectivamente; como resultado a estas dos fuertes bandas de absorción se induce un pico de reflectancia alrededor de los 550nm (B-verde) y como consecuencia el color verde de las hojas (Tucker y Sellers, 1986; Peñuelas *et al.*, 1995; Chuvieco, 2002; Jensen, 2005; Blackburn, 2007; Liang, Li y Wang, 2012).

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 *Curva de la respuesta espectral de la vegetación.*



Fuente: Elaboración propia.

La mayor reflectancia de las plantas se da en la región NIR, en el rango de longitud de onda entre 700-1300 nm; esto es debido a que la luz se dispersa en las interfaces de las paredes celulares y los espacios aéreos intercelulares en el mesófilo de la hoja, donde las células del mesófilo esponjoso tienden a reflejar la radiación en este espectro (Slaton *et al.*, 2001; Sahoo *et al.*, 2015; Croft y Chen, 2017). Este comportamiento espectral en las regiones visible y NIR, es el fundamento teórico sobre el cual se desarrollaron los índices de vegetación (Sripada *et al.* 2006; Hernández, 2017).

1.4 Índices de vegetación

Los Índices de Vegetación (IV) son medidas cuantitativas basadas en los niveles de reflectancia obtenidos por un sensor y corresponden al producto aritmético de la combinación de diferentes bandas espectrales (Chuvieco, 2002; Ramírez, 2013). Estos índices resaltan las propiedades específicas de la vegetación y sus interacciones por medio de la energía electromagnética en diferentes longitudes de onda (Arantes, 2017; Mitsikostas, 2017).

Existen diferentes índices para estudiar la vegetación, entre los cuales están: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) que se caracteriza por el contraste entre la absorción al rojo por la clorofila y la reflectividad al infrarrojo generada por la estructura celular de las hojas (Cristiano, 2010; Andrade y Moncayo, 2017; Arantes, 2017); y el el Índice de Vegetación Resistente a la Humedad (ARVI, por sus siglas en inglés), que ajusta el valor del NDVI a la sensibilidad de la reflectancia del suelo, la densidad de vegetación y las condiciones atmosféricas (Kaufman y Tanré, 1992; Von Bennewitz, 2012; Andrade y Moncayo, 2017; Arantes, 2017; Mitsikostas, 2017).

En pasturas se han implementado otros como: el Índice de Brillo (BRI, por sus siglas en inglés), el Índice Perpendicular de Vegetación (PVI, por sus siglas en inglés), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés), el Índice de Vegetación Modificado Ajustado al Suelo (MSAVI, por sus siglas en inglés) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, por sus siglas en inglés) (Huete, 1988; Chehbouni *et al.*, 1994; Huete *et al.*, 2002; Beaulieu, Álvarez y Rincón, 2006).

Dentro de la variedad de índices, el NDVI y el EVI son los más utilizados, pues relacionan el vigor de la vegetación y la biomasa producida (Grigera, 2011; Madugundu *et al.*, 2017). En la Tabla 1-2, se describen diferentes usos de los índices espectrales en la evaluación de pasturas en agroecosistemas ganaderos.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2 *Utilización de índices de vegetación en la evaluación de pasturas.*

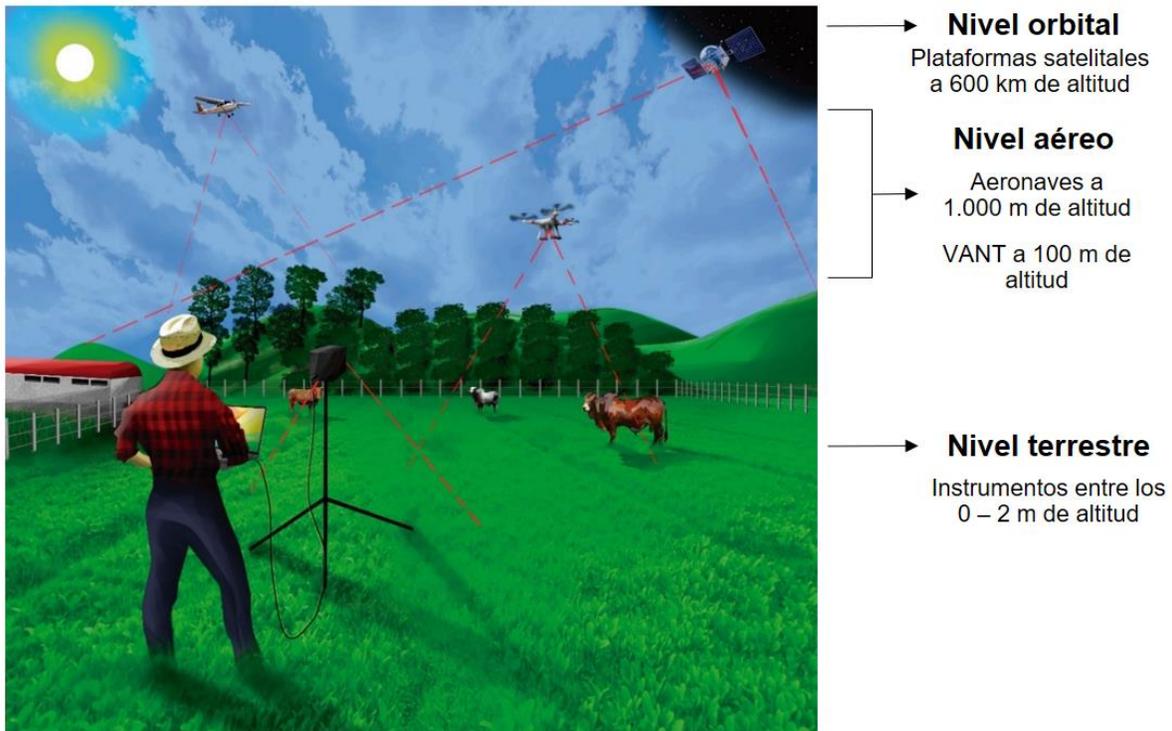
Índice de vegetación	Uso	Fuente
NDVI, EVI	Analizar la productividad anual de la vegetación y evaluar diferentes niveles de pérdida de cobertura vegetal.	Paruelo (2008)
NDVI	Utiliza el concepto del uso eficiente de la luz para estimar la capacidad de fotosíntesis en pasturas.	Donohue <i>et al.</i> , (2014)
NDVI	Asociar los índices de vegetación obtenidos por sensores satelitales, los cuales se validan con espectrorradiómetro de campo.	Watanabe <i>et al.</i> , (2017)
NDVI, EVI	Evaluar y comparar la capacidad de los índices de vegetación para monitorear la producción de biomasa en pasturas.	Huete <i>et al.</i> , (2002); Ramírez (2013)
NDVI	Espacializar el vigor de las pasturas por medio del índice IVP (Índice de Vigor de la Pastura).	Arantes (2017)
NDVI	Analizar la variación del NDVI en un modelo geoestadístico obtenido por espectrorradiómetro de campo e imágenes multiespectrales.	Andrade y Moncayo (2017)

Índice de vegetación	Uso	Fuente
NDVI	Utilizar el método MASD (Media Absoluta de la Dinámica Espectral) para clasificar pasturas.	Franke, Keuk y Siegert (2012)
MSAVI	Relacionar la respuesta espectral de las pasturas con la calidad nutricional obtenida en laboratorio.	Phillips <i>et al.</i> , (2009)

1.5 Aplicación del sensoramiento remoto en el monitoreo de pasturas

Para el monitoreo de las características heterogéneas de las pasturas en los agroecosistemas ganaderos a partir de sensores remotos, se han implementado diferentes niveles de observación, lo que ha permitido conocer de forma rápida las variaciones espaciales y temporales que a ellas les ocurren (Torres *et al.*, 2014). Por lo tanto, la distancia entre el sensor y la superficie de la tierra determina la escala de cobertura (Figura 1-2); clasificándose en tres niveles de aproximación (Batista, 2003). El primer nivel es el orbital, en este se encuentran los sensores a bordo de satélites artificiales, el segundo nivel es el aéreo, aquí los sensores pueden ir a bordo de aeronaves o en un vehículo aéreo no tripulados (VANT) y el tercer nivel es el terrestre donde los sensores van instalados en equipos de mano (Almeida, 2016; Barcelos, 2017; Da Silva, 2018).

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2
Ejemplificación de las diferentes escalas en el sensoramiento remoto



Fuente: Elaboración propia.

En la evaluación de los agroecosistemas ganaderos, se han considerado parámetros fisiológicos del crecimiento de las pasturas que son características detectables para los diferentes tipos de sensores; entre ellos se destacan los que se encuentran abordo de Landsat Terra/Aqua de MODIS y *RapidEye*, siendo los más referenciados de las plataformas satelitales.

Las imágenes captadas por Landsat han sido utilizadas en la caracterización de pasturas, clasificación de la vegetación y determinación de la humedad del suelo (García, Évora y Pérez, 2012; Ramírez, 2013; Lora, 2016). Igualmente, Tammadge, Álvarez y Rodríguez (2012), Ramírez (2013), Berrocal y Rodríguez (2015), y Padilla (2017), utilizaron el sensor MODIS para evaluar pasturas y determinar materia seca en la producción bovina, mientras que Running (2004), Turner *et al.*, (2005), y Castro *et al.*, (2015), usaron esta misma plataforma para monitorear el ciclo del

carbono a escala regional, con el objeto de estimar la Producción Primaria Bruta (PPB) y la Producción Primaria Neta (PPN). El sensor de *RapidEye*, ha sido implementado para identificar pasturas, medir niveles de nitrógeno y determinar la intensidad en el uso de pasturas, debido a su alta resolución espacial y espectral (Franke, Keuk y Siegert, 2012; Gómez *et al.*, 2017; Stenzel *et al.*, 2017). En la Tabla 1-3 se describe la aplicación de diferentes sensores a bordo de plataformas satelitales en la evaluación de pasturas en sistemas ganaderos.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3 *Aplicaciones de sensores remotos orbitales en la evaluación de pasturas.*

Sensor	Aplicación	Fuente
MODIS (MOD13Q1)	Estimación la capacidad de fotosíntesis en pasturas.	Donohue <i>et al.</i> , (2014)
Landsat-8/ OLI; Sentinel 2 ^a / MSI	Detección de la clorofila.	Watanabe <i>et al.</i> , (2017)
MODIS (MOD13Q1)	Producción de biomasa en pasturas.	Huete <i>et al.</i> , (2002); Ramírez (2013); Alves de Aguilar (2013)
Zenmuse X3	Evaluación del vigor de las pasturas.	Arantes (2017)
RapidEye	Identificación de la intensidad del uso de pasturas.	Franke, Keuk y Siegert (2012)
Landsat y ASTER	Integración de la información nutricional a un modelo geoespacial para estimar la capacidad de pastoreo.	Phillips <i>et al.</i> , (2009)
SPOT 4	Construcción de un modelo regional para la estimación productiva de pasturas.	Edirisinghea, Clarkb y Waughb (2012)

Sensor	Aplicación	Fuente
Landsat-8/ OLI; Sentinel 2 ^a / MSI	Producción de biomasa en pasturas.	Díaz <i>et al.</i> , (2019b)

Dentro de las plataformas aéreas, los VANT han sido utilizados ampliamente para evaluar sistemas ganaderos a escalas prediales, donde las imágenes multiespectrales captadas han permitido estudiar el comportamiento temporal y espacial de la oferta forrajera. En Colombia, Posada *et al.*, (2019) utilizaron un sensor multiespectral para estimar la oferta y calidad nutricional del pasto Kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov) Morrene) con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.90.

Rodrigues *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 VANT, en la detección de variaciones estructurales y bioquímicas en parcelas de pastos que habían tenido diferente aplicación en la dosis de nitrógeno.

Las imágenes obtenidas por los VANT, también han sido utilizadas para conocer patrones en el pastoreo de bovinos en estudios etológicos en Brasil (Rodrigues, 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 Nitroso (N_2O) a nivel de potrero.

Algunos autores como Gonçalves *et al.*, (2017) obtuvieron resultados satisfactorios al evaluar la capacidad de un sensor (vis-RGB) integrado a un VANT, para monitorear la variación espacial y temporal de una pastura en el municipio de Bom Sucesso - Brasil; de igual forma en Bélgica, Borra *et al.*, (2018) con este mismo tipo de sensor, desarrollaron una metodología para evaluar la persistencia de la cobertura del ryegrass perenne (*Lolium perenne*), obteniendo coeficientes de correlación superiores al 0.8, entre lo observado en campo y la respuesta espectral

del pasto. Por otro lado (Lussem *et al.*, 2018) en Alemania, obtuvieron resultados moderados en la estimación de la oferta forrajera con un sensor vis-RGB.

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

Mientras tanto Sankey, Leonatd y Moore (2019) en Arizona central, monitorearon las tendencias en la condición, de la salud y la degradación de los pastizales a partir de imágenes multiespectrales obtenidas por un VANT y concluyen 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 VANT's también han sido incorporados en diferentes sistemas de análisis. Insua *et al.*, (2019) en el estado de Michigan, 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 agrado 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 VANT 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).

Michez *et al.*, (2019) en la localidad de 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) y concluyeron que este modelo puede ser integrados a programas de

pastoreo de precisión. En la Tabla 1-4 se describe la aplicación de diferentes sensores en plataformas VANT, en la evaluación de pasturas en sistemas ganaderos.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4 *Aplicaciones de sensores remotos transportados por VANT en la evaluación de pasturas.*

Sensor	Aplicación	Fuente
Multiespectral-FluxData	Estimar el índice de área foliar y el contenido de materia seca en pasturas.	Rossini <i>et al.</i> , (2015)
Visible-RGB	Monitoreo de cobertura en pasturas.	Silva <i>et al.</i> , (2015); Freitas <i>et al.</i> , (2017);
Multiespectral-Canon S100 modificada	Elaboración de un modelo que identifique el desarrollo vegetal en sistemas de pastoreo.	Almeida (2016)
Multiespectral-Parrot Sequia	Generar un modelo a partir del índice NDVI, para el monitoreo de pasturas.	Andrade y Moncayo (2017)
Multiespectral-Tetracam MCA, MicaSense	Relación de índices espectrales con la oferta forrajera y calidad nutricional de la pastura.	Von Bueren y Yule (2013); Posada (2018)
Multiespectral-GRN Mapir	Correlacionar variables de volumen y vigorosidad del pasto con índices espectrales.	Sánchez y Yáñez (2018)
Multiespectral-MicaSense	Evaluación de la presencia de plantas no deseadas en pasturas nativas	De Barros <i>et al.</i> , (2018)
Multiespectral-Parrot Sequia	Monitoreo de cobertura en pasturas.	Jayasinghe <i>et al.</i> , (2019)

Sensor	Aplicación	Fuente
Multiespectral-MicaSense	Monitoreo de cobertura en pasturas.	Correa <i>et al.</i> , (2019b)
Multiespectral-MicaSense	Evaluación fitosanitaria en pasturas.	Hoyos-Rojas <i>et al.</i> , (2019)

Los sensores instalados en equipos de mano, han sido implementados en estudios de campo para evaluar diferentes tipos de pasturas. Rincón *et al.*, (2019) en el piedemonte los Llanos Orientales de Colombia, evaluaron la clorofila en grados SPAD en cuatro especies de *Urochloas*, la cual fue relacionada con el color de las hojas y el contenido de PC; donde se encontró coeficiente de regresión entre la PC foliar y los grados SPAD de 0.88, 0.76 y 0.84 para las especies *U. decumbens*, *U. brizantha* y *U. humidicola* respectivamente. De forma similar Guimarães *et al.*, (2011) utilizaron el medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para estimar los contenidos de MS y PC en el pasto *Brachiaria brizantha* cv. Marandú, donde encontraron R^2 en un modelo cuadrático de 0.94 y 0.96 respectivamente.

En los Alpes italianos Peitz (2019) utilizó un espectroradiómetro (HR1024i) para la caracterización de las firmas espectrales entre 500-900nm de diferentes pastizales, y en las sabanas de la Orinoquia colombiana Rippstein *et al.*, (2001) utilizaron un radiómetro terrestre (CIMEL, 500-890nm) para distinguir y clasificar las firmas espectrales de pastos nativos e introducidos.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5
Aplicaciones de sensores remotos terrestres en la evaluación de pasturas.

Sensor	Aplicación	Fuente
Radiómetro ASD FieldSpec®	Estimar la oferta forrajera en dos gramíneas tropicales	Numata <i>et al.</i> , (2008)
Radiómetro ASD FieldSpec®	Clasificación botánica de pasturas y leguminosas	Sanches (2009)

Sensor	Aplicación	Fuente
Radiómetro ASD FieldSpec®	Generación de mapas de oferta calidad mineral en pasturas	Kawamura <i>et al.</i> , (2009)
Radiómetro CropCircle™ ACS-210	Producción de biomasa en pasturas.	Trotter <i>et al.</i> , (2010)
Radiómetro Cropscan™	Calidad nutricional de pasturas	Pullanagari <i>et al.</i> , (2013)
Radiómetro ASD FieldSpec®	Obtención de firmas espectrales en pasturas.	Andrade y Moncayo (2017)
Radiómetro SVC HR2024i	Identificación de firmas espectrales en pasturas, para ser incorporado en un modelo transferencia radiativa - PROSAIL	Punalekar <i>et al.</i> , (2018)

1.6 Bibliografía

1. Andrade, B y Moncayo, L. (2017). *Análisis de NDVI contrastando diferentes metodologías de toma de datos espectrales, en cultivos de pastos en etapa previa de pastoreo* [Tesis de pregrado, Universidad de las fuerzas armadas] Repositorio Dspace. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13158>
2. Arantes, A. (2017). *Caracterização Biofísica e Potencial à Intensificação Sustentável da Pecuária Brasileira em Pastagens* [Tesis de doctorado, Universidad Federal de Goiás - UFG] Biblioteca Digital de Teses e Dissertações Biblioteca Digital Brasileña de Tesis y Disertaciones (BDTD). <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/8075>
3. Alcaraz, D. (2006). Caracterización del funcionamiento de los ecosistemas ibéricos mediante teledetección. *Ecosistemas*, 15 (1), 113-117. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/524>.
4. Almeida, M. (2016). *Uso de veículo aéreo não tripulado na determinação de índice de vegetação em área de pastagem em nova mutum-mt.* [Tesis de maestría, Universidad Federal de Goiás] Biblioteca Digital Brasileña de Tesis y Disertaciones (BDTD). <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5956>.
5. Arruda, D.S., Weber, M., Jobin, C y Carvalho, P.C. (2011). Métodos de avaliação de massa de forragem em pastagens de capim-estrela submetidas a intensidades de pastejo. *Ciência Rural*, 41 (11), 2004-2009. <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010384782011001100025&script=sci-abstract&tlng=pt>.
6. Altier, M. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74 (1), 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6).

7. Álvarez, M y Rincón, A. (2010). Características agroecológicas de la Orinoquia colombiana. En A. Rincón., C.A. Jaramillo (Ed.), *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos* (pp. 27-70). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12703>.
8. Alves de Aguiar, D. (2013). *Séries temporais de imagens modis para avaliação de pastagens tropicais* [Tesis de doctorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE] Biblioteca Digital Brasileña de Tesis y Disertaciones (BDTD). <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.30.14.33>.
9. Baars, J.A. (1981). Visual estimates of available herbage on hill country sheep pastures. *N.Z. Journal of Experimental Agriculture*, 9, 157-160. <https://doi.org/10.1080/03015521.1981.10427821>.
10. Baeza, S., Paruelo, J y Ayala, W. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15 (2), 48-59. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482011000200006.
11. Barcelos, C A. (2017). *O uso de veículo aéreo não tripulado (vant) em monitoramentos de campo: Aplicabilidades e Viabilidades* [Tesis de pregrado, Universidade Federal de Uberlândia] Repositório Institucional - Universidade Federal de Uberlândia. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20639>.
12. Bareth, G y Schellber, J. (2018). Replacing Manual Rising Plate Meter Measurements with Low-cost UAV-Derived Sward Height Data in Grasslands for Spatial Monitoring. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 86,157-168. <https://doi.org/10.1007/s41064-018-0055-2>.
13. Barrachina, M., Cristóbal, J., Tulla, A y Pons, X. (2009). Análisis de la producción de biomasa de los prados y pastos de la Vall Fosca (pirineo Axial-Nogueres). Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. 225-228. <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal57.pdf>.
14. Barrachina, M., Cristóbal, J., Tulla, A. (2010). Los recursos ganaderos en los sistemas extensivos de la montaña pirenaica catalana: aproximación al

- cálculo de la producción de biomasa herbácea mediante el uso de la teledetección. *Serie Geográfica*, 16, 35-49. <http://hdl.handle.net/10017/14221>.
15. Batista, G. (2003). Apostila introdutória de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Universidade de Taubaté. <http://www.clickgeo.com.br/apostila-introducao-ao-sensoriamento-remoto-geoprocessamento/>.
16. Beaulieu, N., Álvarez, M. y Rincón, M. (2006) Detección de la degradación en pasturas usando series temporales de imágenes multiespectrales en los llanos orientales de Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/1218>.
17. Bernardi, A.C y Pérez, N. (2014). Agricultura de Precisão em Pastagens. *Brazilian Precision Agriculture Research Network*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003689/agricultura-de-precisao-em-pastagens>.
18. Belalcazar, D., Durán, C y Lemus, L. (1994) Especies forrajeras tropicales de interés para pasturas en suelos ácidos de Colombia. En C. Escobar., J. Lotero y L. S (Ed.) *Unidades de Aprendizaje para la Capacitación en Tecnología de Producción de Pastos*. Centro Internacional de Agricultura Tropical- CIAT.
19. Berrocal, L y Rodríguez, M. (2015). Aplicaciones de imágenes MODIS para la estimación de materia seca disponible en pastizales extensivos. *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 681-689. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7386218>.
20. Blackburn, G. A. (2007). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, 58 (4), 855-867. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl123>
21. Borra, I., De Swaef, T., Aper, J., Ghesquiere, A., Mertens, K., Nuyttens, D., Saeys, W., Somers, B., Vangeyte, J., Roldán-Ruiz, I y Lootens, P. (2018). Towards an objective evaluation of persistency of Lolium perenne swards using UAV imagery. *Euphytica*, 214 (142). <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2208-1>.
22. Brenner, C., Zeeman, M., Bernhardt, M y Schulz, K. (2018). 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, 5141-5174. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1280202>.
23. Campbell, J.B., & Wynne, R.H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*: Guilford Press.
24. Campbell, A.G., Phillips, D.S y Reilly, O. (1962). An electronic instrument for pasture yield estimation. *J. Br. Grassld. Soc.* 17, 89-99. DOI: 10.1111/j.1365-2494.1968.tb00577.x.
25. Capolupo, A., Kooistra, L., Berendonk, C., Boccia, L y 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, 2792 – 2820. 10.3390/ijgi4042792.
26. Cardozo, C.I., Sánchez, M y Ferguson, E.J. (1991). Efecto del método de cosecha en el rendimiento y calidad de las semillas de *Brachiaria dictyoneura* cv. Llanero. *Tropical Grasslands*, 13 (1). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
27. Carulla, J.E., Lascano, C.E., Ward, J.K. (1991). Selectivity of resident and oophagous fistulated steers grazing *Arachis pintoi* and *Brachiaria dictyoneura* in the Llanos of Colombia. *Tropical Grasslands*. 25, 317-324. Disponible en: <https://cqspace.cqjar.org/handle/10568/44085>.
28. Casanova, L., Martínez, J., López, S., López, G. (2016). De von Bertalanffy, a Luhmann: Deconstrucción del concepto “agroecosistema” a través de las generaciones sistémicas. *Revista Mad. Revista del Magíster en Análisis Sistémico Aplicado a la Sociedad*, 35, 60-74. <https://doi.org/10.5354/rmad.v0i35.42797>.
29. Castano, A., Riaño, N., Peña, A., Ramírez, V., Valencia., A, Figueroa, A y Vinasco, G. (2017). Energy, water vapor and carbon fluxes in Andean agroecosystems: conceptualization and methodological standardization. *Biodiversity and Ecosystem Services*, 66 (1), 27-34. <https://doi.org/10.15446/acaq.v66n1.52543>.
30. Castillo, D., Tapia, M., Brunett, L., Márquez, O., Terán, O. y Ayala, E. (2012). Evaluación de la sustentabilidad social, económica y productiva de dos

- agroecosistemas de producción de leche en pequeña escala en el municipio de Amecameca, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12 (3), 690-704. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4690130>.
31. Castro, M., Palma, M., Ochoa, V y Neto, C. (2015). Servicios ecosistémicos: evaluación y valoración económica del secuestro de CO₂ en bosques y áreas protegidas del Área de Conservación Guanacaste -ACG, Costa Rica. <https://www.iaii.int/es/post/detail/servicios-ecosistemas-una-evaluacion-y-valoracion-economica-del-secuestro-de-carbono-en-bosques-del-area-de-conservacion-guanacaste-costa-rica>.
32. Cook, B y Schultze-Kraft. (2015). Botanical name changes – nuisance or a quest for precision?. *Tropical Grasslands*, 3, 34-40. 10.17138/TGFT(3)34-40.
33. Cristiano, P.M. (2010). *Estimación de la productividad primaria mediante el modelo de eficiencias y sensores remotos*. [Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires]. DOI:10.13140/RG.2.2.32765.46562.
34. Chen, Y., Guerschman, J.P., Cheng, Z y Guo, L. (2019). Remote sensing for vegetation monitoring in carbon capture storage regions: A review. *Applied Energy*, 249, 312-326. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.027>.
35. Croft, H., y Chen, J.M. (2018). Leaf pigment content. En S. Liang (Ed.), *Comprehensive remote sensing*. Oxford: Elsevier.
36. Cruz, P., Hernández, A., Quiroz, J., Mendoza, S., Quero, A y Torres, B. (2011). Desempeño agronómico de genotipos de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickt en el trópico húmedo de México. *Revista fitotecnia mexicana*, 34 (2). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000200011.
37. Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, H y Sorooshian. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 48 (2) 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1).
38. Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. 1a. ed. Barcelona. Editorial Ariel.
39. Correa, M., Bastiani, N., Barreto, J., Deibler, A y Bidese, L. (2019a). Avaliação de sensor multiespectral em mapeamentos da infestação de pastagens

- naturais pelo capim-annoni. Anais de XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 14 a 17 de abril. Santo, Brasil.
40. Correa, M., Barreto, J., Bastiani, N y Deibler, A. (2019b). Aplicação do índice de cobertura verde em pastagem de azevém. Anais de XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 14 a 17 de abril. Santo, Brasil.
41. Da Silva, H. (2018). *Utilização de drone em mapeamentos florestais para classificação do uso e ocupação do solo*. [Tesis de maestría, Universidade Federal do Paraná] Dspace. <https://hdl.handle.net/1884/60786>.
42. De Barros, C., Baierle, J., Correa, M y Bastiani, N. (2018). Uso de sensor multiespectral em aeronave remotamente pilotada para avaliação da infestação de pastagem nativa por *Eragrostis Plana* (Ness). VII Simpósio de Iniciação Científica da Embrapa Pecuária Sul.
43. Díaz, H y Sierra, J. (2004). Materiales de propagación y distancias de siembra en *Brachiaria humidicola* y *Brachiaria dictyoneura*. *Pasturas Tropicales*, 26, (2). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
44. Díaz, J.E, Fernández, R y González, A. (2011). Measuring Herbage Mass by Non-Destructive Methods: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 1 (3), 303-314. https://www.researchgate.net/publication/274640623_Measuring_Herbage_Mass_by_Non-Destructive_Methods_A_Review.
45. Díaz, R.A., Moreno, H.W., Pérez, O., Rincón, A y Salcedo, J. (2019a). Uso de sistemas de información geográfica para identificar espacialmente la oferta de forraje verde de *Brachiaria decumbens* Stapf cv Basilisk en el Piedemonte Llanero. 42º Congreso Argentino de Producción Animal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 39 (1), 99-167. <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/rapa/article/view/16419/45454575768681>.
46. Díaz, R.A., Alvarez, M., Pérez, O., Gutiérrez, B y Villalobos, M. (2019b). Uso de sensores remotos en la determinación de la oferta de forraje del pasto *Brachiaria humidicola* subsp. *dictyoneura* bajo pastoreo en la Altillanura colombiana. 42º Congreso Argentino de Producción Animal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 39 (1), 99-167. <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/rapa/article/view/16419/45454575768681>.

47. Di Leo, N., Montico, S., Bonel, A., Denoia, A. (2007). Estimación de la APAR y la NPP mediante sensoramiento remoto en tres sectores de la Pampa Húmeda, Argentina. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 18, (35), 221-241.
48. Dorigo, W., Zurita, R., de Wit, A., Brazile, J., Singh, R. y Schaepman, M. (2007) A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9 (2), 165–193. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.05.003>.
49. Donohue, R., Hume, C., Roderick, M., McVicar, T., Beringer, J., Hutley, L....Arndt, S. (2014). Evaluation of the remote-sensing-based DIFFUSE model for estimating photosynthesis of vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 155, 349-365. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.007>.
50. Dusseux, P. (2014). *Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole*. [Tesis de doctorado, Université Rennes 2 Haute-Bretagne] HAL theses. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01131770/file/2014theseDusseuxP.pdf>.
51. Edirisinghea, A., Clarkb, D. y Waughb D. (2012). Spatio-temporal modelling of biomass of intensively grazed perennial dairy pastures using multispectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 16, 5-16. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.11.006>.
52. Edvan, R., Bezerra, L., Marques, C., Socorro, Carneiro, M., Oliveira, R y Ferreira, R. (2016). Methods for estimating forage mass in pastures in a tropical climate. *Revista de Ciências Agrárias*, 39 (1), 36-45. DOI: 10.19084/RCA14100.
53. Federación Colombiana de Ganaderos – FEDEGAN. (2006). Plan estratégico de la ganadería colombiana 2019, Sanmartín Obregón & Cía. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13049>.
54. Ferreira, C.C. (2018). *Produtividade primária bruta para áreas de cana de-açúcar e cerrado na bacia hidrográfica do mogi guaçu – sp*. [Tesis de maestría, Universidade Federal de Campina Grande] Repositorio Dspace. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1569>.

55. Fletcher, J.E y Robinson, M.E. (1956). A capacitance meter for estimating forage weight. *Journal of Range Management*, 9 (2), 96-97. <https://doi.org/10.2307/3894559>.
56. Franke, J., Keck, V y Siegert, F. (2012). Assessment of grassland use intensity by remote sensing to support conservation Schemes. *Journal for Nature Conservation*, 20 (3), 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2012.02.001>.
57. Freitas, V., Butturi, W., Ottonelli de Bona, D., Oliveira, M., Barreto, L y Nunes, G. (2017). Uso de imagens obtidas com veículo aéreo não tripulado (VANT) para verificação do indicador de cobertura do solo no monitoramento da restauração florestal. XVII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. https://www.icv.org.br/drop/wp-content/uploads/2017/06/Artigo_Uso_do_VANT_monitoramento_restauracao_florestal_ICV_2017.pdf.
58. Gallego, F., Lezama, F., Pezzani, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Mello, A y Costa B. (2017). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 21 (1). 120-130. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482017000100120.
59. García, G. (2006). La escala y su importancia en el análisis espacial. *Ecosistemas*, 15 (3), 7-18. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=432&Id_Categoria=1&tipo=portada.
60. García, R. (2008). Sistemas Complejos. Conceptos, Método y Fundamentación Epistemológica de la Investigación Interdisciplinaria., Gedisa. <https://repositorio.esocite.la/id/eprint/364>.
61. García, M., Évora, J y Pérez, M. (2012). Satélites de Teledetección para la gestión del territorio. Proyecto SATELMAC, Programa de Cooperación Transnacional Madeira – Azore. https://geoinnova.org/libro/satelites-teledeteccion-la-gestion-del-territorio/?gclid=Cj0KCQjwm6KUBhC3ARIsACIwxBiAl_DgJguIQ0eqY5Fac1i9vT0foMQMESbJEDmstZIn2aS9rglcpTAaAgNNEALw_wcB.

62. Gastó, J. (1979). Ecosistema, componentes y atributos relativos al desarrollo y medio ambiente. Estilos de desarrollo y medio ambiente en América Latina. <http://hdl.handle.net/11362/20474>.
63. Gebbers, R y Adamchuk, V.I. (2010). Precision Agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831. DOI:10.1126/science.1183899.
64. Giraldo, L., Ranilla, M., Tejido, M y Carro, M. (2007). Efecto de la sustitución de *Brachiaria dictyoneura* por acacia mangium sobre la fermentación ruminal in vitro. *Pasturas Tropicales*, 29, 39-46. http://www.tropicalgrasslands.info/public/journals/4/Elements/DOCUMENTS/2007-vol29-rev1/Vol_29_rev1_07_pags_39-46.pdf.
65. Gichangi, E.M., Njarui, D.M y Gatheru, M. (2017). Plant shoots and roots biomass of brachiaria grasses and their effects on soil carbon in the semi-arid tropics of Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, 65-74. <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2244>.
66. Glissman, S (2014). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*. California, Estados Unidos, CRC Press.
67. Gómez, D. (2008). Aspectos ecológicos de los pastos. En F, Fillat., R, García-González., D, Gómez., R, Reiné (Ed.), *Pastos del Pirineo*, cap. 7: 61- 73. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Premios Félix de Azara, Diputación de Huesca. Madrid.
68. Gómez, M., Jong, R., Della Peruta, R., Keller, A. y Schaepman, M. (2017). Determination of grassland use intensity based on multi-temporal remote sensing data and ecological indicators. *Remote Sensing of Environment*, 198, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.003>.
69. Gonçalves, L.M., Barbosa, G.A., Ferraz, S., Maciel, T y Santos, H.F. (2017). Variabilidade espacial e temporal do índice vegetação mprí aplicado às imagens de grama são carlos obtidas por aeronave remotamente pilotada. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 11 (4), 340-349. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2017v11n4p340-349>.
70. Grigera, G. (2011). *Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos* [Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires] Reositorio Institucional Científico y Académico de la Facultad de Agronomía

- UBA.
https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/FAUBA_9560df82cf_d98ba5186690e3789b95bf.
71. Guimarães, M.M.C., Matsumoto, S. N., Figueiredo, M. P., Cruz, P. G y Araújo, G. S. (2011). Estimativa da composição química do capim Braquiária cv. Marandú por meio de um clorofilômetro portátil. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, 4 (2), 85–91. <https://doi.org/10.5777/paet.v4i2.1084>.
72. Haydock, K.P y Shaw, N, H. (1975). The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Aust. J. Exp. Anim. Husb*, 15 (76), 663-670. <https://doi.org/10.1071/EA9750663>.
73. Hernández, R. (2017). *Metodología para discriminación de malezas basada en la respuesta espectral de la vegetación*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá] Repositorio Institucional Biblioteca Digital – UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59816>.
74. Hepp, C., Reyes, C., Soto., R., Cáceres, E., Barattini, P y Juárez, D. (2017). Métodos de medición de disponibilidad de biomasa (materia seca) en praderas bajo pastoreo. En C, Hepp y C, Reyes. *Determinación de la disponibilidad de materia seca en praderas a pastoreo en la Patagonia húmeda (región de Aysén)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín 351. <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40661.pdf>.
75. Hoffmann, I., From, T. y Boerma, D. (2014). Ecosystem services provided by livestock species and breeds, with special consideration to the contributions of small-scale livestock keepers and pastoralists. Background study paper, 66 (1). Disponible en: <https://www.fao.org/publications/card/es/c/396d4e98-614e-47a4-83cb-57b8fc7508af/>.
76. Holmes, C.W., Wilson, G.F., Mackenzie, D.D.S., Flux, D.S., Brookes, I.M y Davey, A.W.F. (Ed. D Swain (2007) *'Milk production from pasture.'* (Massey University: Palmerston North, New Zealand
77. Hoyos Rojas, J., Posada Asprilla, W., y Cerón Muñoz, M. (2019). Fotografía multiespectral para el diagnóstico fitosanitario del pasto kikuyo (*Cechrus clandestinus* (Hochst ex Chiov) Morrone). *Acta Agronómica*, 68 (1), 61-67. <https://doi.org/10.15446/acaq.v68n1.75662>.

78. Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
79. Huete, A; Didan, K; Miura, T; Rodriguez, E, P; Gao, X; Ferreira, L, G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 (2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
80. Instituto Colombiano Agropecuario. (1987). Pasto Llanero. Boletín Técnico (151). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/20476/78464_7324.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
81. Insua, J.R, Utsumi, S.A y 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). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>
82. Irisarri, J.G., Gundel, P.E., Clavijo, M.P., Durante, M y Sosa, P. (2013). Estimación de la PPNA y la capacidad de carga por ambientes mediante información satelital en un establecimiento ganadero en la Pampa Deprimida. *Revista Argentina de Producción Animal*, 33 (1), 11-37. <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/rapa/article/view/3562>.
83. Jayasinghe, C., Badenhorst, P., Wang, J., Jacobs, J., Spangenberg, G y Smith, K. (2019). An Object-Based Image Analysis Approach to Assess Persistence of Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.) in Pasture Breeding. *Agronomy*, 9 (9). <https://doi.org/10.3390/agronomy9090501>.
84. Jensen, J R. (2005). Remote Sensing and digital image processing. En Kaveney D E (Ed.), *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 3rd ed. Prentice Hall series in geographic information science. United States of America.
85. Jones, R.M y Hargreaves, J.N. (1979). Improvements to the weight-rank method for measuring botanical composition. *Grass and Forage Science*, 34, 181-189. DOI:10.1111/j.1365-2494.1979.tb01465.x.

86. Kaufman, Y y Tanré, D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, 30 (2), 261-270. DOI: 10.1109/36.134076.
87. Kawamura, K., Betteridge, K., Sanches, D.I., Tuohy, M., Costall, D y Inoue, Y. (2009). Field radiometer with canopy pasture probe as a potential tool to estimate and map pasture biomass and mineral components: A case study in the Lake Taupo catchment, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52 (4), 417-434. DOI:10.1080/00288230909510524.
88. Kelemu, S., Miles J., Bonilla, M y Badel, L. (1995). Sources of resistance in species of *Brachiaria* to foliar blight disease caused by *Rhizoctonia solani*. *Tropical Grasslands*, 29, 257-262. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/44119>.
89. Lascano, C.E., Avila, P., Quintero, I.E y Toledo, J.M. (1991). Atributos de una pastura de *Brachiaria dictyoneura* - *Desmodium ovalifolium* y su relación con la producción animal. *Tropical Grasslands*, 13 (2). Disponible en: <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
90. Lascano, C. E y Euclides, V.P.B. (1996). Nutritional Quality and Animal Production of *Brachiaria* Pastures. En J.W.Miles, B.L.Maas y C.B. Do Valle (Ed.) *Brachiaria: Biology, Agronomy, and Improvement*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Campo Grande, Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte. Cali, Colombia.116.
91. Liang, S., Li, X y Wang, J. (2012). A Systematic View of Remote Sensing. En S. Liang., X, Li y J, Wang (Ed.), *Advanced Remote Sensing, Terrestrial information Extraction and Applications*. ELSEVIER.
92. Lima, V A., Oliveira, B y Ferri, B. (2015). Curso de capacitação para implantação de cadastro territorial multifinalitário nos municípios do sudoeste do Paraná. Módulo 3- sensoriamento remoto e geoprocessamento. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. <https://www.capacidades.gov.br/blog/detalhar/id/85/post/737/param/ativos>.
93. Lora, C. (2016). *Comparativa de sensores espaciales de diferente resolución espectral en la exploración minera* [Tesis de maestría, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa] UPCCompos. <http://hdl.handle.net/2117/96828>.

94. Lussem, U., Bolte, A., Gnyp, M., Jasper, J y Barath, G. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol XLII-3. Mid-term Symposium “Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing”, 7–10 May, Beijing, China. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>.
95. Lillesand, T.M., Kiefer, R. W y Chipman, J.W. (2004). *Remote sensing and image interpretation*: Jhon Wiley y Sons Ltd.
96. Madugundu, R., Al-Gaadi, K., Tola, E., Kayad, A y Jha, C. (2017). Estimation of gross primary production of irrigated maize using Landsat-8 imagery and Eddy Covariance data. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24 (2), 410-420. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.10.003>.
97. Maire, J., Gibson-Poole, S., Cowan, N., Reay, D.S., Richards, K.G., Skiba, U., Rees, R.M y Lanigan, G.J. (2018). Identifying Urine Patches on Intensively Managed Grassland Using Aerial Imagery Captured From Remotely Piloted Aircraft Systems. *Front. Sustain. Food Syst*, 2 (10). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00010>.
98. Marten, G. (1988). Productivity, Stability, Sustainability, Equitability and Autonomy as Properties for Agroecosystem Assessment. *Agricultural Systems*, 26 (4), 291-316. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(88\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0308-521X(88)90046-7).
99. Mendoza, P y Lascano, C. (1985). Mediciones en la pastura en ensayos de pastoreo. En C. Lascano y E. Pizarro (Ed.), *Evaluación de pasturas con animales. Memorias de una reunión de trabajo celebrada en Perú, 1-5 de octubre de 1984*. Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales (RIEPT), CIAT, Cali, Colombia.
100. Menezes, R P; Almeida, T (2012). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília. <https://docplayer.com.br/951443-Introducao-ao-processamento-de-imagens-de-sensoriamento-remoto-paulo-roberto-meneses-tati-de-almeida-organizadores.html>

101. Mitchell, J.E. (1972). An Analysis of the Beta-Attenuation Technique for Estimating Standing Crop of Prairie Range. *Society for Range Management*, 25 (4), 300-304 DOI:10.2307/3896918.
102. Michez, A., Lejeune, P., Bauwens, S. Herinaina, A.A.L., Blaise, Y., Castro Muñoz, E., Lebeau, F y 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.
103. Mitsikostas, A. (2017). *Monitorización y optimización de tierras con drones y fotogrametría aérea para aplicaciones de precisión en agricultura* [Trabajo de maestría, Universidad Politecnica de Valencia] Riunet – UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/86353>.
104. Nancy, J., Thiex, J y Van Erem, T. (2002). Determination of Water (Moisture) and Dry Matter in Animal Feed, Grain, and Forage (Plant Tissue) by Karl Fischer Titration: Collaborative Study. *Thiex & Van Erem: Journal of AOAC international*, 85 (2), 318-327. <https://doi.org/10.1093/jaoac/85.2.318>.
105. NASA. (1998). The remote sensing tutorial. <http://rst.gsfc.nasa.gov/>
106. Nguku, N., Njarui, D., Musimba, N., Amwata, D y Kaindi, E. (2016). Primary production variables of brachiaria grass cultivars in Kenya dry lands. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19 (1), 29-39. Disponible en: <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2167>.
107. Numata, I., Roberts, D., Chadwick, O., Schimel, J., Galvao, L y Soares, J. (2008). Evaluation of hyperspectral data for pasture estimate in the Brazilian Amazon using field and imaging spectrometers. *Remote Sensing of Environmet*, 112 (4), 1569-1583. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.014>.
108. Pardo, O., Rincón, A y Hess. (1999). Gramíneas y leguminosas adaptadas a las condiciones de los llanos orientales. En C.A. Jaramillo (Ed.), *Alternativas forrajeras para los llanos orientales de Colombia* (pp. 7-23). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35795>.

109. Pardo, O y Pérez, O. (2010). Alternativas forrajeras para los llanos orientales de Colombia. En A. Rincón., C.A. Jaramillo (Ed.), *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos* (pp. 27-70). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12703>.
110. Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17 (3), 4-22. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/83>.
111. Paruelo, J., Oesterheld, M. y Grigera, G. (2011). El Seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En: Bases Ecológicas y Tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo, Eds. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. https://wwfar.awsassets.panda.org/downloads/kit_pampas_manual_seguimiento_satelital_del_forraje.pdf.
112. Padilla, G.A. (2017). *Estimación de la productividad primaria neta aérea (PPNA) del forraje de pastos para los sistemas de producción ganadera mediante sensores remotos* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle] Biblioteca digital. <http://hdl.handle.net/10893/10315>.
113. Peitz, J. L. (2019). *UAV based hyperspectral grassland monitoring in an alpine shallow erosion area Lessons learnt from classifying vegetation indicating shallow erosion risk* [Trabajo de maestría, Lund University] LUPP Student Papers. <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8978657>.
114. Pérez R. A. y Lascano C. E. 1992. Potencial de producción animal de asociaciones de gramíneas y leguminosas promisorias en el Piedemonte de la Orinoquía Colombiana. En. Pizarro E.A (Ed.), *Primera Reunión Sabanas de la Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales (RIEPT)*, (p. 23-26). CPAC/EMBRAPA y CIAT.
115. Peñuelas, J., Bart, F y Filella, I. (1995). Semi-empirical índices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31 (2), 221-230. <https://hal.inrae.fr/hal-02779352>.
116. Pessi, D., José, J., Mito, L y Silva, N. (2020). Aeronave remotamente pilotada de baixo custo no estudo de plantas invasoras em áreas de cerrado.

- Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 8 (1), 68-80. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8433>.
117. Peters, M., Franco, L., Schmidt, A y Hincapié, B. (2011). Especies forrajeras Multipropósito: Opciones para productores del trópico Americano. Centro Internacional de Agricultura Tropical-CIAT. Publicación CIAT (374). <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/54681?show=full>.
118. Pezzani, F., Lezama, F., Gallego, F., López-Márisco, L., Leoni, E., Costa, B., Parodi, G y Mello, A.L. (2017). El método de corte de biomasa genera mayores diferencias en la estimación de la productividad de pastizales que el tipo de pastizal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 37 (1), 21-32. https://www.researchgate.net/publication/317549460_El_metodo_de_corte_de_biomasa_genera_mayores_diferencias_en_la_estimacion_de_la_productividad_de_pastizales_que_el_tipo_de_pastizal.
119. Pinter, P. J., Jr., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S. T. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (6), 647-664. Disponible en: <https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1372/>.
120. Posada, A. W. (2018). *Evaluación de praderas de pasto kikuyo (Cenchrus clandestinus (Hochst. Ex Chiov) Morrone) a través de imágenes multiespectrales* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad de Antioquia.
121. Posada, A. W., Medina, M y Cerón, M. (2019). Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone) usando imágenes multiespectrales. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22 (1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195>.
122. Preston, B., King, A., Ernst, M., Absar, S, Nair, S. y Parish, E. (2015). Scale and the representation of human agency in the modeling of agroecosystems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.05.010>.
123. Phillips, R., Beri, O., Scholljegerde, E., Bjergaard, D y Hendrickson, J. (2009). Integration of geospatial and cattle nutrition information to estimate paddock grazing capacity in Northern US prairie. *Agricultural Systems*, 100 (1-3), -72-79. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.01.002>.

124. Pullanagari, R. R. (2011). *Proximal sensing techniques to monitor pasture quality and quantity on dairy farms* [Tesis de doctorado, Massey University] Theses and Dissertations. <http://hdl.handle.net/10179/3695>.
125. Pullanagari, R., Yule, I., Tuohy, M., Hedley, M., Dynes, R y King, W. (2013). Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectral radiometry. *Grass & Forage Science*. 68 (1), 110-119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00877.x>.
126. Pullanagari, R., Dynes, R., King, W., Yule, I., Thulin, S., Knox, N y Ramoleo, A. (2016). Remote sensing of pasture quality. *UKnowledge*. <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1271&context=igc#:~:text=Remote%20sensing%20has%20potential%20to%20provide%20pasture%20quality%20information%2C%20however,issues%20need%20to%20be%20resolved>.
127. Punalekar, S.M., Verhoef, A., Quaife, T.L., Humphries, D., Bermingham, L., Reynolds, C.K., (2018). Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. *Remote Sens. Environ*, 218, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.028>.
128. Ramírez, A. (2013). *Evaluación del crecimiento de pastos usando índices de vegetación calculados a partir de información satelital* [Tesis de maestría, Universidad Nacional] Repositorio Institucional Biblioteca Digital. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75325>.
129. Rebordosa, X. y López, J. (2010). Aplicación de la teledetección en el seguimiento temporal de actividades mineras a cielo abierto. *Actualidad tecnológica*, 6-11. <https://es.scribd.com/document/353076822/4-Dialnet-AplicacionDeLaTeledeteccionEnElSeguimientoTemporal-3395277-pdf>.
130. Rennie, G. M., King, W. M., Puha, M. R., Dalley, D. E, Dynes, R. A y Upsdell, M. P. (2009). Calibration of the C-DAX Rapid Pasturemeter and the rising platemeter for kikuyu-based Northland dairy pastures. *Proc N Z Grassl Assoc*, 71, 49–55. DOI: 10.33584/jnzg.2009.71.2779.
131. Rincón, A., Cuesta, P.A., Pérez, R., Lascano, C.E y Ferguson, J. (Eds). (1992). *Maní forrajero perenne (Arachis pintoi) Krapowickas y Gregory. Una alternativa para ganaderos y agricultores*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/31579>.

132. Rincón, A. (1995). Producción de semilla de *Brachiaria dictyoneura* y *Brachiaria brizantha* en las sabanas bien drenadas de los Llanos Orientales de Colombia. *Pasturas tropicales*, 17 (3). http://www.tropicalgrasslands.info/public/journals/4/Elements/DOCUMENTS/1995-vol17-rev1-2-3/Vol17_rev3_95_art9.pdf.
133. Rincón, A y Bueno, G. (Eds). (1997). *Producción de semilla de pasto llanero (Brachiaria dictyoneura) en la Altillanura colombiana*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/694>.
134. 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. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624828>
135. Rincón, A., Flórez, H., Ballesteros, H y León, M. (2018). Efectos de la fertilización en la productividad de una pastura de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Tropical Grassland*, 6 (1), 158-168. [http://dx.doi.org/10.17138/tgft\(6\)158-168](http://dx.doi.org/10.17138/tgft(6)158-168).
136. Rincón, A., Álvarez, M., Pardo, O., Amaya, M. A y Díaz, R. A. (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.
137. Rippstein, G., Sionneau, J., Escobar, G y Ramírez, G. (2001). Radiometría terrestre para el inventario y otros estudios de la vegetación de sabana. En G. Rippstein., J. Escobar., F. Motta (Ed.), *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los llanos orientales de Colombia*. CIRAD – CIAT. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9670>.
138. Robel, R.J., Briggs, J.N., Dayton, A.D y Hulbert, L.C. (1970). Relationships Between Visual Obstruction Measurements and Weight of Grassland Vegetation. *Journal of Range Management Archives*, 23 (4). <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/jrm/article/view/5830/5440>.
139. Rodrigues, S. S. (2017). *Veículo aéreo nao tripulado de asa rotativa na atividade de mapeamento e coleta de imagem na agricultura de precisao e*

- no monitoramento de animais* [Tesis de maestria, Universidade de Sao Paulo] Tesis y disertaciones. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74134/tde-24042017-104340/es.php>.
140. Rodrigues, P., Aires-Dias, J., Silva, A., Almeida, T., Lopes de Silva, T y Silva, P. (2015). Imagens multiespectrais para estimar características produtivas de gramíneas tropicais. *Instituto Federal de Tocantins*, 6. <https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/jice/6jice/paper/viewFile/7127/3422>.
141. Rossini, C., Pereyra, O., Graciosa, M., Machado, M y Figueiredo, C. (2015). Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim 'Tifton 85', sob adubação nitrogenada. *Ciencia Rural*, 45 (4), 697-703. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131424>.
142. Running, S. W. (2004). Global land data sets for next-generation biospheric monitoring. *Wiley Online Library*, 85 (2), 543-545. <https://doi.org/10.1029/2004EO500006>.
143. Sahoo, R.N., Ray, S.S., Manjunath, K.R., (2015). Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current Science*, 108 (5), 848-859. <https://ncfc.gov.in/publications/p2.pdf>.
144. Sánchez, G., Osorio, E., Alvarez, J.A, Marín, J, Sánchez, A y Gil, O.J. (1989). Adaptación y producción de gramíneas y leguminosas forrajeras en el departamento de Antioquia, Colombia. *Pasturas Tropicales*, 11 (3). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
145. Sánchez, J., Villareal, M y Soto, H. (2000). Caracterización nutricional de los componentes forrajeros de cuatro asociaciones gramíneas/Arachis pintoi. *Nutrición Animal Tropical*, 6 (1). https://www.academia.edu/27599445/Caracterizaci%C3%B3n_de_los_componentes_forrajeros_de_cuatro_asociaciones_gram%C3%ADneas_Arachis_pintoi.
146. Sánchez, J y Yáñez, S. (2018). *Análisis de la correlación entre el volumen y vigorosidad vegetal de pasto con las características del suelo mediante técnicas de UAV* [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas] Repositorio Dspace. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14011>.

147. Sanches, D. I. (2009). *Hyperspectral proximal sensin of the botanical composition and nutrient content of New Zealand pastures* [Tesis de doctorado, Massey University] Theses and Dissertations. <http://hdl.handle.net/10179/1194>.
148. Sankey, T., Leonard, J y Moore, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicle–Based Rangeland Monitoring: Examining a Century of Vegetation Changes. *Rangeland Ecology & Management*, 72 (5), 858-863. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.04.002>.
149. Santillan, R.A, Ocumpaugh, W.R y Mott, G.O. (1979). Estimating Forage Yield with a Disk Meter. *Agronomy Journal*. 71, 71-74. DOI: 10.2134/agronj1979.00021962007100010017x.
150. Sarandón, S. y Flores, C. (Eds). (2016). *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables*. Universidad Nacional de La Plata. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/72/54/181-1>.
151. Silva, J., Ferreira, L., Rego, J y Arantes, A. (2015). Utilização de imagens aéreas de um Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) para estimativa de cobertura verde das pastagens cultivadas em duas áreas experimentais no município de Uberlândia – MG. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. https://www.academia.edu/18007262/Utiliza%C3%A7%C3%A3o_de_imagens_a%C3%A9reas_de_um_Ve%C3%ADculo_A%C3%A9reo_N%C3%A3o_Tripulado_VANT_para_estimativa_de_cobertura_verde_das_pastagens_cultivadas_em_duas_%C3%A1reas_experimentais_no_munic%C3%ADpio_de_Uberl%C3%A2ndia_MG.
152. Squella, F., Márques, C., Silva, M y Mansilla, A. (1990). Validación del método BOTANAL en una pastura de *Phalaris aquatica* y *Trifolium Subterraneum*. I. Evaluación del método del rendimiento comparativo, en la estimación de la disponibilidad de fitomasa. *Agricultura técnica*, 50 (3), 200-207. http://www.chileanjar.cl/files/V50I3A03_es.pdf.
153. Sripada, R. P., Heiniger, R. W., White, J. G., Weisz, R. (2006). Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 97 (5), 1443-1451. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0314>.

154. Slaton, M.R., Raymond Hunt, E., Jr., Smith, W.K. (2001). Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *Am. J. Bot.* 88 (2), 278–284. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11222250/>.
155. Stenzel, S., Fassnacht, F., Mack, B y Schnidtlen, S. (2017). Identification of high nature value grassland with remote sensing and minimal field data. *Ecological Indicator*, 74, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.005>.
156. Tammadge, D., Álvarez, F. y Rodríguez, J. (2012). Evaluación del producto MODIS GPP en biomas no arbolados empleando datos de torres de flujo de Carbono. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. <http://www.congresos.cchs.csic.es/TIG2012/sites/default/files/Alvarez-Taboada%2CMF.pdf>.
157. Toledo, J.M., Burns, J.C., Lucas, H.L., Jr, H.L y Angelone, A. (1981). Herbage measurements in situ by electronics. III. Calibration, characterization and field application of the earth-plate forage capacitance meter: a prototype. *Grass and forage Sci*, 35 (3), 189-196. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1980.tb01511.x>.
158. Toledo, J. (Eds) (1982). *Manual para la evaluación agronómica. Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales*. Centro de Internacional de Agricultura Tropical- CIAT. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/54148>.
159. Torres, J., Peña, J., Castro, A. y López, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>.
160. Toro-Mújica, P., García A., Gómez-Castro, A., Acero, R., Perea, J. y Rodríguez-Estévez, V. (2011). Sustentabilidad de Agroecosistemas. *Arch. Zootec*, 59, 71-94. <https://doi.org/10.21071/az.v59i232.4908>.
161. Tothill, J.C., Hargreaves, J.N y Jones, R.N. (Eds). (1978). *Botanal; a comprehensive sampling and computing procedure for estimating pasture yield and composition. I. Field sampling*. Division of tropical crops and pasture, Tropical Agronomy, CSIRO. <https://doi.org/10.4225/08/58712e506e989>.

162. Trotter, M. G., Lamb, D. W., Donald, G. E y Schneider, D. A. (2010). Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. *Crop & Pasture Science*. 61(5), 389-398. <https://doi.org/10.1071/CP10019>.
163. Tucker, C. J y Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11), 1395-1416, <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>.
164. Turner, D. P., Ritts, W. D., Cohen, W. B., Maeirsperger, T. K., Gower, S. T., Kirschbaum, A. A., Gamon, J. A. (2005). Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*, 11. 667-684. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/24539>.
165. Vela, W., Keller, G y Pinedo, L. (1990). Productividad animal en la asociación de *Brachiaria dictyoneura* CIAT 6133 con *Desmodium ovalifolium* CIAT 350 en Pucallpa. En: G. Keller (Ed.), *Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales (RIEPT), 6-9 de Noviembre, Lima, Perú*. Documento de trabajo, 75 (2). Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=QT19970050898>.
166. Vela, J.W y Flores, A. (1996). Productividad animal de la asociación *Brachiaria dictyoneura* CIAT 6133-*Desmodium ovalifolium* CIAT 350 en Pucallpa. *Tropical Grasslands*, 18 (1). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
167. Von Bennewitz, E. (2012). *Uso de imágenes satelitales multiespectrales e índices de vegetación, como herramientas para estudiar el desarrollo fenológico y crecimiento del cerezo (prunus avium l.) en tres localidades de la provincia de curicó, región del maule-chile* [Tesis de maestría, Universidad de Talca] Repositorio ANID. <http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/184362#>.
168. Von Bueren, S y Yule, I. (2013). Multispectral aerial imaging of pasture quality and biomass using unmanned aerial vehicles (UAV). *Institute of Agriculture and Environment*. http://tur-www1.massey.ac.nz/~flrc/workshops/13/Manuscripts/Paper_vonBueren_2013.pdf.

169. Watanabe, F., Alcatara, E., Rodrigues, T., Rotta, L., Bernardo, N. y Imai, N. (2017). Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A, Barra Bonita reservoir, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90 (2). http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0001-37652017005020119&script=sci_abstract.
170. Wilm, H. G., Costello, D.F y Klipple, G. (1944). Estimating Forage Yield by the Double-Sampling Method. *Journal of the American Society of Agronomy*, 36 (3), 194-203. <https://doi.org/10.2134/agronj1944.00021962003600030003x>.
171. Zimmerer, K. (2010). Biological Diversity in Agriculture and Global Change. *The annual review of environment and resources*, 35, 137-166. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-040309-113840>.

Capítulo 2

Influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote para estimar la oferta de forraje del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero, a partir de imágenes multiespectrales.

2.1 Resumen

La incorporación de cámaras multiespectrales a los vehículos aéreos no tripulados (VANT), ha permitido nuevas posibilidades de análisis para la gestión de áreas pastoriles a escala predial. El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote, en la estimación de la oferta forrajera en una pastura de *Urochloa humidicola* cv Llanero. Los vuelos se realizaron a los 30, 50 y 70 metros de altura, en las edades de rebrote de 7, 14, 21, 28 y 35 días; se probaron siete índices de vegetación, NDVI, GCI, SRPI, R, GNDVI, SAVI y RDVI, los datos fueron analizados a partir de modelos aditivo generalizado (GAM). El índice de vegetación que mejor se correlacionó con la oferta de forraje fue el NDVI con un coeficiente de 0.77; en relación con las alturas de vuelo no se encontraron diferencias significativas ($p \geq 0.05$), sin embargo, la altura de 70 metros fue donde el modelo GAM se ajustó mejor a la estimación de la oferta de forraje con un R^2 0.763.

Palabras claves

Imágenes multiespectrales, índice de vegetación, oferta de forraje, pasto llanero.

2.2 Introducción

La importancia económica de las pasturas en Colombia radica en que son la principal fuente de alimento que sustenta los sistemas de producción bovina de carne y leche; se estima que, de las 43 Millones de hectáreas destinadas para el uso agropecuario, 34,4 de ellas corresponden a pastos (CNA-DANE, 2014). De la diversa oferta de forrajes disponibles para la alimentación bovina, las gramíneas del género *Urochloa* (Sin. *Brachiaria*) (Rincón *et al.*, 2018) han sido las de mayor acogida por parte de los productores y tienen un área potencial apta de más de 20 millones de hectáreas en el territorio nacional (Motta, Ocaña y Rojas, 2019, UPRA, 2019).

El monitoreo de las pasturas es clave para programar las rotaciones de los bovinos y maximizar los rendimientos productivos de cada predio; por lo tanto, se requiere un enfoque que considere el manejo de estas como un conjunto acciones que tomen en cuenta las variaciones temporales y espaciales del crecimiento, asociadas principalmente a los nutrientes del suelo, factores asociados al manejo y al clima (Lu, 2017; Posada *et al.*, 2019).

Recientemente se ha incorporado una nueva forma de análisis a partir de imágenes multiespectrales obtenidas por vehículos aéreos no tripulados (VANT), estas aeronaves pueden volar de forma autónoma y estar equipadas con sensores remotos, los VANT presentan ventajas comparativas con respecto a las plataformas satelitales, al tener una mejor resolución espacial (≤ 1 cm / pixel), una mayor resolución temporal y los vuelos se pueden realizar de acuerdo a la necesidad de los datos, adicionalmente no se ven afectados por la presencia de nubes (Bayma *et al.*, 2019; Insua *et al.*, 2019).

Con la información espectral derivada de los VANT se pueden construir diferentes índices de vegetación (IV), los cuales son operaciones matemáticas de las bandas espectrales capturadas en diferentes longitudes de onda, de donde se puede obtener información relacionada con parámetros biofísicos de crecimiento y fisiológicos de las pasturas (Bayma *et al.*, 2019; Cisneros *et al.*, 2020; Sinde *et al.*, 2020), también permite la caracterización de la cobertura herbácea y su distribución

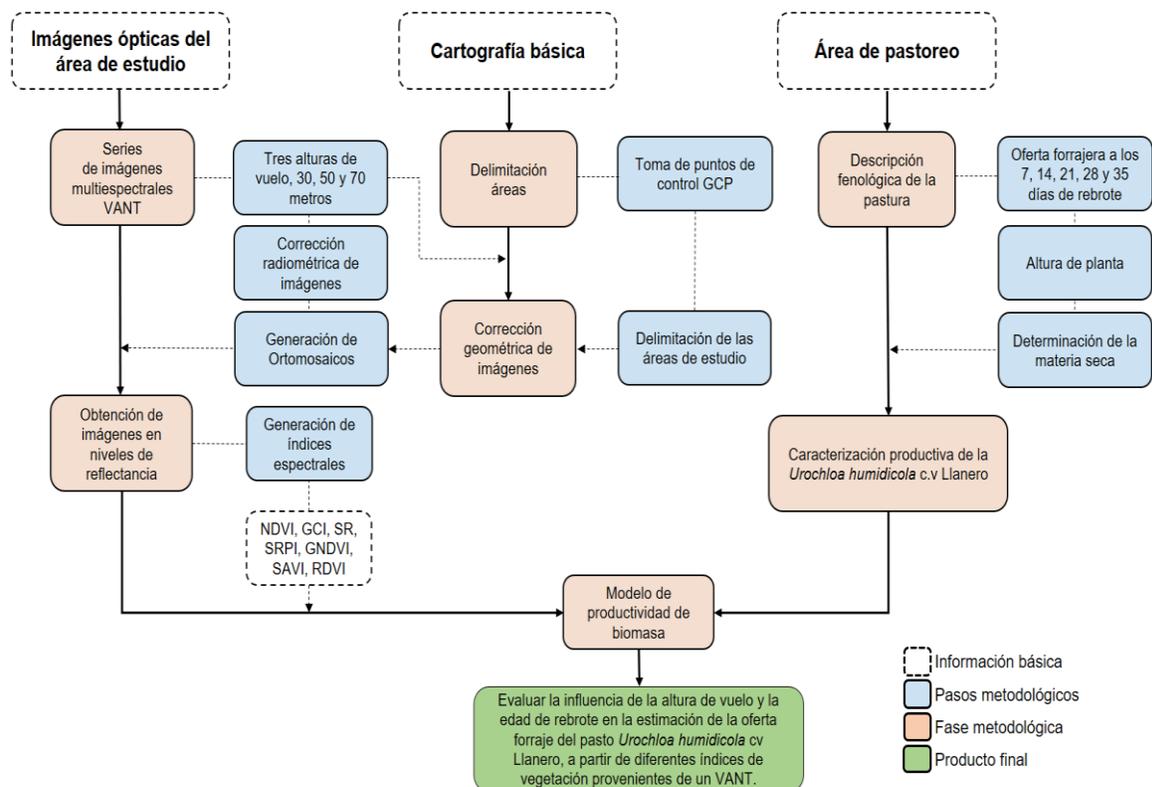
sobre la superficie terrestre (Lu y He, 2017), e igualmente proporciona un método no destructivo para la evaluación de pasturas; no obstante, los modelos para estimar la oferta de forraje a partir de imágenes de los VANT son una nueva área de investigación (Forsmo *et al.*, 2018; Rueda *et al.*, 2019).

El objetivo de este capítulo es evaluar la influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote, en la estimación de la oferta forraje del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero a partir de diferentes índices de vegetación provenientes de un VANT.

2.3 Metodología

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico se presenta en la Figura 2-1, el flujograma de actividades que permite explicar las fases metodológicas para el estudio de la evaluación productiva del pasto Llanero por medio de imágenes multiespectrales.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3 *Flujograma de actividades para el cumplimiento del primer objetivo específico.*

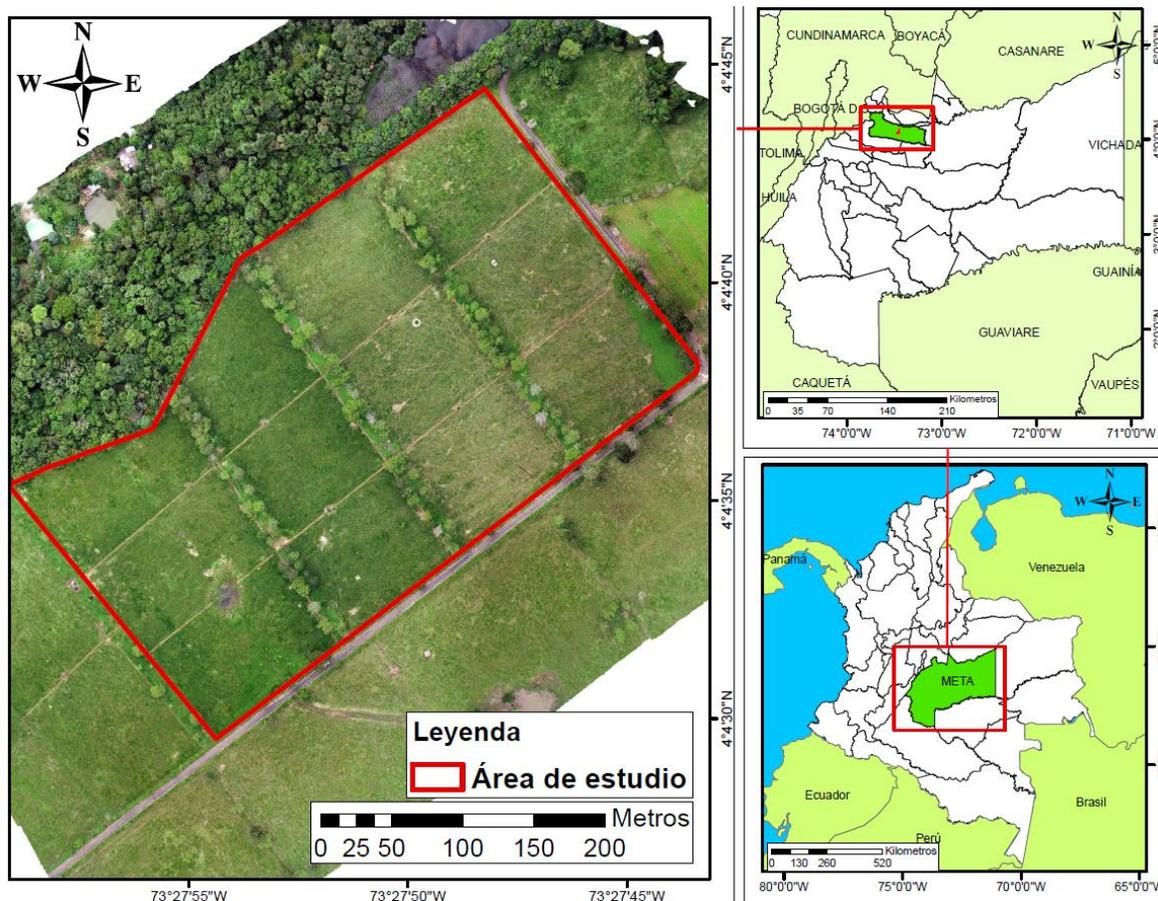


2.4 Localización

El trabajo se desarrolló en las áreas de pastoreo bovino denominada “Chipres”, ubicada en el Centro de Investigación C.I. 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. Como se observa en la Figura 2-2, se ubica en el municipio de Villavicencio del departamento del Meta.

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.*, 2018).

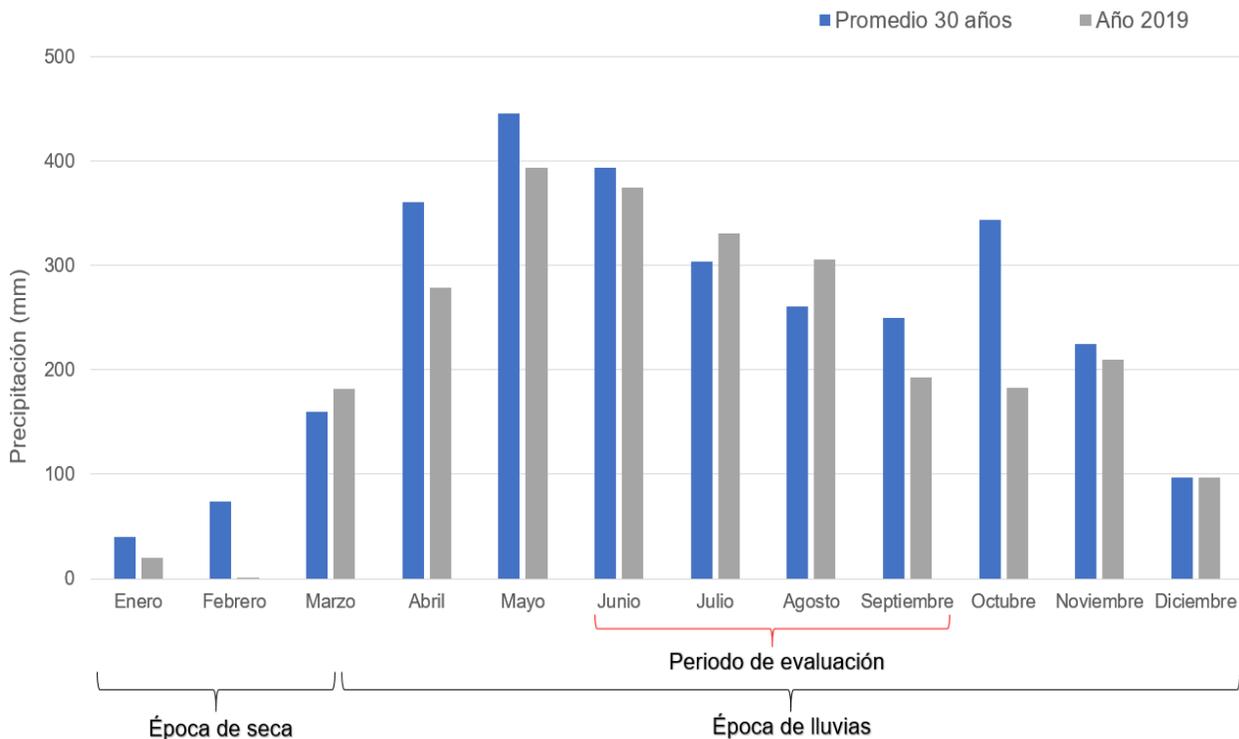
Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4 *Ubicación del área de pastoreo “Chipres” en el C.I. La Libertad.*



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 en promedio. En la Figura 2-3, se presenta la precipitación histórica de los últimos 30 años, como también la del año 2019 fecha en que se realizó este estudio.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5
Precipitación del 2019 comparada con el promedio de 30 años en el C.I. La Libertad.



2.5 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 del panel de calibración de la reflectancia, 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®, donde se fijaron los siguientes parámetros: las alturas de

los vuelos para las misiones fueron de 30, 50 y 70 metros, traslape $\geq 75\%$ y velocidad de la aeronave de 6 metros/segundo. Las características de la cámara Mapir se describen en la Tabla 2-1.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6 *Características de la cámara utilizada*

Características	Cámara Mapir Survey 3W®
Sensor	Sony Exmor R IMX117 12MP (Bayer RGB)
Filtro	FRGN - RGB
Resolución de la imagen	4.000 x 3.000 pixeles
Campo de visión del lente	87° HFOV (19mm) f/2.8 apertura (sin ojo de pez)
GPS / GNSS (Externo)	U-box Neo - M8
Formato de imagen	RAW+JPG, JPG (RAW+JPG es convertido a 16 bit)

La construcción de los ortomosaicos se realizó 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 el software ArcMap 10.8®, la información para el análisis se extrajo de 60 puntos de muestreo para cada una de las edades de rebrote evaluadas. Se presenta la Tabla 2-2 con los índices espectrales utilizados en este trabajo.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-7 *Índices de vegetación y relación de bandas espectrales propuestos.*

Índice	Sigla (en inglés)	Relación entre bandas	Fuente
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse <i>et al.</i> , (1973)
Índice verde de clorofila	GCI	$\left(\frac{NIR}{G}\right) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> , (2003)
Índice de reflectancia de planta senescente	SRPI	$\frac{R - G}{NIR}$	Peñuelas <i>et al.</i> , (1995)

Índice	Sigla (en inglés)	Relación entre bandas	Fuente
Proporción simple	SR	$\frac{NIR}{R}$	Birth y McVey (1968)
Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	GNDVI	$\frac{NIR - G}{NIR + G}$	Gitelson y Merzlyak (1998)
Índice de vegetación de suelo ajustado	SAVI	$\frac{1.5 * (NIR - R)}{(NIR + R + 0.5)}$	Huete (1988)
Índice de vegetación de diferencia renormalizada	RDVI	$\frac{(NIR - R)}{\sqrt{(NIR + R)}}$	Roujean y Breon (1995)

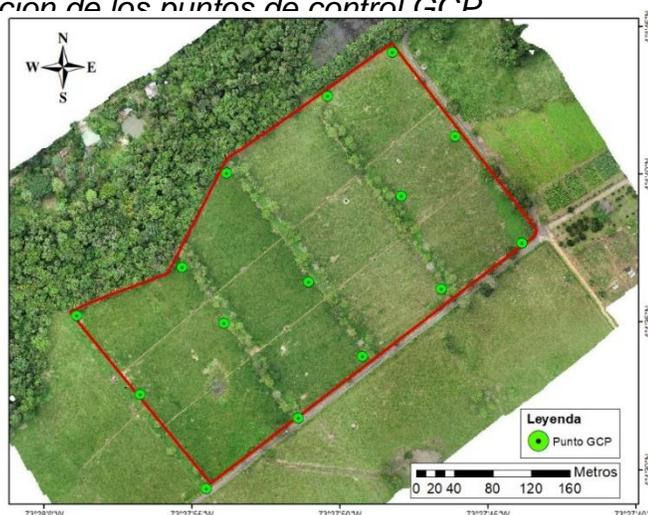
Dónde: G = banda espectral del verde, R= banda espectral del rojo y NIR= banda espectral del infrarrojo cercano.

2.6 Cartografía básica

Se ubicaron puntos de control (*ground control points – GCP*, por sus siglas en ingles), por medio de una estación RTK marca TOPCON® modelo Hiper V, con el fin de realizar la corrección geométrica del ortomosaico.

Los puntos de control fueron localizados en las esquinas y al interior del área experimental para un total de 15 GCP. En la Figura 2-4 se observa la distribución espacial de los puntos GCP.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento. *Ubicación de los puntos de control GCP*



2.7 Área de pastoreo

El área experimental es un sistema de pastoreo rotacional en *Urochloa humidicola* cv Llanero, (sin. *Brachiaria humidicola*; antes considerado como *Brachiaria dictyoneura*) (Cook y Schultze-Kraft, 2015; Rincón *et al.*, 2018), con vocación productiva en la ceba de ganado bovino. Para construir la curva de crecimiento del pasto, se recolectaron un total de 300 muestras entre los meses de junio a septiembre.

La oferta de forraje y la altura de la planta fueron evaluadas a los 7, 14, 21, 28 y 35 días de rebrote, se utilizó la metodología convencional, en transectos con un marco de 0.50 cm x 0.50 cm (Rincón *et al.*, 2018); se tiene como día cero el momento en que sale el ganado del potrero. Las muestras de forraje verde se cortaron a 20cm del suelo de acuerdo a su habido de crecimiento (Rincón, 2011), las cuales fueron pesadas y posteriormente secadas en una estufa de aire forzado por 72 horas a 60°C; la materia seca (MS) se obtuvo por diferencias de peso verde y peso seco.

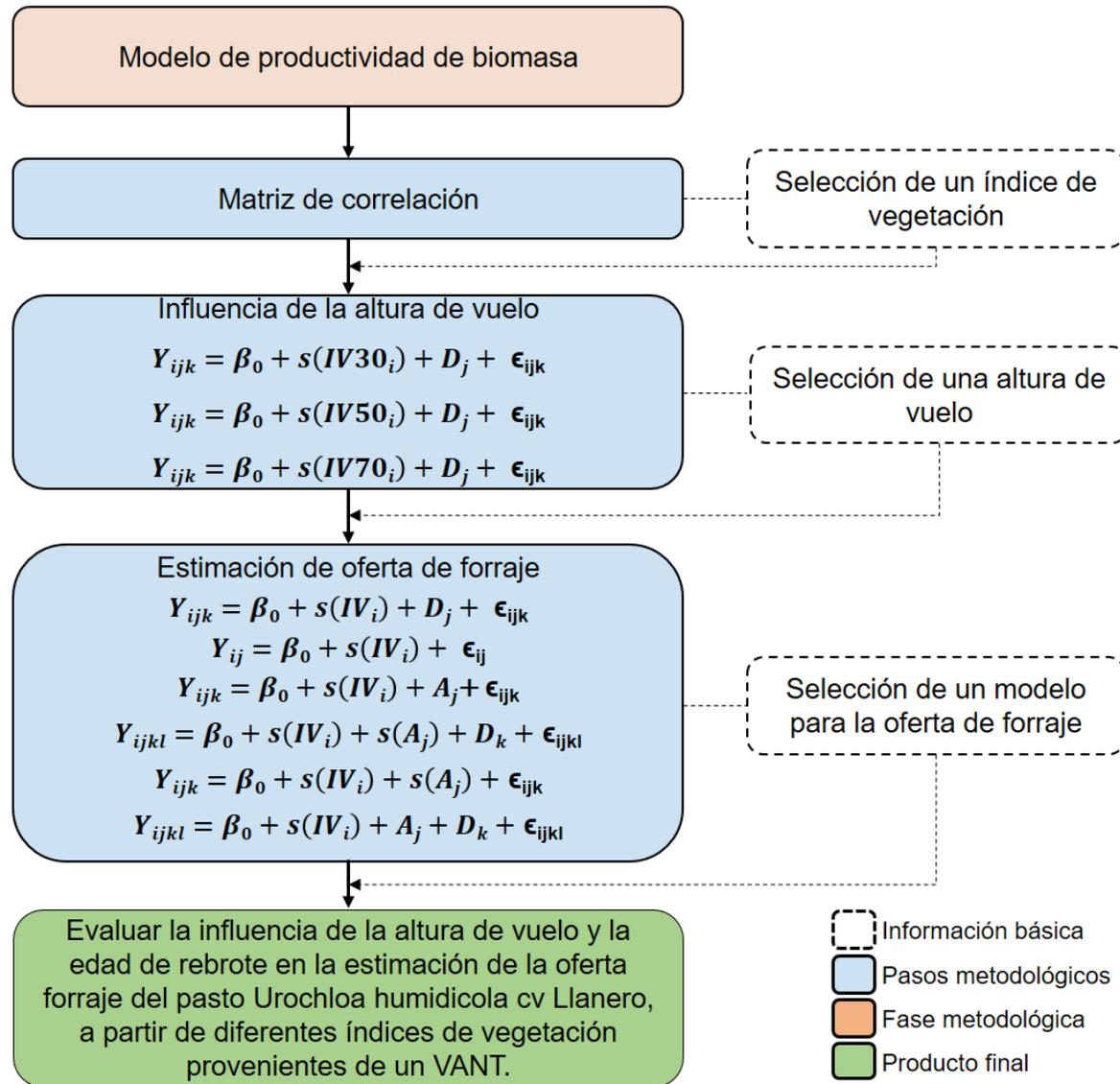
2.8 Modelo de productividad de biomasa

En primera instancia se establece la correlación entre los índices espectrales obtenidos en las tres alturas de vuelo y la producción de forraje en las edades de rebrote; una vez analizada esta correlación, se selecciona el índice de vegetación (IV) que será utilizado en los tres modelos aditivos generalizados (GAM) para determinar la altura de vuelo óptima. Posteriormente, se probaron seis GAM que tienen como variable dependiente la oferta de forraje y como estimadores, se evaluaron diferentes interacciones y efectos de suavizado entre el IV, la altura de planta y los días de rebrote; los datos fueron analizados en el *software* R (R Core Time, 2016) por medio de la librería *mgcv* (Wood, 2019). En la Figura 2-5, se presenta el esquema de análisis y los modelos utilizados.

Para seleccionar el modelo que mejor se ajustó a la estimación de la oferta 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 7 Modelos GAM utilizados en el estudio



Dónde: *Y* es la Oferta de forraje en kgMS/ha, β_0 es el intercepto, *s* es la función de suavizado para la variable, *IV* representa el índice espectral, *D* son los días de rebrote del pasto, *A* es la altura de la planta y ϵ es el efecto residual.

2.9 Resultados y discusión

2.9.1 Caracterización productiva del pasto.

Las variables productivas del pasto en las diferentes edades de rebrote presentaron diferencia estadística de ($p < 0.001$) (Tabla 2-3), la mayor altura de planta, materia seca y oferta de forraje se presentó en el día 35. La precipitación para los meses de julio y agosto fueron superiores al promedio acumulado de los últimos 30 años, en un 9.2% y 17.7% respectivamente (Figura 2-3); esta condición favoreció el ataque del mión de los pastos (*Aeneolamia spp*) (Figura 2-6).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8 *Características productivas del pasto Urochloa humidicola c.v Llanero.*

Edad de rebrote (días)	Altura de planta (cm)	Materia seca (%)	Forraje (kg-MS/ha)
7	22.8	23.8	64.3
14	27.53	25.28	331.27
21	35.78	26.04	505.06
28	39.47	27.33	757.54
35	44.62	31.20	1,240.91

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8 *Presencia de la Aeneolamia spp en el pasto Urochloa humidicola c.v Llanero.*



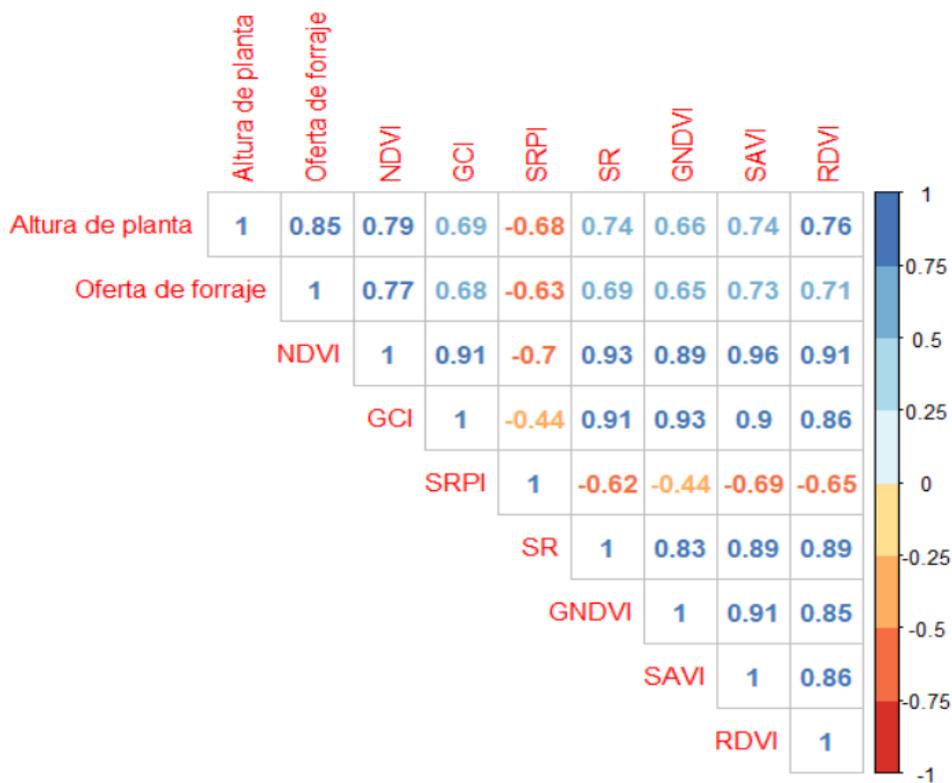
La oferta de forraje obtenida entre los 28 y 35 días de rebrote concuerda con los valores reportados para esta especie por Pardo *et al.*, (1999), y Gichangi *et al.*, (2017), no obstante, Sánchez *et al.*, (1989), Carulla *et al.*, (1991), y Vela y Flores (1996) obtuvieron valores más altos. Según Insua *et al.*, (2019) las pasturas que no excedan los 3,000 kg MS/ha previo el pastoreo, pueden ser monitoreadas por la tecnología VANT. Conforme a ello, los resultados obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro del rango óptimo descritos por este autor.

2.9.2 Correlación entre oferta de forraje y los índices de vegetación

Se generó la matriz de correlación de Pearson con el objetivo de identificar el IV que presentó mayor relación con la oferta de forraje, (Figura 2-7), aquí se tuvo en cuenta los valores de los índices espectrales en las diferentes edades de rebrote y las tres alturas de vuelo. Se obtuvo una correlación positiva (valores de 0.5-0.85) de acuerdo a la escala descrita por Sánchez y Yáñez, (2018); la correlación entre los índices de vegetación NDVI, GCI, SR, GNDVI, SAVI y RDVI con la oferta de forraje fue de 0.77, 0.68, 0.69, 0.65, 0.73, respectivamente, y de 0.79, 0.69, 0.74, 0.66, 0.74 y 0.76 para altura de planta, y una correlación negativa con el SRPI, para oferta de

forraje y altura de planta con valores de -0.63 y -0.68, todos los coeficientes presentaron significancia de ($p < 0.05$) para las variables evaluadas. El índice NDVI fue el que presento mayor correlación con la oferta de forraje, por lo cual se utilizó en las siguientes fases del proyecto.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9 *Matriz de correlación de las variables de crecimiento y los índices de vegetación.*



Dónde: NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, GCI es el índice verde de clorofila, SRPI es el índice de reflectancia de planta senescente, SR es el índice de proporción simple, GNDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada verde, SAVI es el índice de vegetación de suelo ajustado y el RDVI es el índice de vegetación de diferencia renormalizada.

En esta fase del experimento se comprobó la correlación positiva (0.77) que existe entre la oferta de forraje y el índice de vegetación NDVI, el resultado obtenido concuerda con lo reportado por la literatura, en relación a las características fisiológicas y de crecimiento de las gramíneas de pastoreo, donde el NDVI es un indicador de biomasa en especial cuando la vegetación evaluada presenta una alto porcentaje de cobertura (Zerbato *et al.*, 2016), característica propia del *Urochloa humidicola* cv Llanero, el cual presenta un crecimiento postrado, con alta producción de estolones y una buena cobertura del suelo (Rincón, 2011; Rincón *et al.*, 2018). Esta condición se corrobora con el coeficiente de correlación del índice SAVI, que fue diseñado para minimizar la respuesta espectral del suelo (Tamás *et al.*, 2019), el cual presento un valor de correlación cercano al NDVI.

La correlación positiva entre el NDVI y la oferta de forraje, es consistente con una serie de trabajos reportados por diferentes autores (Beeri *et al.*, 2007; Nakano *et al.*, 2013; Ren *et al.*, 2017). En pasturas de kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov) Morrene) en el departamento de Antioquia Posada *et al.*, (2019), encontraron una correlación de 0.9 entre la oferta de forraje verde y el índice NDVI generado a partir de imágenes multiespectrales de un VANT. Escribano *et al.*, (2015) en la dehesa en España, a partir de imágenes del satélite DEIMOS-1, evaluaron la capacidad de diferentes índices espectrales para la estimación de la oferta de forraje de las gramíneas, siendo el NDVI el que presenta mejor correlación (0.89) con la oferta de forraje seco, en comparación con los índices SR y RDVI de 0.66 y 0.72 respectivamente; de forma similar Dingaán y Tsubo (2019), evaluaron diferentes índices espectrales para estimar la biomasa aérea en cinco regiones semiáridas del Sur África, entre estos el NDVI, SR y el GNDVI, donde obtuvieron coeficientes de determinación de 0.80, 0.74 y 0.79 respectivamente.

También se evaluó el índice SRPI el cual determina la etapa de senescencia de la planta por la sensibilidad en la acumulación de carotenoides (Zhang *et al.*, 2018), este índice disminuye a medida que crece la hoja, el cual genera una curva invertida al comportamiento del NDVI (Ren *et al.*, 2017), esto se observó en la correlación con la oferta de forraje y altura de planta en el presente trabajo, al presentar

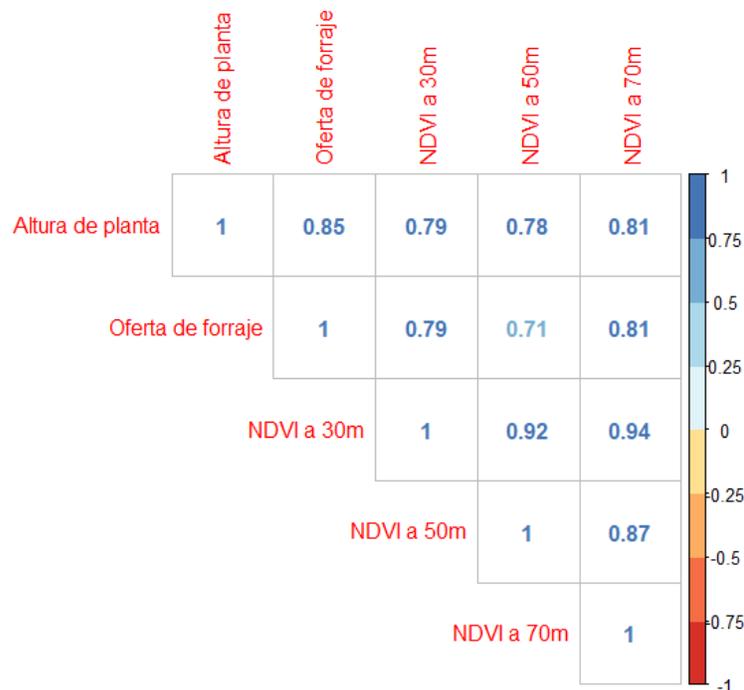
coeficientes de -0.63 y -0.68 respectivamente, ya que se evaluó una pastura en etapas de crecimiento donde había predominancia de las hojas verdes. Esta correlación negativa también fue reportada por Posada (2018), al obtener un coeficiente de -0.41 en pasto kikuyo, sin embargo, Dingaan y Tsubo (2019), obtuvieron una correlación positiva 0.84, lo que fue explicado por la alta presencia de material vegetal no verde. La sensibilidad de este índice sugiere que puede ser útil en el monitoreo del ataque del mión de los pastos, por la acumulación de plantas afectadas con hojas cloróticas y abundante material muerto en la superficie.

2.9.3 Influencia de la altura de vuelo y la edad de rebrote del pasto

Se estimó la correlación de Pearson entre el IV NDVI obtenido en cada altura de vuelo y la oferta de forraje (Figura 2-8), donde la altura a 70 metros obtuvo un coeficiente de 0.81, siendo más alto en comparación con las alturas de vuelo de 30 y 50 metros, con valores de 0.79 y 0.71 respectivamente. Sin embargo, no se encontró diferencia significativa $p > 0.05$. Lo que indica que la resolución espacial del sensor no tuvo un efecto en las correlaciones (Tabla 2-4).

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento. **-10** *Matriz de correlación de las variables de crecimiento y el índice de vegetación NDVI en las alturas de vuelo de 30, 50 y 70 metros*

La alta resolución espacial del sensor utilizado (Tabla 2-4), permite evaluar esta cobertura a una escala predial y en potreros con áreas pequeñas ($\leq 2.5\text{ha}$), esto



habría podido presentar dificultades con los sensores a bordo de satélites como Landsat 8 y Sentinel 2, los cuales tienen una resolución espacial de 30 y 10 metros respectivamente, y en el caso de los sistemas satelitales con una mayor resolución espacial como Rapideye y World-View-2, son operados por casas comerciales que generan restricciones de tipo económico para ser utilizados a largo plazo (Raab *et al.*, 2020).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9 *Tamaños y números de pixel obtenidos a 30, 50 y 70 metros de altura de vuelo.*

Altura de vuelo (m)	Resolución espacial (cm)		
	Tamaño pixel	cm ²	Número de pixel*
30	1.399 * 1.399	1.9	49 * 49
50	2.345 * 2.345	5.5	30 * 30
70	3.254 * 3.254	10.5	22 * 22

*Número de pixeles de cada muestra.

El modelo que mejor estima la oferta de forraje fue el que consideró los valores del NDVI en función suavizada a 70 metros de altura y presenta menor AIC y BIC, con un coeficiente de R^2 0.763 (Tabla 2-5).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10 *Criterios de selección y coeficientes de determinación obtenidos a las tres alturas de vuelo.*

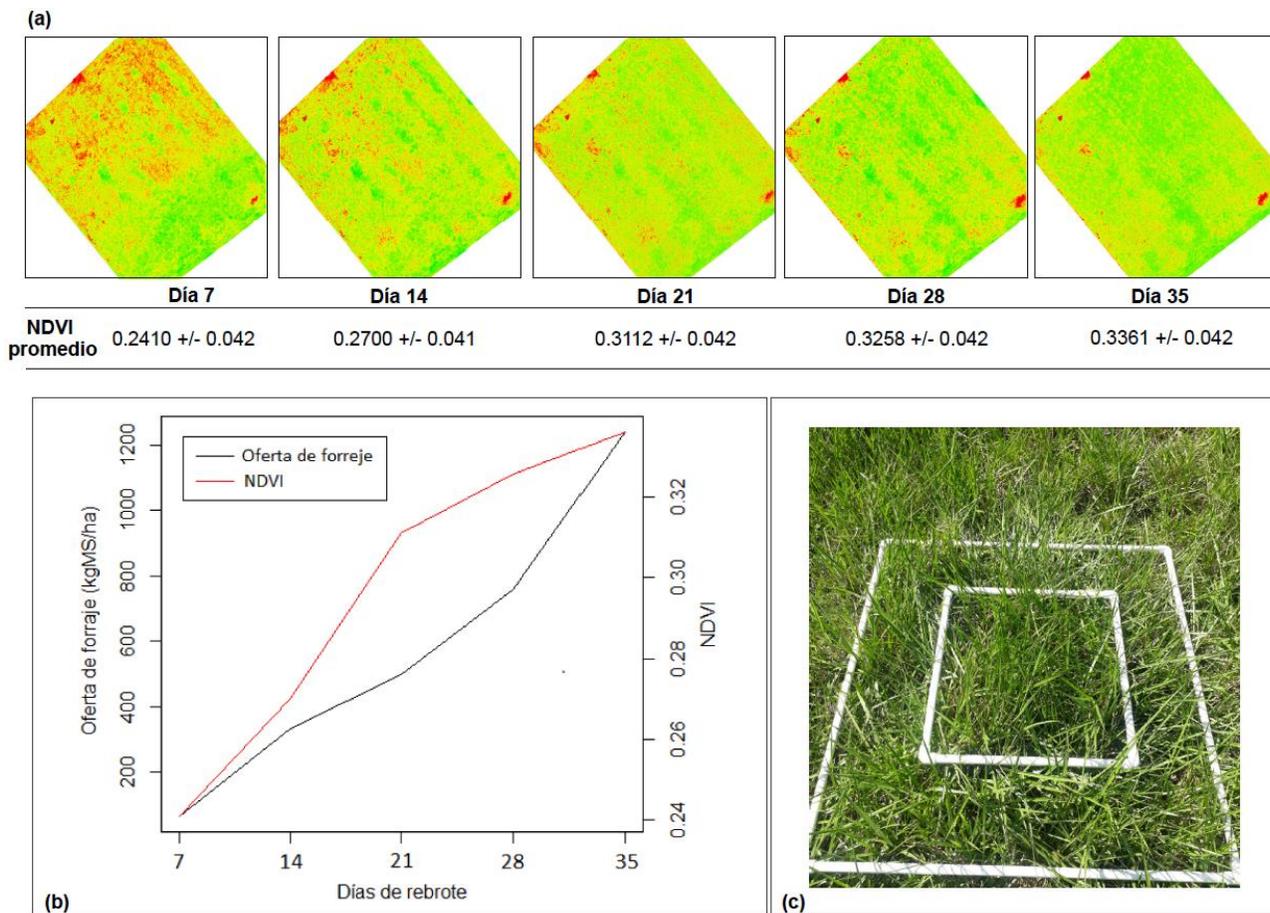
Modelo	Altura de vuelo (m)	AIC	BIC	R^2	Desviación Explicada
1	30	3991	4025	0.694	0.697
2	50	4009	4047	0.537	0.544
3	70	3931	3983	0.763	0.769

El NDVI obtenido vario para los 7, 14, 21, 28 y 35 días de rebrote entre: 0.2110 – 0.2733, 0.2329 – 0.3011, 0.2805 – 0.3398, 0.2987 – 0.3503 y 0.3008 – 0.3750 respectivamente. En la Figura 2-9a, se observa que los valores del NDVI aumentaron de forma similar con la oferta de forraje, a medida que avanzan los días de rebrote; el incremento de forma porcentual fue de 12%, 15.2%, 4.7% y 3.1%, entre los días 7 – 14, 14 – 21, 21 – 28 y 28 – 35 respectivamente, observándose un menor aumento entre las dos últimas etapas de crecimiento evaluado (Figura 2-9b).

Esto puede ser atribuido al comportamiento típico del NDVI, el cual tiende a saturarse por la alta absorción de los pigmentos de la clorofila en a la banda espectral roja (660nm) a medida que incrementa la biomasa del pasto (Carlson y Ripley, 1997). En este sentido, Carneiro *et al.*, (2019) demostraron la saturación del NDVI al encontrar valores constantes y con el mismo comportamiento a los 60 y 75 días de crecimiento en un cultivo de maní.

Diversos trabajos han demostrado que el NDVI comienza a aumentar lentamente en superficies completamente cubiertas por hojas (Huete *et al.*, 1985; Zhangyan *et al.*, 2006); esta característica es típica del pasto Llanero, el cual presenta un porcentaje de cobertura del suelo por encima del 95% (Rincón *et al.*, 2018), y fue evidenciado al momento de realizar los muestreos (Figura 2-9c)

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11 (a) Valores promedio del NDVI, (b) incremento promedio de la oferta de forraje y NDVI (c) cobertura del pasto en un punto de muestreo



Sin embargo, los valores de NDVI obtenidos a partir de la cámara Mapir Survey 3W®, se relacionan con la forma como el sensor *Sony Exmor R IMX117 12MP* (Bayer RGB) capta las imágenes; el sensor está diseñado para obtener imágenes RGB. Según el fabricante, las bandas del filtro se superponen con las del patrón Bayer en el sensor y 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), circunstancia que fue evidente a pesar de haber seguido el proceso de calibración de las imágenes recomendado por el fabricante.

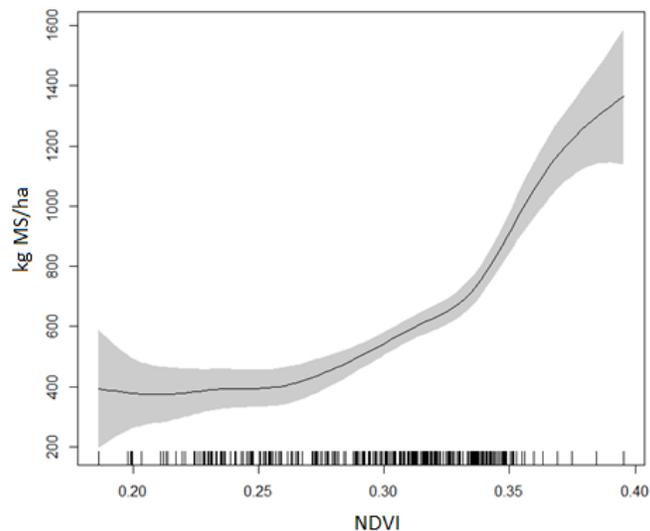
Resultados similares fueron obtenidos por Sinde *et al.*, (2020), quienes obtuvieron valores promedios de 0.363, 0.371 y 0.362, en pasturas de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) y ryegrass perenne (*Lolium perenne*) respectivamente, generados a partir del lente *NIR GP39728Green*, que es fabricado por la casa comercial *peauproductions* anexa a Mapir.

El criterio para la selección del modelo que mejor estima la oferta de forraje en función del NDVI, es el que presenta un menor AIC y BIC, con un R^2 de 0.901 (Modelo 4) (Tabla 2-6), dónde: $Y_{ijkl} = \beta_0 + s(IV_i) + s(A_j) + D_k + \epsilon_{ijkl}$. Y_{ijkl} es la oferta de forraje en kgMS/ha, β_0 es el intercepto, s es la función suavizada de un estimador, IV es el índice NDVI, A es la atura de la planta, D es el efecto fijo de los días de rebrote del pasto y ϵ_{ijkl} es el efecto residual.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11 *Criterios de selección y coeficiente de determinación obtenidos para los seis modelos evaluados.*

Modelo	AIC	BIC	R^2	Desv. Explicada
1	3931.0	3983.0	0.871	0.876
2	4108.0	4144.0	0.763	0.769
3	4014.0	4052.0	0.823	0.832
4	3857.0	3928.0	0.901	0.906
5	3955.0	4008.0	0.86	0.866
6	3898.0	3953.0	0.884	0.889

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12 Ajuste entre los valores del NDVI y la oferta de forraje.



El comportamiento curvilíneo que se observa en la Figura 2-10, muestra la relación no lineal del NDVI con la oferta de forraje, la cual aumenta con el crecimiento del pasto hasta llegar a un valor máximo de NDVI (0.3750), lo que sugiere, que este podría ser el punto donde comienza a saturarse el IV; sin embargo, esto se habría podido comprobar si se hubiera evaluado más de edades de rebrote (ejemplo: a 42 y 49 días).

La relación no lineal entre el NDVI y la biomasa también ha sido reportada por otros autores (Baret y Guyot 1991; Myneni *et al.*, 1995; Gitelson *et al.*, 2002; Jiang *et al.*, 2006). De forma similar el trabajo realizado por Rahetlah *et al.*, (2014), encontraron una relación exponencial fuerte entre el NDVI y la oferta forraje con R^2 de 0.69 para el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), y una relación lineal moderada para el pasto ryegrass italiano (*Lolium multiflorum Lam. cv Tama*) con R^2 de 0.52; también Insua *et al.*, (2019), obtuvieron un R^2 de 0.80 para los pastos Festuca (*Festuca arundinacea Schreb*) y Ryegrass perenne (*Lolium perenne*), Díaz *et al.*, (2019), en pasto *Brachiaria humidicola cv Llanero*, encontraron un R^2 de 0.71, y Epstein *et al.*, (2005) y Dingaan y Tsubo (2019) obtuvieron coeficientes de determinación de 0.60 y 0.80 respectivamente.

2.10 Conclusiones.

De las tres alturas de vuelo evaluadas, se puede concluir que el NDVI obtenido a los 70 metros, fue el que mejor se correlacionó con oferta de forraje y la altura de planta.

El modelo *GAM* seleccionado bajo los criterios BIC y AIC, que utilizó los estimadores NDVI, altura de planta y días de rebrote, fue el que mejor estimó la oferta de forraje y permitió evaluar la biomasa del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero.

2.11 Recomendaciones.

El dominio de recomendación del modelo seleccionado es específico para el pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero y para las condiciones de evaluación en las que se realizó el experimento.

Es recomendable para estudios futuros la validación de este sensor en áreas pastoriles mayores, con la incorporación de series multitemporales de imágenes en ciclos hidrometeorológicos contrastantes.

Es recomendable que para realizar programas de monitoreo y evaluación del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero, con los mismos equipos utilizados volar a 70 metros de altura.

2.11 Bibliografía

1. Baret, F y Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indexes for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35 (2-3), 161-173. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U).
2. Bayma-silva, G.; Santos, PM. (Eds). (2019). *Protocolo de campo para investigação, calibração e validação de métodos para estimativa de massa de forragem baseados em sensoriamento remoto orbital e proximal de forragem baseados em sensoriamento remoto orbital e proximal*; Embrapa Informarunatica <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1117053>.
3. Beerli, O., Phillips, R., Hendrickson, J., Frank, A. B y Kronberg, S. (2007). Estimating forage quantity and quality using aerial hyperspectral imagery for northern mixed-grass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 110, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.027>.
4. Birth, G y G. McVey. (1968). Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60 (1), 640-643. <https://doi.org/10.2134/agronj1968.00021962006000060016x>.
5. Carulla, J.E., Lascano, C.E., Ward, J.K. (1991). Selectivity of resident and orophageal fistulated steers grazing *Arachis pintoi* and *Brachiaria dictyoneura* in the Llanos of Colombia. *Tropical Grasslands*. 25, 317-324. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/44085>.
6. Carneiro, F. M., Furlani, C., Zerbato, C., Menezes, P. C y Gírio, L. (2019). Correlations among vegetation indices and peanut traits during different crop development stages. *Engenharia Agrícola*, 39, 33-40. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep33-40/2019>.
7. Carlson, T.N., Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens Environ*, 62 (3), 241–52. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1).
8. Cisneros, A., Fiorio, P., Menezes, P., Pasqualotto, N., Wittenberghe, S., Bayma, G y Nogueira, S. (2020). Mapping Productivity and Essential Biophysical Parameters of Cultivated Tropical Grasslands from Sentinel-2 Imagery. *Agronomy*, 10 (5), 711. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050711>.

9. Cook, B y Schultze-Kraft. (2015). Botanical name changes – nuisance or a quest for precision?. *Tropical Grasslands*, 3, 34-40. [https://doi.org/10.17138/tgft\(3\)34-40](https://doi.org/10.17138/tgft(3)34-40).
10. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2014) 3^{er} Censo Nacional Agropecuario, La mayor operación estadística del campo colombiano en los últimos 45 años. Tomo 2, Resultados. <https://www.dane.gov.co/files/images/foros/foro-de-entrega-de-resultados-y-cierre-3-censo-nacional-agropecuario/CNATomo2-Resultados.pdf>.
11. Díaz, R.A., Alvarez, M., Pérez, O., Gutiérrez, B y Villalobos, M. (2019). Uso de sensores remotos en la determinación de la oferta de forraje del pasto *Brachiaria humidicola* subsp. *dictyoneura* bajo pastoreo en la Altilanura colombiana. 42º Congreso Argentino de Producción Animal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 39 (1), 99-167. <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/rapa/article/view/16419/45454575768681>.
12. Dingaan, M.N.V y Tsubo, M. (2019). Improved assessment of pasture availability in semi-arid grassland of South Africa. *Environ Monit Assess*, 191, 733. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7918-x>.
13. Epstein, H.E., Walker, D.A., Jia, G.J y Kelley, A.M. (2005). Climate, plant biomass, NDVI and LAI relationships along the full arctic bioclimate gradient. *Am Geophys Union*, 23, 1012-1024. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005AGUFM.B33E1092E/abstract>.
14. Escribano, J. A; Hernández, C. G y Tarquis, A. (2015). Selección de índices de vegetación para la estimación de la producción herbácea en dehesas. *Revista Pastos*, 2 (44), 6-18. <http://polired.upm.es/index.php/pastos>.
15. Forsmoo, J., Anderson, K., Macleod, C. J. A., Wilkinson, M. E., Brazier, R. (2018). Drone-based structure-from-motion photogrammetry captures grassland sward height variability. *Journal of Applied Ecology*, 55 (6), 2587–2599. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13148>.
16. Gichangi, E.M., Njarui, D.M y Gatheru, M. (2017). Plant shoots and roots biomass of brachiaria grasses and their effects on soil carbon in the semi-arid tropics of Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, 65-74. <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2244>.

17. Gitelson, A y M. Merzlyak. (1998). Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*, 22 (5), 689-692. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01133-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2).
18. Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R y Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens Environ*, 80 (1), 76-87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9).
19. Gitelson, A., Y. Gritz, y M. Merzlyak. (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. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.
20. Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
21. Huete, A., Jackson, R y Post, D. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 17 (1), 37-53. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7).
22. Insua, J.R, Utsumi, S.A y 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). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>.
23. Jiang, Z ., Huete, AR., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G y Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101 (3), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>.
24. Lu, B. (2017). *Estimating Grassland Biophysical and Biochemical Properties Using Remote Sensing and Modelling* [Tesis de doctorado, University of Toronto] ProQuest. <https://www.proquest.com/openview/0424ddda1f876641bda478ddd8ecf3b6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>.
25. Lu, B y He, Y. (2017). Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous

- grassland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 73-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.011>.
26. Nakano, T., Bavuudorj, G., Urianhai, N. G y Shinoda, M. (2013). Monitoring aboveground biomass in semiarid grasslands using MODIS images. *Journal of Agricultural Meteorology*, 69 (1), 33–39. <https://doi.org/10.2480/agrmet.69.1.1>.
27. Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J y Marshak, A.L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *T Geos Remote Sens*, 33 (2), 481-486. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746029>.
28. Motta-Delgado, P. A., Ocaña Martínez, H. E., y Rojas-Vargas, E. P. (2019). Indicadores asociados a la sostenibilidad de pasturas: una revisión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20 (2), 387-430. <https://doi.org/10.21930/rcta.vol20num2art:1464>.
29. Peñuelas, J., Bart, F y Filella, I. (1995). Semi-empirical índices to access carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31 (2), 221-230. <https://hal.inrae.fr/hal-02779352>.
30. Pardo, O., Rincón, A y Hess. (1999). Gramíneas y leguminosas adaptadas a las condiciones de los llanos orientales. En C.A. Jaramillo (Ed.), *Alternativas forrajeras para los llanos orientales de Colombia* (pp. 7-23). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35795>.
31. Posada, A. W. (2018). *Evaluación de praderas de pasto kikuyo (Cenchrus clandestinus (Hochst. Ex Chiov) Morrone) a través de imágenes multiespectrales* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad de Antioquia.
32. Posada, A. W., Medina, M y Cerón, 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). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195>.
33. Raab, C., Riesch, F., Tonn, B., Barrett, B., Meißner, M., Balkenhol, N y Isselstein, J. (2020). Target-oriented habitat and wildlife management: estimating forage quantity and quality of semi-natural grasslands with

- Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6 (3), 381-398. <https://doi.org/10.1002/rse2.149>.
34. Rahetlah, V.B., Salgado, P., Andrianarisoa, B., Tillard, E., Razafindrazaka, H., Mézo, L y Ramalanjaona, V. L. (2014). Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. *Livestock Research for Rural Development*, 26 (5). <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd26/5/rahe26095.html>.
35. Ren, S, Chen, X y An, S. (2017). Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland. *Int. J. Biometeorol*, 61 (4), 601–612. DOI: 10.1007 / s00484-016-1236-6.
36. 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. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624828>
37. Rincón, A., Flórez, H., Ballesteros, H y León, M. (2018). Efectos de la fertilización en la productividad de una pastura de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Tropical Grassland*, 6 (1), 158-168. [http://dx.doi.org/10.17138/tqft\(6\)158-168](http://dx.doi.org/10.17138/tqft(6)158-168).
38. Ripley, B.D., Venables, B., Bates, D., Hornik, K., Gebhardt, A y Firth, D. (2020). Package “MASS”. Version 7.3-57. <https://cran.r-project.org/web/packages/MASS/MASS.pdf>.
39. R Development Core Team. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Version 4.0.0 2020-04-24, Arbor Day.
40. Rouse, J., R. Haas, J. Schell, y D. (1973). Deering. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA*, 309-317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>.
41. Roujean, J y F. Breon. (1995). Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51 (3), 375-384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3).

42. Rueda, V. P., Peña, J. M., Höglind, M., Bengochea, J. M., Andújar, D. (2019). Comparing UAV-based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. *Sensors*, 19 (3), 535. <https://doi.org/10.3390/s19030535>.
43. Sánchez, J y Yáñez, S. (2018). *Análisis de la correlación entre el volumen y vigorosidad vegetal de pasto con las características del suelo mediante técnicas de UAV* [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas] Repositorio Dspace. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14011>.
44. Sánchez, G., Osorio, E., Alvarez, J.A, Marín, J, Sánchez, A y Gil, O.J. (1989). Adaptación y producción de gramíneas y leguminosas forrajeras en el departamento de Antioquia, Colombia. *Pasturas Tropicales*, 11 (3). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
45. Sinde, I., Yáñez, D., Grefa, J., Arza, M y 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. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1640>.
46. Tamás, J., Nagy, A y Farkané. (2019). Beyond NDVI-Spectral indexing of biomass. *Journal of Agricultural Informatics*, 10 (2). 28-36. <https://doi.org/10.17700/jai.2019.10.2.553>.
47. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA, (2019). Por primera vez en Colombia se identifican las áreas aptas para el cultivo de pastos. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Por-primera-vez-en-Colombia-se-identifican-las-%C3%A1reas-aptas-para-el-cultivo-de-pastos.aspx>.
48. Vela, J.W y Flores, A. (1996). Productividad animal de la asociación *Brachiaria dictyoneura* CIAT 6133-*Desmodium ovalifolium* CIAT 350 en Pucallpa. *Tropical Grasslands*, 18 (1). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
49. Wood, S. (2019). Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation. Package “mgcv”. Version 1.8-31. <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/mgcv.pdf>.

-
50. Zerbato, C., Rosalen, D.L., Furlani, C.E.A., Deghaid., J y Voltarelli, M.A. (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:<http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7167> .
51. Zhang, Z., Liu, M., Liu, X y Zhou, G. A. (2018). New Vegetation Index Based on Multitemporal Sentinel-2 Images for Discriminating Heavy Metal Stress Levels in Rice. *Sensors*, 18 (7), 2172. <https://doi.org/10.3390/s18072172>.
52. Zhangyan, J., Huete, A., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G y Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 63 (3), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>.

Capítulo 3

Estimación de la oferta de forraje y la calidad nutricional del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero partir de imágenes multiespectrales.

3.1 Resumen

El uso de imágenes multiespectrales en la evaluación de pasturas se ha convertido en una herramienta práctica para la gestión y manejo de los sistemas pastoriles a nivel predial, estas imágenes 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 de 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) fue evaluada en campo a los 28 días de rebrote, se tomaron muestras para análisis espectrorramétrico y determinar los contenidos de proteína cruda (PC), fibra en detergente neutra (FDN), fibra en 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 que están 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; para FND, FDA y LIG los resultados no son concluyentes.

Palabras claves

Ganadería de precisión, índice de vegetación, pastura, sensoramiento remoto, vehículo aéreo no tripulado.

3.2 Introducción

Se estima que las coberturas pastoriles cubren el 26% de la superficie terrestre total del mundo y corresponden al 69% de la superficie agrícola, en las áreas tropicales de América del sur ocupan alrededor de 269 millones de hectáreas (Rippstein *et al.*, 2001) y constituyen la principal fuente del recurso forrajero que sustenta una creciente producción bovina; en los Llanos Orientales de Colombia, en particular por el establecimiento de gramíneas del género *Urochloa*, antes *Brachiaria* (Rincón *et al.*, 2019), esta intensificación en el uso del bioma ha permitido transformar áreas ganaderas de escasa relevancia en importantes zonas productoras, ya que estas, por su amplio rango de adaptación, su tolerancia a suelos ácidos y su alto nivel de productividad, se constituyen como un hito tecnológico de la ganadería contemporánea (Rivas y Holmann, 2002; Pardo y Pérez, 2010).

Los sistemas de pastoreo de gramíneas son la forma más económica de alimentación de los rumiantes en la producción de carne o leche, apoyan la sostenibilidad de la producción bovina en general, contribuyen a disminuir costos, proporcionan mayor bienestar, confort animal y no plantean problemas de competencia con granos útiles en la alimentación humana (O'Mara 2012). La adecuada gestión 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 de pastoreo, las condiciones intrínsecas de los suelos, aspectos de meteorología y de etología animal, cada uno de estos factores son agentes dinámicos que tienen influencias mutuas que 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 apoya en un conjunto de tecnologías formadas por los sistemas globales de navegación por satélite, el sensoramiento remoto tanto satelital como aerotransportado en VANT`s, los sistemas de información geográfica, el aprendizaje automático (*machine learning*) y otras técnicas de inteligencia artificial (Kharuf *et al.*, 2018). Donde el sensoramiento remoto 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 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 (Chuvienco, 2002; Ramírez, 2013), los cuales resaltan las propiedades específicas de la vegetación como son: la biomasa, la radiación absorbida y el contenido de clorofila (Arantes, 2017; Mitsikostas, 2017).

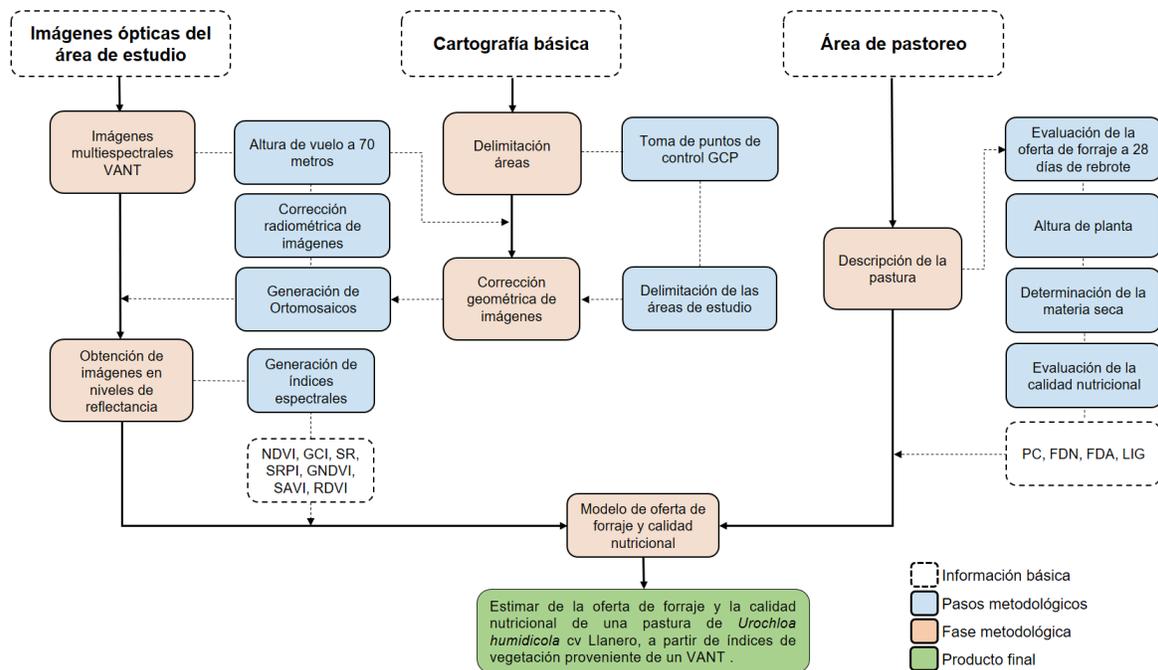
El cálculo de diferentes IV permite interpretar la información de las imágenes en las regiones visible (RGB) e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), entre los cuales están: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) muestra el vigor de las plantas y se caracteriza por el contraste entre la absorción al rojo por la clorofila y la reflectividad al infrarrojo (Cristiano, 2010; Andrade y Moncayo, 2017; Arantes, 2017), el Índice de Brillo (BRI, por sus siglas en inglés), el Índice Perpendicular de Vegetación (PVI, por sus siglas en inglés), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés), el Índice de Vegetación Modificado Ajustado al Suelo (MSAVI, por sus siglas en inglés) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, por sus siglas en inglés) los cuales también han sido utilizados en el estudio de las pasturas (Huete, 1988; Chehbouni *et al.*, 1994; Huete *et al.*, 2002; Beaulieu, Álvarez y Rincón, 2006).

El objetivo de este capítulo es la estimación de la oferta de forraje y la calidad nutricional de una pastura de *Urochloa humidicola* cv Llanero, a partir de diferentes índices de vegetación provenientes de un VANT.

3.3 Metodología

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico se presenta en la Figura 3-1, el flujograma de actividades que permite explicar las fases metodológicas para la estimación de la oferta de forraje y calidad nutricional del pasto Llanero a partir de índices de vegetación.

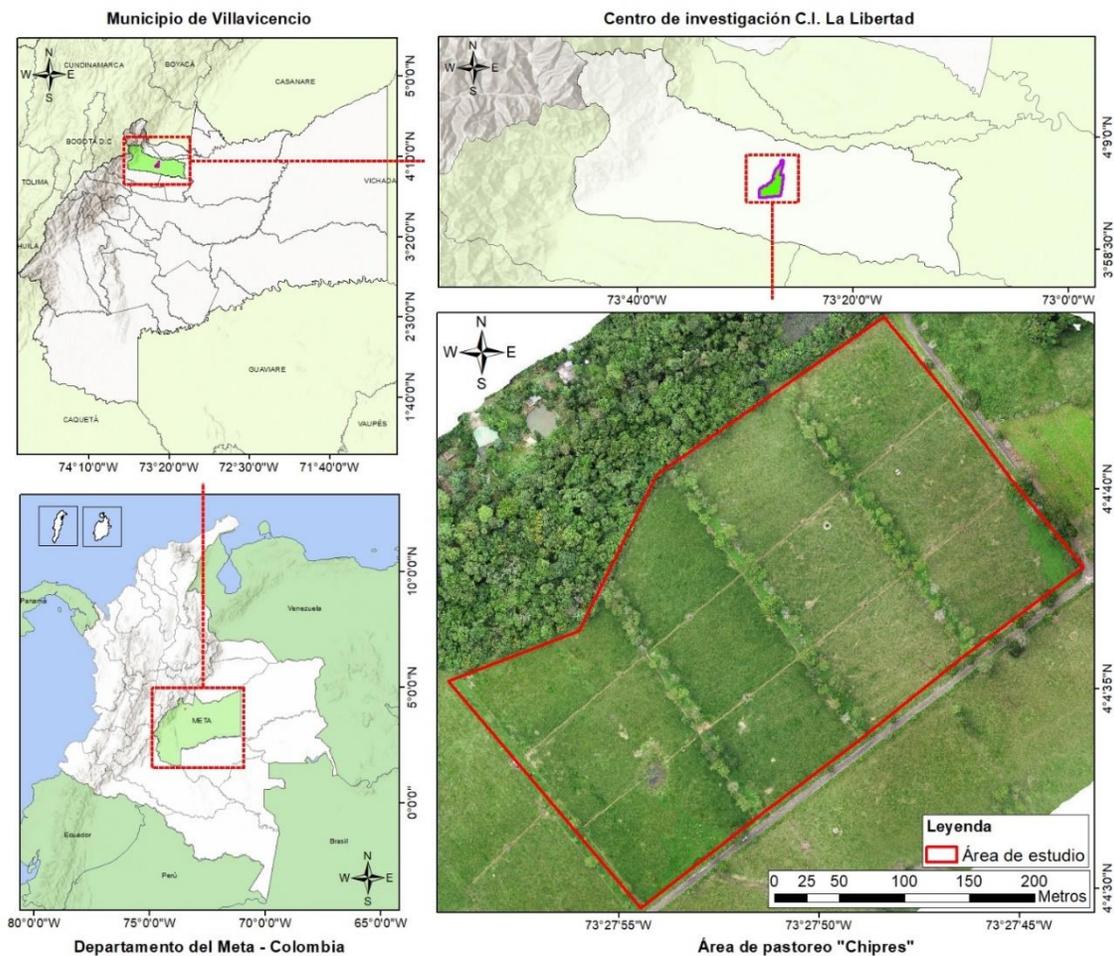
Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-13
Flujograma de actividades para el cumplimiento del segundo objetivo específico.



El estudio se desarrolló en las áreas de pastoreo bovino ubicada en el Centro de Investigación C.I. 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. Como se observa en la Figura 3-2, se ubica en la subregión del Piedemonte Llanero que hace parte de la cordillera oriental de los Andes, en el municipio de Villavicencio del departamento del Meta –Colombia.

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).

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-14
Ubicación del área de pastoreo “Chipres” en el C.I. La Libertad.



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 en promedio (Álvarez y Rincón, 2010; Rincón *et al.*, 2018).

3.4 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 del panel de calibración

de la reflectancia 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, traslape $\geq 75\%$ y velocidad de la aeronave de 6 metros/segundo. Las características de la cámara Mapir se describen en la Tabla 3-1.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12 *Características de la cámara utilizada.*

Características	Cámara Mapir Survey 3W®
Sensor	Sony Exmor R IMX117 12MP (Bayer RGB)
Filtro	FRGN - RGB
Resolución de la imagen	4.000 x 3.000 pixeles
Campo de visión del lente	87° HFOV (19mm) f/2.8 apertura (sin ojo de pez)
GPS / GNSS (Externo)	U-box Neo - M8
Formato de imagen	RAW+JPG, JPG (RAW+JPG es convertido a 16 bit)

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 el software ArcMap 10.8®. Se presenta la Tabla 3-2 con los IV utilizados en este estudio.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-13 *Índices de vegetación y relación de bandas espectrales propuestos.*

Índice	Sigla (en inglés)	Relación entre bandas	Fuente
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse <i>et al.</i> , (1973)
Índice verde de clorofila	GCI	$\left(\frac{NIR}{G}\right) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> , (2003)
Índice de reflectancia de planta senescente	SRPI	$\frac{R - G}{NIR}$	Peñuelas <i>et al.</i> , (1995)

Índice	Sigla (en inglés)	Relación entre bandas	Fuente
Proporción simple	SR	$\frac{NIR}{R}$	Birth y McVey (1968)
Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	GNDVI	$\frac{NIR - G}{NIR + G}$	Gitelson y Merzlyak (1998)
Índice de vegetación de suelo ajustado	SAVI	$\frac{1.5 * (NIR - R)}{(NIR + R + 0.5)}$	Huete (1988)
Índice de vegetación de diferencia renormalizada	RDVI	$\frac{(NIR - R)}{\sqrt{(NIR + R)}}$	Roujean y Breon (1995)

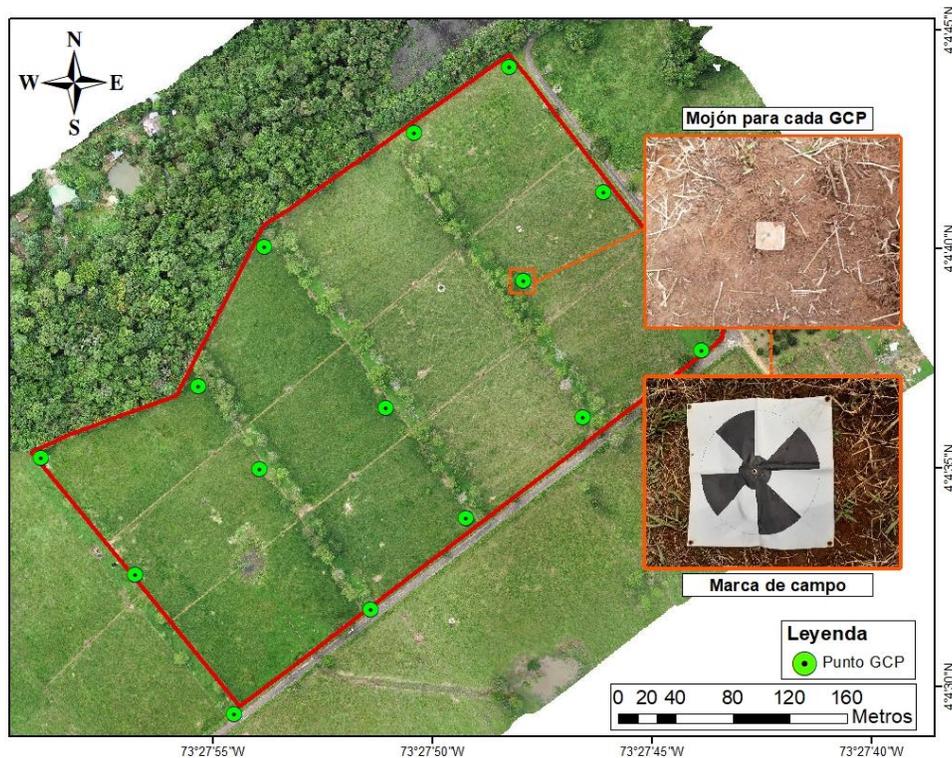
Dónde: G = banda espectral del verde, R= banda espectral del rojo y NIR= banda espectral del infrarrojo cercano.

3.5 Cartografía básica

Se ubicaron puntos de control (*ground control points* – GCP, por sus siglas en inglés), por medio de una estación RTK marca TOPCON® modelo Hiper V, con el propósito de realizar la corrección geométrica del ortomosaico; previo a cada vuelo se distribuyeron marcas de campo para ser identificadas en el ortomosaico y realizar la corrección geométrica y georreferenciar la imagen.

Los puntos de control fueron localizados en las esquinas y al interior del área experimental para un total de 15 GCP. En la Figura 3-3 se observa la distribución espacial de los puntos GCP, mojones y marcas de campo.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15
Ubicación de los puntos de control GCP.



3.6 Área de pastoreo

El área experimental es un sistema de pastoreo rotacional en *Urochloa humidicola* cv Llanero (pasto Llanero), (sin. *Brachiaria humidicola*; antes considerada como *Brachiaria dictyoneura*) (Cook y Schultze-Kraft, 2015; Rincón *et al.*, 2018) con más de cinco años de haber sido establecida y vocación productiva en la ceba de ganado bovino. Se recolectaron un total de 200 muestras entre los meses de junio a agosto, correspondientes a la ventana meteorológica de la época de lluvias.

Se determinó la altura de planta (ALP) (cm) y la oferta de forrajera (OF) (kg MS/ha) a los 28 días de rebrote, edad modal que se pastorea esta gramínea en la región y tiempo recomendado por Costa *et al.*, (2019); se utilizó la metodología convencional, en transectos con un marco de 0.50 cm x 0.50 cm (Rincón *et al.*, 2018); se tiene como día cero el momento en que sale el ganado del potrero. La ALP fue evaluada mediante una regla desde la base la planta hasta la canopia y las muestras de

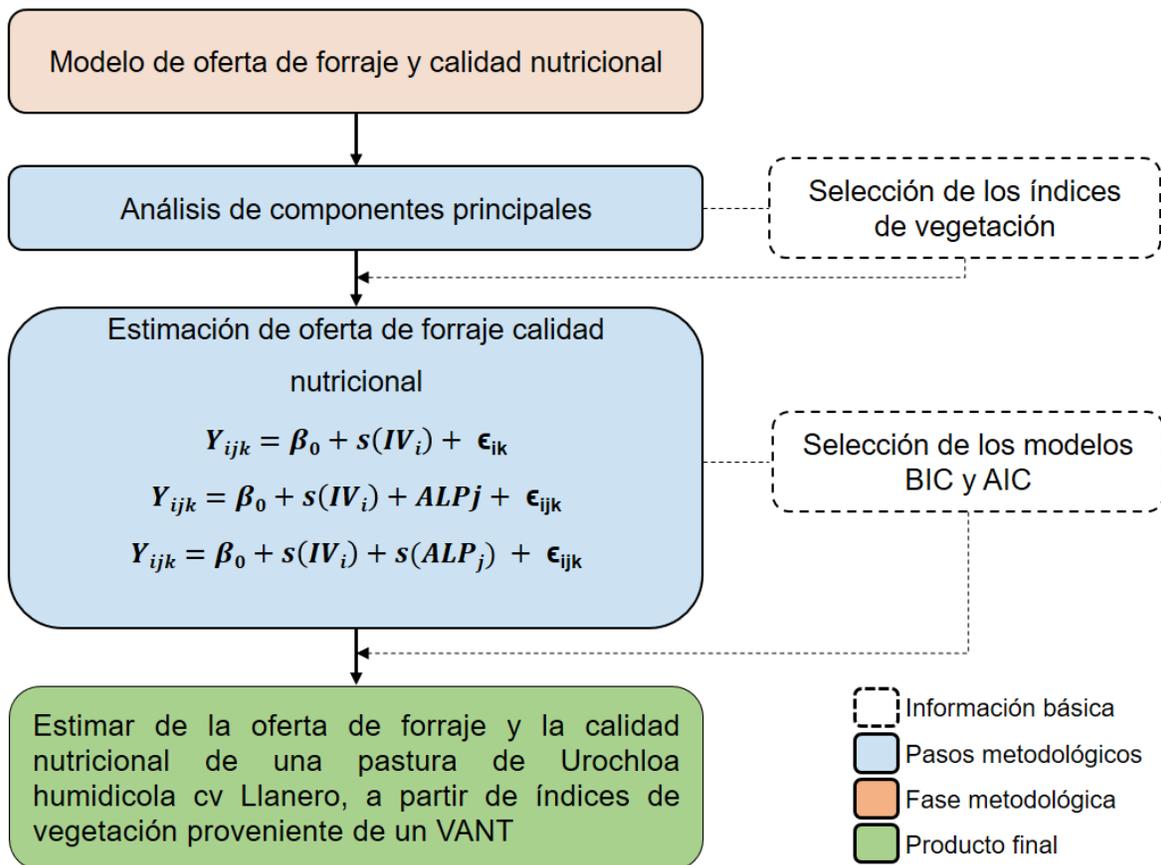
forraje verde se cortaron a 20cm del suelo de acuerdo a su habido de crecimiento (Rincón, 2011), las cuales fueron pesadas y posteriormente secadas en una estufa de aire forzado por 72 horas a 60°C; la materia seca (MS) se obtuvo por diferencias de peso verde y peso seco.

Los contenidos de proteína cruda (PC), fibra en detergente neutro (FDN), fibra en detergente acida (FDA) y lignina (LIG); se determinaron a partir de espectrorrametría del infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés) (Ariza *et al.*, 2018), en el laboratorio de nutrición animal del centro de investigación C.I. Tibaitata, de AGROSAVIA.

3.7 Modelo de oferta de forraje y 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 mediante la librería *FactorMinerR* (Le *et al.*, 2008), en el *software R* (R Core Time, 2016); una vez realizado esto, se prueban tres modelos aditivos generalizado - *GAM*, donde se evalúan diferentes interacciones y efectos de suavizado entre el IV y ALP; los datos fueron analizados en el *software R* (R Core Time, 2016), por medio de la librería *mgcv* (Wood, 2019). En la Figura 3-4, se presenta el esquema de análisis y los modelos utilizados.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-16 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.

Para seleccionar el modelo que mejor se ajusta a la estimación de la oferta 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).

3.8 Resultados y discusión

3.8.1 Descripción de la pastura.

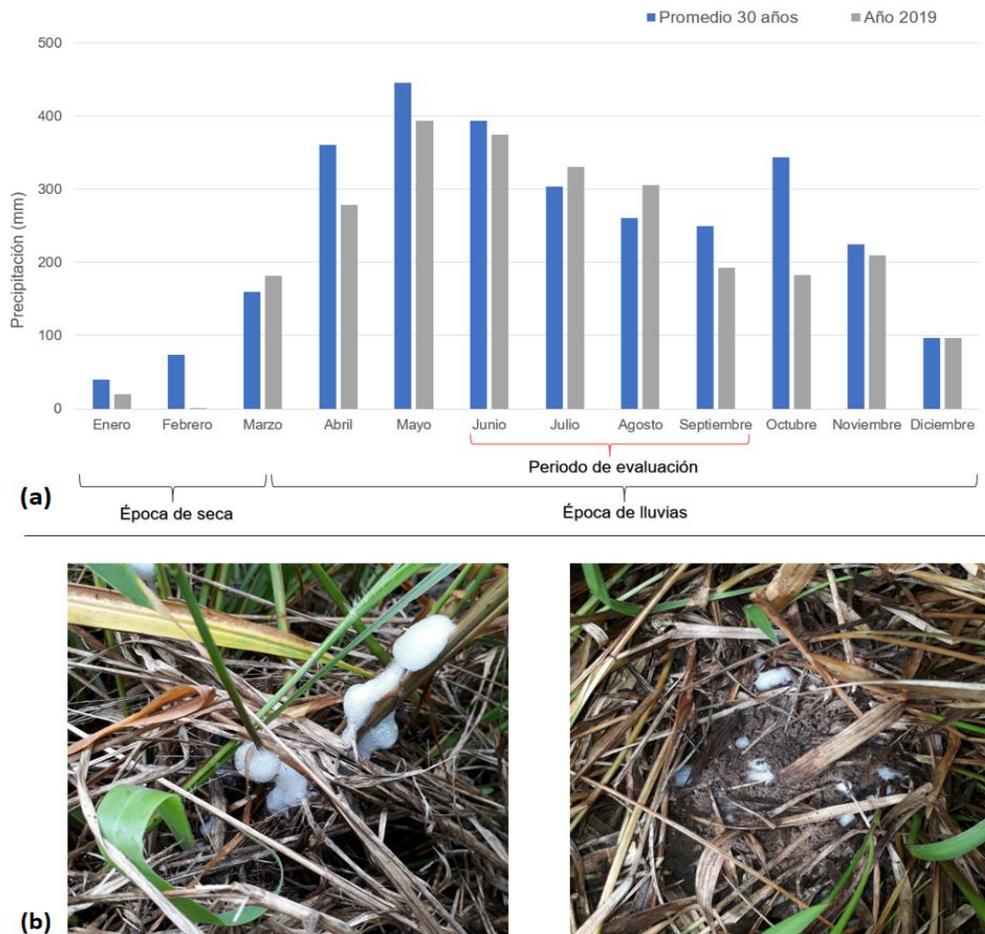
3.8.1.1. Evaluación de la oferta de forraje.

Durante el periodo de evaluación la precipitación para los meses de julio y agosto fueron superiores al promedio acumulado de los últimos 30 años, en un 9.2% y 17.7% respectivamente (Figura 3-5a); esta condición favoreció el ataque poco común del mión de los pastos (*Aeneolamia spp*) (Figura 3-5b).

El pasto Llanero presento una ALP promedio de 44 ± 3 cm, este resultado fue más alto a lo reportado por Rincón, (2011) para la época de lluvias en el departamento de Meta. Con relación a la OF se obtuvo una producción promedio de 1.054kg MS/ha, valor que se encuentra dentro del rango de 950 y 1.700kg MS/ha reportado por el Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], (1987) para la temporada de máxima precipitación; también Rincón *et al.*, (2018), obtuvieron una producción de 958kg 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 1.030kg MS/ha.

De forma contraria Giraldo *et al.*, (1989), reporto una producción de 750kg 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 biomásas de 1.500 kg MS/ha, 1.538 kg MS/ha, 1.200kg MS/ha 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 optimo descritos por este autor.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-17 (a) Precipitación del 2019 comparada con el promedio de 30 años en el C.I. La Libertad, (b) presencia de la *Aeneolamia* spp en el pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero.



3.8.1.2. Evaluación de la calidad nutricional.

En la Tabla 3-3, se presentan los resultados de la calidad nutricional del pasto Llanero obtenidos por medio de la técnica NIRS, donde, a pesar de haber tenido dos meses de alta precipitación y un ataque de miócn de los pastos, el contenido nutritivo no se vio afectado, lo cual demuestra su buena capacidad de recuperación y adaptación a condiciones desfavorables.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-14 *Calidad nutritiva del Urochloa humidicola cv Llanero en la época lluviosa.*

Estadísticos	PC		FDN		FDA		LIG	
	%	g/kg	%	g/kg	%	g/kg	%	g/kg
Promedio	10.5	105	67.6	676	35.8	358	8.2	82
Min	7.9	79	65.1	651	32.2	322	7.0	70
Max	13.4	134	71.2	712	39.1	391	9.2	92
Des	1.4	14	1.67	17	1.3	13	0.5	5

Dónde: PC= proteína cruda, FDN= fibra en detergente neutro, FDA= fibra en detergente acida y LIG= lignina

Los contenidos de PC, FDN y FDA obtenido en este estudio fueron similares a los reportados por Rincón *et al.*, (2018), quienes, al realizar una fertilización nitrogenada al pasto Llanero, en la subregión del Piedemonte del Meta, obtuvieron valores de 9.9%, 73% y 35.1% respectivamente. En épocas de lluvias Pardo y Pérez (2010), reportaron valores máximos de PC del 12%, con promedios de 9.5%, también Pérez *et al.*, (2019) obtuvieron contenidos de PC entre 5-11% en la subregión de la Altillanura en Puerto Gaitán – Meta, y Pérez y Cuesta, (1994), en suelos de las sabanas de los Llanos Orientales obtuvieron una PC de 8.6%.

Estudios realizados por Giraldo *et al.*, (1989), en Amalfi – Antioquia, obtuvieron contenidos de PC de 9.6% y 7.7% en cortes realizados a las 3 y 6 semanas de descanso, posteriormente, Giraldo *et al.*, (2007) reportaron valores de 8.4% (PC), 75.4% (FDN) y 49.1% (FDA), en la sub región de Bajo Cauca en el departamento de Antioquia, y Canchila *et al.*, (2009), obtuvieron niveles de PC y FDA de 6.5% y 47.5%, en Barrancabermeja – Santander.

El pasto Llanero también ha sido evaluado en otras regiones tropicales, en Costa Rica, Sánchez *et al.*, (2000) reportaron valores de 7.3%, 69.3% y 6% para PC, FDN y LIG respectivamente, y Nguku, (2015), reporto contenidos de 10.7% (PC), 63.4% (FDN) y 40% (FDA), en Katumani, Machakos – Kenia.

3.8.1.3. Índices de vegetación asociados a la pastura.

La Tabla 3-4, 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 RGB) 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 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), situación que fue evidenciada a pesar de haber seguido el proceso de calibración de las imágenes recomendado por el fabricante.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15 *Índices de vegetación calculados para Urochloa humidicola cv Llanero.*

Índice	Media	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

Dónde: NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, GCI es el índice verde de clorofila, SRPI es el índice de reflectancia de planta senescente, SR es el índice de proporción simple, GNDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada verde, SAVI es el índice de vegetación de suelo ajustado el RDVI es el índice de vegetación de diferencia renormalizada.

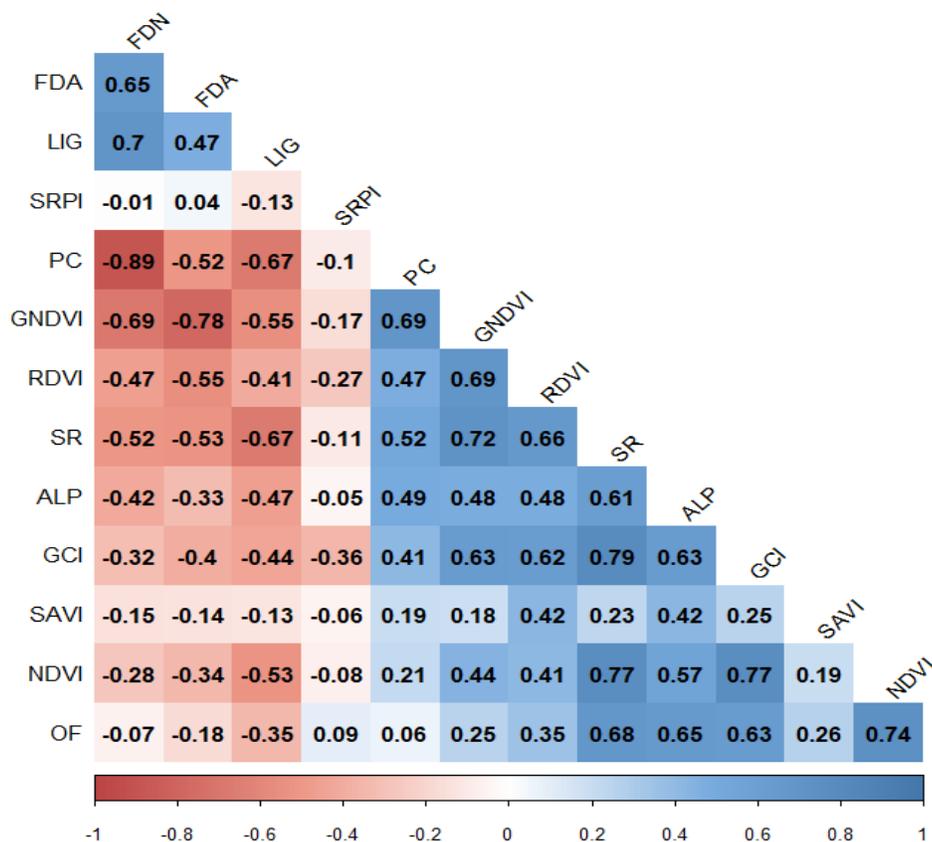
Para el IV NDVI, Sinde *et al.*, (2020), obtuvieron promedios similares de 0.363, 0.371 y 0.362, en pasturas de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), ryegrass anual (*Lolium multiflorum*) y ryegrass perenne (*Lolium perenne*) respectivamente, generados a partir del lente NIR GP39728Green, que es fabricado por la casa comercial *Peauproductions* anexa a Mapir.

Las cámaras Mapir Survey® también han sido incorporada en diferentes niveles de análisis con resultados satisfactorios; Maimaitijiang *et al.*, (2020) a partir de la respuesta espectral de la planta y características térmicas y de textura, estimaron el rendimiento de la producción de grano de soya (*Glicina max*) en un modelo de análisis de aprendizaje profundo, con un $R^2= 0.72$, esta misma metodología también fue implementada por Kerkech *et al.*, (2020), donde a partir de imágenes RGB y multiespectrales obtuvieron un 92% en la detección de enfermedades en viñedos de la región del Valle de Loira en Francia.

3.8.2 Estimación de la oferta y calidad nutricional del pasto

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 3-6, se observa que la OF se correlacionó de forma positiva con la ALP (0.65) y con los índices NDVI y SR con valores de 0.74 y 0.68; la PC se correlaciono con los IV SR y GNDVI (0.52 y 0.69), mientras que para el FDN y LIG se observó una correlación negativa para los IV SR (-0.52 y -0.67), GNDVI (-0.69 y -0.55) y GCI (-0.32 y -0.44) y 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 $p<0.001$ para las variables evaluadas.

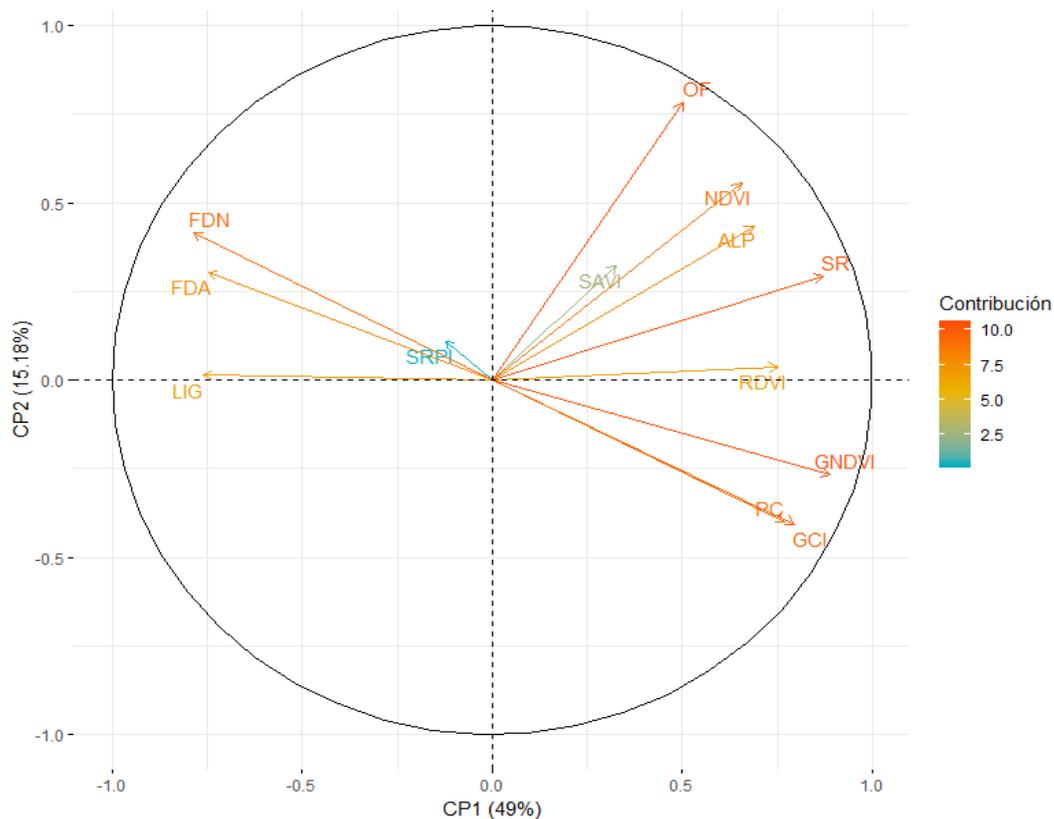
Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-18 *Matriz de correlación de las variables de crecimiento y los índices de vegetación.*



Dónde: NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, GCI es el índice verde de clorofila, SRPI es el índice de reflectancia de planta senescente, SR es el ín índice de proporción simple, GNDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada verde, SAVI es el índice de vegetación de suelo ajustado, el RDVI es el índice de vegetación de diferencia renormalizada, OF es oferta de forraje, ALP es altura de planta, PC es proteína cruda, FDN es fibra en detergente neutro, FDA es fibra en detergente acida y LIG es lignina.

Se realizó el test de Bartlett, el cual fue de $p < 0.001$, lo que indica que la matriz de correlaciones es distinta a la matriz de identidad y se procede a realizar el análisis de componentes principales (ACP) (Figura 3-7).

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-19 **Análisis de componentes principales.**



Dónde: NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, GCI es el índice verde de clorofila, SRPI es el índice de reflectancia de planta senescente, SR es el índice de proporción simple, GNDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada verde, SAVI es el índice de vegetación de suelo ajustado, el RDVI es el índice de vegetación de diferencia renormalizada, OF es oferta de forraje, ALP es altura de planta, PC es proteína cruda, FDN es fibra en detergente neutro, FDA es fibra en detergente acida, LIG es lignina y CP1, es el primer componente y CP2 es el segundo componente.

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 calidad nutricional 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 contribuyó a la conformación de este eje fue el NDVI (15.58).

Estas relaciones fueron inversas a las reportadas por Posada *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 clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Morrone) y el CP2 explicó el 24.1% de la varianza, donde se agruparon variables relacionadas a la calidad nutricional; sin embargo, este estudio coincidió en el NDVI, el cual fue el IV que más contribuyó a la formación del componente asociado a la oferta de forraje.

A partir de los resultados obtenidos del ACP se construyeron los GAM para relacionar las características de OF y de calidad nutricional del pasto Llanero con los IV. Los IV utilizados corresponden a los que mayor contribución tuvieron 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 la Tabla 3-5, se presenta la estructura de los modelos.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-16 *Estructura de los modelos 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
	$Y_{ij} = \beta_0 + s(IV_i) + \epsilon_{ij}$	Ecuación 5
CP2	$Y_{ijk} = \beta_0 + s(IV_i) + ALP_j + \epsilon_{ijk}$	Ecuación 6
	$Y_{ijk} = \beta_0 + s(IV_i) + s(ALP_j) + \epsilon_{ijk}$	Ecuación 7

Dónde: Z es la PC (g/kg), U es el FDN (g/kg), V es la FDA (g/kg), W es la LIG (g/kg), Y es la OF (kg MS/ha), IV son los IV probados, ALP es la altura de la planta, β_0 es el intercepto, s es la función de suavizado para la variable y ϵ es el efecto residual.

Para la estimación de la OF se probaron los IV NDVI y GCI, junto con la interacción de la ALP, se obtuvo una correlación positiva con estos índices de 0.74 y 0.63 (Figura 3-6).

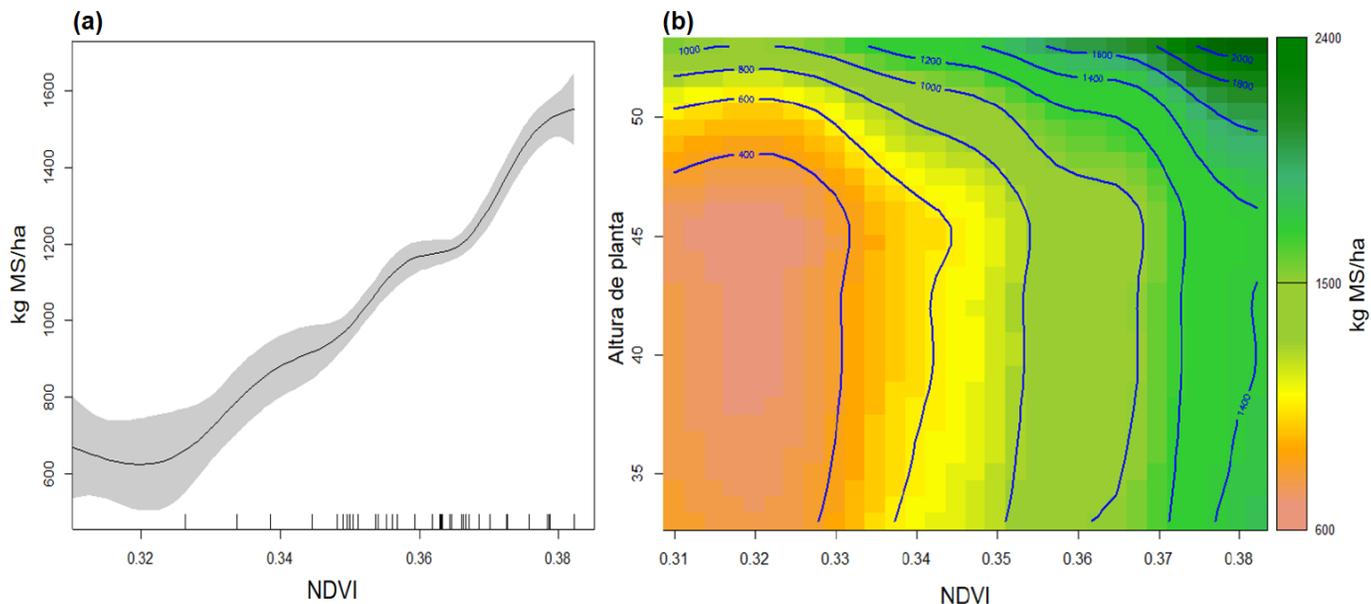
La correlación del NDVI con la OF y la ALP concuerda con lo reportado por la literatura en relación a las características de crecimiento de las pasturas, donde el NDVI es un indicador de biomasa en especial cuando la vegetación evaluada presenta buena cobertura (Zerbato *et al.*, 2016), esta característica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

La correlación de la ALP con la OF fue de 0.65, resultado que contrasta con el obtenido por Mónaco *et al.*, (2017) quienes reportaron una correlación de 0.29 en gramíneas de los genero *Poa*, en la llanura Pampeana, de forma similar Scarabotti *et al.*, (2011) argumentaron que la ALP a pesar de ser parámetro fácil obtener, 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 *Brachiaria 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 Santillan *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.

El modelo que mejor explicó la OF fue el que consideró el IV y la ALP en función suavizada ($Y_{ijk} = \beta_0 + s(IV_i) + s(ALP_j) + \epsilon_{ijk}$) (Tabla 3-5 – Ecuación 7), sin presentar una diferencia marcada, al probar este modelo con el IV NDVI presentó valores superiores de R^2 (0.78), desviación explicada (0.79) y con valores inferiores de BIC y AIC en comparación con el GCI (Tabla 3-6), para ambos casos el IV y la ALP obtuvieron un valor de $p \leq 0.001$. En la Figura 3-8a, se presenta los valores ajustados entre el NDVI y la OF, se observa un comportamiento curvilíneo de una relación no lineal; en la Figura 3-8b, son los valores ajustados entre el NDVI, ALP y la OF, se observa que la disponibilidad de biomasa esta relaciona con diferentes rangos del índice de vegetación y a diferentes alturas, como se presenta de la siguiente forma: **1.** valores de NDVI entre 0.31 – 0.34, con ALP por debajo de 50 cm se relacionaron con OF entre 400 – 600 kg MS/ha, **2.** valores de NDVI entre 0.341 – 0.36 y ALP ≥ 30 cm, se asociaron con biomásas entre 600 – 1.000 kg MS/ha, **3.** valores de NDVI entre 0.361 – 0.38 y ALP ≥ 30 cm se asociaron con biomásas entre 1.000 – 1.600 kg MS/ha y **4.** valores de NDVI superiores a 0.38 y ALP ≥ 50 cm se relacionó con OF entre 1.600 – 2.000 kg MS/ha.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-20 (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.



Los valores obtenidos en este trabajo son similares a los reportados por Gargiulo *et al.*, (2020) quienes en New South Wales, Australia, 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*). De igual manera Posada *et al.*, (2019), estimo la oferta de biomasa verde a partir de modelos *GAM* en pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinum* (Hochst. ex Chiov.), donde encontraron que el modelo que mejor explico la biomasa a partir del IV NDVI obtuvo un R^2 de 0.993.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-17 *Criterios de selección para los modelos evaluados.*

Parámetro	Índice	BIC	AIC	R ²	Desviación explicada
OF	NDVI	5238	5177	0.788	0.795
	GCI	5290	5227	0.758	0.767
PC	RDVI	2838	2799	0.541	0.561
	SR	2723	2682	0.557	0.575
	GNDVI	2490	2449	0.764	0.77
	GCI	2558	2517	0.712	0.72
	RDVI	2981	2938	0.583	0.593
FDN	SR	3051	3013	0.491	0.501
	GNDVI	3187	3164	0.234	0.242
	GCI	3142	3100	0.361	0.375
	RDVI	2672	2633	0.362	0.375
FDA	SR	2663	2623	0.378	0.392
	GNDVI	2415	2773	0.278	0.286
	GCI	2402	2764	0.284	0.291
	RDVI	2111	2068	0.366	0.381
LIG	SR	1993	1951	0.435	0.446
	GNDVI	2070	2029	0.328	0.341
	GCI	2037	1994	0.379	0.391

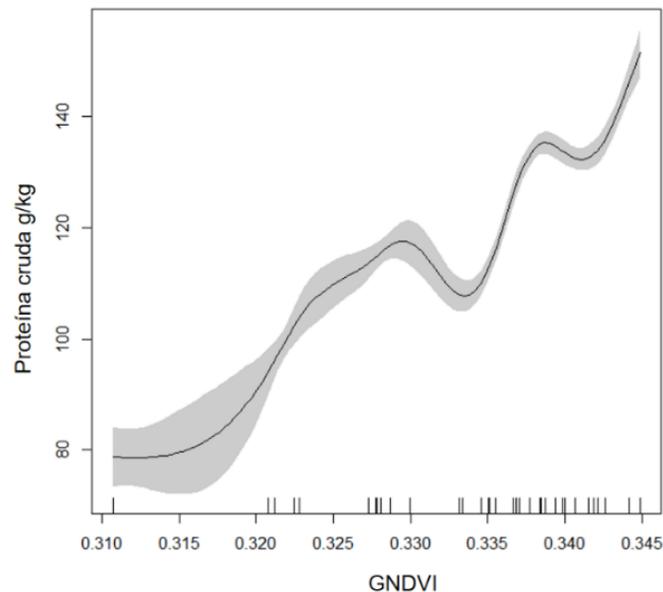
Dónde: OF es la oferta de forraje, PC es la proteína cruda, FDN es la fibra en detergente neutro, FDA es la fibra en detergente acida, LIG es lignina, BIC es el criterio de información Bayesiano y AIC es criterio de información de Akaike.

Con relación a la PC el modelo que utilizó el GNDVI en función suavizada presento un efecto significativo con la variable dependiente ($p \leq 0.001$) (Figura 3-9) con un R² de 0.764, desviación explicada de 0.77 y menor BIC (2558) y menor AIC (2517), en comparación a los otros índices (Tabla 3-6). 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.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-21 Ajuste entre los valores del IV GNDVI y la proteína cruda del pasto Llanero.

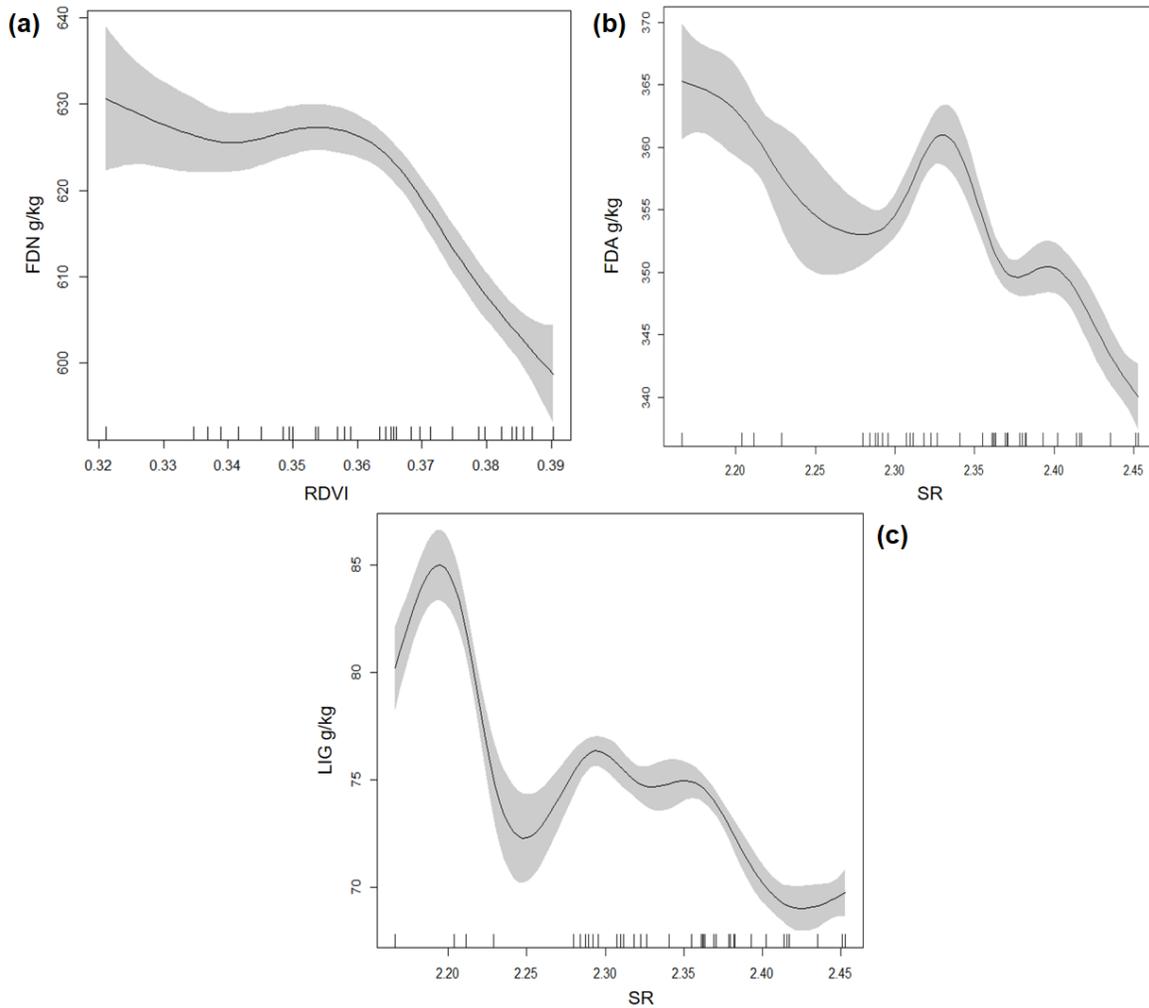


El IV GNDVI, utiliza la diferencia normalizada entre las bandas espectrales verde y NIR, lo que genera una medición en un rango menor en comparación al NDVI (Tabla 3-4), sin embargo, (Gitelson y Merzlyak, 1998) encontraron que este índice presenta alta sensibilidad a la clorofila en diferentes coberturas vegetales, obteniendo un valor de R^2 de 0.96. La clorofila en la hoja tiene alta relación con la concentración de nitrógeno (N) y refleja el estado nutricional con respecto a este nutriente (Alonso *et al.*, 2008; Rincón y Ligarreto, 2010; Kharuf *et al.*, 2018), el cual está relacionado con el contenido proteico de las hojas (Rincón *et al.*, 2019).

El índice RDVI utilizado para estimar el FDN, presentó un R^2 con la variable dependiente de 0.583 y desviación explicada de 0.593 (Figura 3-10a). 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 3-10b); así mismo el SR contribuyó en la estimación de la LIG con valores de R^2 y desviación explica de 0.392 y 0.446 (Figura 3-10c) (Tabla 3-6).

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-22 (a) Ajuste entre los valores del IV RDVI y la fibra en detergente neutra del pasto Llanero, (b) Ajuste entre los valores del IV SR y la fibra en detergente acida del pasto Llanero (c) Ajuste entre los valores del IV SR y la lignina del pasto Llanero.



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

3.10. Conclusiones

Con los resultados obtenidos fue posible determinar que el índice de vegetación NDVI es el que mejor se correlaciona con la oferta de forraje y el GNDVI es el que mejor correlacionó la proteína cruda.

Los modelos *GAM* propuestos para las estimaciones de producción y proteína a partir de los índices NDVI y GNDVI generados con imágenes multiespectrales de un VANT, en pasturas de *Urochloa humidicola* cv Llanero, son un buen estimador de la oferta forrajera y proteína cruda.

Con relación a los contenidos de fibra en detergente neutra, fibra en detergente acida y lignina, las estimaciones no son concluyentes con este tipo de sensor evaluado.

3.11. Recomendaciones

Esta información espectral sobre la producción y calidad del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero, se puede utilizar para ayudar a las decisiones de gestión y manejo de este tipo de pastos, bajo las condiciones de evaluación en las que se realizó el experimento. Se recomienda para estudios futuros la validación de este sensor en áreas pastoriles mayores, con la incorporación de series multitemporales de imágenes en ciclos hidrometeorológicos contrastantes.

Se recomienda realizar estudios similares con otras especies forrajeras de pastoreo importantes de la región de manera que, responda integralmente a las necesidades de una ganadería de precisión moderna.

Es recomendable experimentar con otros tipos de sensores y regiones del espectro electromagnético para aumentar el conocimiento en el campo de la caracterización de pasturas.

3.11 Bibliografía

1. Alonso M., Rozados M., Ignacio M., Rozas V., Lamas S., Chapela D. y Fontúrbel M. (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. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4249059>.
2. Álvarez, M y Rincón, A. (2010). Características agroecológicas de la Orinoquia colombiana. En A. Rincón., C.A. Jaramillo (Ed.), *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos* (pp. 27-70). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12703>.
3. Andrade, B y Moncayo, L. (2017). *Análisis de NDVI contrastando diferentes metodologías de toma de datos espectrales, en cultivos de pastos en etapa previa de pastoreo* [Tesis de pregrado, Universidad de las fuerzas armadas] Repositorio Dspace. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13158>
4. Arantes, A. (2017). *Caracterização Biofísica e Potencial à Intensificação Sustentável da Pecuária Brasileira em Pastagens* [Tesis de doctorado, Universidad Federal de Goiás - UFG] Biblioteca Digital de Teses e Dissertações Biblioteca Digital Brasileña de Tesis y Disertaciones (BDTD). <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/8075>
5. Ariza, C., Mayorga, O. L., Mojica, B., Parra, D., y 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*, (1), 44–52. <https://doi.org/10.1177/0967033517746900>.
6. Arruda, D.S., Weber, M., Jobin, C y Carvalho, P.C. (2011). Métodos de avaliação de massa de forragem em pastagens de capim-estrela submetidas a intensidades de pastejo. *Ciência Rural*, 41 (11), 2004-2009. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010384782011001100025&script=sci_abstract&tlng=pt.
7. Beaulieu, N., Álvarez, M. y Rincón, M. (2006). Detección de la degradación en pasturas usando series temporales de imágenes multiespectrales en los llanos orientales de Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/1218>.

8. Bernardi, A.C y Pérez, N. (2014). Agricultura de Precisão em Pastagens. *Brazilian Precision Agriculture Research Network*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003689/agricultura-de-precisao-em-pastagens>.
9. Birth, G y G. McVey. (1968). Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60 (1), 640-643. <https://doi.org/10.2134/agronj1968.00021962006000060016x>.
10. Braga, G. J., Pedreira, C., Herling, V.R., Luz, P., Marchesin, W y Macedo, F. (2009). Quantifying herbage mass on rotationally stocked palisadegrass pastures using indirect methods. *Scientia Agricola*, 66 (1), 127-131. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100018>.
11. Canchila, E.R, Soca, Mildrey, Ojeda, F, & Machado, R. (2009). Evaluación de la composición bromatológica de 24 accesiones de *Brachiaria* spp. *Pastos y Forrajes*, 32 (4). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942009000400002&lng=es&tlng=es.
12. Carulla, J.E., Lascano, C.E., Ward, J.K. (1991). Selectivity of resident and oophageal fistulated steers grazing *Arachis pintoi* and *Brachiaria dictyoneura* in the Llanos of Colombia. *Tropical Grasslands*. 25, 317-324. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/44085>.
13. Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, H y Sorooshian. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 48 (2) 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1).
14. Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. 1a. ed. Barcelona. Editorial Ariel.
15. Costa, N L., Rodrigues, A., Malgalhaes, J., Bendahan, A., Rodrigues, B y Santos, F. (2019). Morfogênese e composição química de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero sob períodos de descanso. *Res., Soc. Dev*, 8 (10),. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i10.1356>.
16. Cook, B y Schultze-Kraft. (2015). Botanical name changes – nuisance or a quest for precision?. *Tropical Grasslands*, 3, 34-40. DOI:10.17138/TGFT(3)34-40.

17. Cristiano, P.M. (2010). *Estimación de la productividad primaria mediante el modelo de eficiencias y sensores remotos*. [Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires]. DOI:10.13140/RG.2.2.32765.46562.
18. Fournel, S., Rousseau, A.N y Laberge, B. (2017). Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming. *Biosyst Eng.* 155, 96–123. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.005>.
19. Gargiulo, J., Clark, C., Lyons, N., de Veyrac, G., Beale, P y 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. <https://doi.org/10.3390/rs12193222>.
20. Giraldo, L., Hincapie, A., Vásquez, M y Zapata, C. (1989). Evaluación de gramíneas y leguminosas forrajera en Amalfi, Colombia. *Pasturas Tropicales*, 11 (2). <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
21. Giraldo, L., Ranilla, M., Tejido, M y Carro, M. (2007). Efecto de la sustitución de *Brachiaria dictyoneura* por acacia mangium sobre la fermentación ruminal in vitro. *Pasturas Tropicales*. 29, 39-46. http://www.tropicalgrasslands.info/public/journals/4/Elements/DOCUMENTS/2007-vol29-rev1/Vol_29_rev1_07_pags_39-46.pdf.
22. Gitelson, A y M. Merzlyak. (1998). Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*, 22 (5), 689-692. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01133-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2).
23. Gitelson, A., Y. Gritz, y M. Merzlyak. (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. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.
24. Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
25. Huete, A; Didan,K; Miura,T; Rodriguez, E,P; gao,X; Ferreira, L,G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS

- vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 (2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
26. Instituto Colombiano Agropecuario. (1987). Pasto Llanero. Boletín Técnico (151). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/20476/78464_7324.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
27. Insua, J.R, Utsumi, S.A y 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). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>.
28. Kerkech, M, Hafiane, A y 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105446>.
29. Kharuf, S., Orozco, R., Aday, O y Pineda, E. (2018). Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. *Sistemas & Telemática*, 16 (47), 45-58. <https://doi.org/10.18046/syt.v16i47.3221>.
30. Le, S., Josse, J y Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25 (1), 1-18. DOI: 10.18637/jss.v025.i01.
31. Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Hartling, S y Esposito, F. (2020). Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111599>.
32. Mitsikostas, A. (2017). *Monitorización y optimización de tierras con drones y fotogrametría aérea para aplicaciones de precisión en agricultura* [Trabajo de maestría, Universidad Politécnica de Valencia] Riunet – UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/86353>.
33. Mónaco, N., Santa, V., Rosa, M. y Autran, V. (2017). Evaluación De Métodos Indirectos Para Estimar Biomasa En Un Pastizal Natural Del Sur De Córdoba (Argentina Central). *Revista científica europea. ESJ*, 13 (36), 59. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p59>.

34. Nguku, S. (2015). An evaluation of Brachiaria grass cultivars productivity in semi arid Kenya [Tesis de maestria, Universidad del Sureste de Kenia] Digital Repository. <http://repository.seku.ac.ke/handle/123456789/1380>.
35. O'Mara, F. P. (2012). The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany*, 110 (6), 1263–1270. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs209>.
36. Pardo, O y Pérez, O. (2010). Alternativas forrajeras para los llanos orientales de Colombia. En A. Rincón., C.A. Jaramillo (Ed.), *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos* (pp. 27-70). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12703>.
37. Passoni, F., Rosemberg, M y Flores, A. (1992). Evaluación de gramíneas y leguminosas forrajeras en Satipo, Perú. *Pasturas Tropicales*, 14 (1). <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
38. Peñuelas, J., Bart, F y Filella, I. (1995). Semi-empirical índices to access carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31 (2), 221-230. <https://hal.inrae.fr/hal-02779352>.
39. Pérez, R y Cuesta, P. 1994. Especies forrajeras para el piedemonte llanero, su fertilización y manejo. En CORPOICA, SEAGRO (Ed.), *Producción de pasto en el piedemonte llanero*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13485>.
40. Pérez, O., Bueno, G., Baquero, J., Cassalet, E., Molina. ... Fuentes, J. (Eds). (2019). Modelo productivo tecnologías integrales para sistemas de producción de bovinos de cría en la altillanura colombiana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35060>.
41. Posada, A. W., Medina, M y Cerón, 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). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195>.

42. Pullanagari, R.R., Yule, I.J., Hedley, M.J., Tuohyet, M. P., Dynes R. A y King, W. M. (2012). Multi-spectral radiometry to estimate pasture quality components. *Precision Agric*, 13, 442–456. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9260-y>
43. R Development Core Team. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Version 4.0.0 2020-04-24, Arbor Day.
44. Ramírez, A. (2013). *Evaluación del crecimiento de pastos usando índices de vegetación calculados a partir de información satelital* [Tesis de maestría, Universidad Nacional] Repositorio Institucional Biblioteca Digital. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75325>.
45. Rincón, A y Ligarreto, G. (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. <http://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/202>.
46. 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. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624828>.
47. Rincón, A., Flórez, H., Ballesteros, H y León, M. (2018). Efectos de la fertilización en la productividad de una pastura de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Tropical Grassland*, 6 (1), 158-168. [http://dx.doi.org/10.17138/tgft\(6\)158-168](http://dx.doi.org/10.17138/tgft(6)158-168).
48. Rincón, A., Álvarez, M., Pardo, O., Amaya, M. A y Díaz, R. A. (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.
49. Ripley, B.D., Venables, B., Bates, D., Hornik, K., Gebhardt, A y Firth, D. (2020). Package “MASS”. Version 7.3-57. <https://cran.r-project.org/web/packages/MASS/MASS.pdf>.
50. Rippstein, G., Amézquita, E., Escobar, G y Grollier, C. (2001). Condiciones Naturales de la Sabana. En G. Rippstein., J, Escobar., F, Motta (Ed.),

Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los llanos orientales de Colombia. CIRAD – CIAT. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9670>.

51. Rivas, L y Holmann, F. (2002). Sistemas de doble propósito y su viabilidad en el contexto de los pequeños y medianos productores en América latina tropical. In: Curso y Simposium Internacional. Actualización en el manejo de ganado bovino de doble propósito. UNAM. http://webapp.ciat.cgiar.org/tropileche/conferencias.pdf/holmann_paper.pdf.
52. Rouse, J., R. Haas, J. Schell, y D. (1973). Deering. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA*, 309-317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>.
53. Roujean, J y F. Breon. (1995). Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51 (3), 375-384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3).
54. Sánchez, G., Osorio, E., Alvarez, J.A, Marín, J, Sánchez, A y Gil, O.J. (1989). Adaptación y producción de gramíneas y leguminosas forrajeras en el departamento de Antioquia, Colombia. *Pasturas Tropicales*, 11 (3). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
55. Sánchez, J., Villareal, M y Soto, H. (2000). Caracterización nutricional de los componentes forrajeros de cuatro asociaciones gramíneas/Arachis pintoi. *Nutrición Animal Tropical*, 6 (1). https://www.academia.edu/27599445/Caracterizaci%C3%B3n_de_los_componentes_forrajeros_de_cuatro_asociaciones_gram%C3%ADneas_Arachis_pintoi.
56. Santillan, R.A, Ocumpaugh, W.R y Mott, G.O. (1979). Estimating Forage Yield with a Disk Meter. *Agronomy Journal*. 71, 71-74. DOI: 10.2134/agronj1979.00021962007100010017x.
57. Scarabotti, D. S., Feldman, S. R., Refi, R. (2011). Evaluación de distintos métodos para estimar la biomasa aérea en macollas de *Spartina argentinensis parodi*. *Pastos*, 32 (1), 69-79. <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/1306>

58. Shanahan, J.F., Schepers, J.S., Francis, D.D., Varvel, G.E., Wilhelm, W.W., Tringe, J.M., Major, D.J. (2001). Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron J.* 93 (3), 583-589. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.933583x>.
59. Sinde, I., Yáñez, D., Grefa, J., Arza, M y Gil, M. (2020). Estimación del rendimiento del pasto mediante NDVI con imágenes multispectrales de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Revista GEOESPACIAL*, 17 (1), 25-38. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1640>.
60. Starks, P.J., Zhao, D., Phillips, W.A y Coleman, S.W. (2006). Development of Canopy Reflectance Algorithms for Real-Time Prediction of Bermuda grass Pasture Biomass and Nutritive Values. *Crop Science*, 46 (2), 927-934. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0258>.
61. Vela, J.W y Flores, A. (1996). Productividad animal de la asociación *Brachiaria dictyoneura* CIAT 6133-*Desmodium ovalifolium* CIAT 350 en Pucallpa. *Tropical Grasslands*, 18 (1). <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/pages/view/Pasturas>.
62. Wood, S. (2019). Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation. Package “mgcv”. Version 1.8-31. <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/mgcv.pdf>.
63. Zerbato, C., Rosalen, D.L., Furlani, C.E.A., Deghaid., J y Voltarelli, M.A. (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:<http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7167> .