

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN PASTIZALES MEDIANTE MÉTODOS
TRADICIONALES Y USO DE DRONES EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA**

POR:

I.E. IVÁN RUBÉN GRIJALVA GÓMEZ

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

ÁREA MAYOR: RECURSOS NATURALES

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

MARZO DE 2022



Estimación de biomasa en pastizales mediante métodos tradicionales y uso de drones en el estado de Chihuahua. Tesis presentada por Iván Rubén Grijalva Gómez como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias, ha sido aprobada y aceptada por:

Ph.D. Carlos Ortega Ochoa
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

D.Ph. Agustín Corral Luna
Secretario de Investigación y Posgrado

Ph.D. Iván Adrián García Galicia
Coordinador Académico

Dr. Carlos Raúl Morales Nieto
Presidente

Marzo 08 2022

Fecha

Comité:

D. Ph. Alfredo Pinedo Alvarez.
Dr. Eduardo Santellano Estrada.
Dr. Gilberto Sandino Aquino de los Ríos.

© Derechos Reservados
AUTOR: IVÁN RUBÉN
GRIJALVA GÓMEZ
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO
FRANCISCO R. ALMADA
KM.1, CHIHUAHUA, CHIH.,
MÉXICO C.P. 31453
MARZO 2022

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones y tanto bien recibido.

A mi familia. A mis padres, por su amor, cariño, su ternura, por todas las enseñanzas y aprendizajes, por su comprensión y por llenarme el corazón. A mi hermana, mi mejor amiga, mi cómplice, por acompañarme siempre, por cuidarme, por tanto amor y alegría compartida. Gracias por endulzar el mundo. A mi sobrinita, por ser una motivación y fuente de inspiración.

Al Dr. Carlos Raúl Morales Nieto, por hacer esto posible, por todo el apoyo brindado en cada momento, por su calidad profesional y de persona, por su dedicación, compromiso y paciencia al compartir sus conocimientos y cada enseñanza.

A mi comité de Tesis, por esta oportunidad, por su disposición, apoyo y la confianza brindada.

A mis compañeros, por el gusto de coincidir y por todo lo compartido, especialmente a Carlos Monzón.

A la Facultad de Zootecnia y Ecología. A cada uno de mis maestros, por todos los aprendizajes, tanto académicos, laborales o de vida. A los directivos, al personal administrativo y de intendencia, por todas las facilidades que nos brindan, por su atención y amabilidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de apoyo que me fue otorgada en el marco del Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

DEDICATORIA

A mi familia. Todo esto es por ustedes y para ustedes.

CURRICULUM VITAE

El autor nació el 18 de abril de 1994 en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México.

- | | |
|-------------|---|
| 2012 - 2016 | Estudios de licenciatura en la carrera de Ingeniero en Ecología, egresado de la Facultad de Zootecnia y Ecología de la UACH. |
| 2015 | Tercer lugar en el “3er. Encuentro de Jóvenes Investigadores de IES del Estado de Chihuahua” en el área disciplinar Desarrollo Sustentable y Medio Ambiente. En la Universidad Autónoma de Chihuahua. |
| 2015 | Participación en el “3er. Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Chihuahua”. En la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. |
| 2020 - 2021 | Estudiante de Maestría en Ciencias con área mayor en Recursos Naturales y línea de investigación de Manejo y Mejoramiento de Pastizales. |

RESUMEN

ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN PASTIZALES MEDIANTE MÉTODOS TRADICIONALES Y USO DE DRONES EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA

POR:

I. E. IVÁN RUBÉN GRIJALVA GÓMEZ

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales

Secretaria de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

La biomasa aérea es un parámetro importante y su estimación correcta puede mejorar el monitoreo de pastizales. El objetivo fue evaluar tres métodos para estimar biomasa: UAV, ceptómetro y altura de dosel, comparados con cuadrante, en un pastizal amacollado arborescente del estado de Chihuahua. El estudio se realizó en Teseachi, Namiquipa, en octubre del 2020. Se localizaron 30 puntos al azar. El primer método fue con UAV. Una vez concluidos los vuelos, se colocó el cuadrante y se tomó su coordenada. Se tomaron 9 lecturas con ceptómetro y se obtuvo su promedio. Se midió la altura promedio de dosel. Se cortó todo el forraje dentro del cuadrante a ras de suelo y se empaquetó para su análisis en laboratorio. El procesamiento SfM de las imágenes aéreas fue con Agisoft Metashape. Se utilizaron 9 puntos del muestreo, se aplicó el índice de vegetación NGBDI y se calculó el promedio de los pixeles de una ventana móvil de 3 x 3 metros. Los datos se analizaron con un modelo de regresión lineal simple. Se utilizó el programa R Project, versión 4.0.3. El modelo de regresión lineal simple para UAV, ceptómetro y altura de dosel, mostró una R^2 de 0.62, 0.55

y 0.48 ($P < 0.01$; $P < 0.001$; $P < 0.001$), respectivamente. Los datos obtenidos de UAV, pueden generar mapas predictivos de biomasa con una precisión aceptable. El índice de área foliar del ceptómetro puede estimar, con una buena confiabilidad, el rendimiento de forraje. No es recomendable utilizar el método altura de dosel al estimar el rendimiento de forraje, ya que presentó una correlación débil.

Palabras clave: Monitoreo de pastizales, biomasa aérea, UAV, ceptómetro.

ABSTRACT

BIOMASS ESTIMATION IN GRASSLANDS THROUGH TRADITIONAL METHODS AND USE OF DRONES IN THE STATE OF CHIHUAHUA

BY:

IVÁN RUBÉN GRIJALVA GÓMEZ

Aboveground biomass is an important parameter and its correct estimation can improve grassland monitoring. The objective was to evaluate three methods to estimate biomass: UAV, ceptometer, and canopy height compared with quadrant, in an arborescent tufted grassland in the state of Chihuahua. The study was conducted in Teseachi, Namiquipa, in October 2020. 30 points were located at random. The first method was with UAV. Once the flights were completed, the quadrant was placed and its coordinate was taken. 9 readings were taken with a ceptometer and their average was obtained. Average canopy height was measured. All forage within the quadrant at ground level was cut and packed for laboratory analysis. The SfM processing of the aerial images was with Agisoft Metashape. 9 sampling points were used, the NGBDI vegetation index was applied and the average of the pixels of a 3 x 3 meter moving window was calculated. The data were analyzed with a simple linear regression model. The R Project program, version 4.0.3 was used. The simple linear regression model for UAV, ceptometer and canopy height, showed an R^2 of 0.62, 0.55 and 0.48 ($P < 0.01$; $P < 0.001$; $P < 0.001$), respectively. Data obtained from UAVs can generate biomass predictive maps with acceptable precision. The ceptometer leaf area index can estimate forage yield with good reliability. It is not advisable to use the

canopy height method when estimating forage yield, as it presented a weak correlation.

Keywords: Grassland monitoring, aerial biomass, UAV, ceptometer.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE GRÁFICAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Pastizales Naturales	3
Pastizales Amacollados Arborescentes.....	5
Importancia de la Biomasa Aérea.....	5
Métodos para Estimar Biomasa Aérea.....	7
Método del cuadrante.....	7
Método del ceptómetro.....	8
Método de altura de dosel.....	9
Método con vehículos aéreos no tripulados.....	9
MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
Vehículo Aéreo no Tripulado.....	13
Método del Ceptómetro.....	14
Método de Altura de Dosel.....	14
Método del Cuadrante.....	14
Análisis Estadístico.....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16

Vehículo Aéreo no Tripulado	16
Método del Ceptómetro	19
Método de Altura de Dosel	21
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
LITERATURA CITADA	24

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Asociación entre el índice de área foliar de dron y rendimiento de forraje en pastizal amacollado arborescente.....	18
2	Asociación entre el índice de área foliar de ceptómetro y rendimiento de forraje en pastizal amacollado arborescente.....	20
3	Asociación entre altura de dosel y rendimiento de forraje en pastizal amacollado arborescente.....	22

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Ortomosaico en composición RGB (R-Red-green-blue) en un pastizal amacollado arborescente	17

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de pastizales generan la mayor parte del forraje que necesita el ganado y brindan servicios ecosistémicos esenciales relacionados con la calidad del suelo, el balance hídrico, equilibrio atmosférico, entre otros. Además, son ricos en biodiversidad, que se reconoce como la base del funcionamiento de los ecosistemas (Stumpf *et al.*, 2020). La condición del pastizal se describe con la altura, la biomasa, el nivel de productividad, composición de especies y el cambio en cada uno de estos desde una etapa de registro anterior (Ali *et al.*, 2016). El monitoreo de los parámetros biofísicos del pastizal es importante para conocer su desarrollo y su relación con el ambiente y los sistemas de manejo (Acorsi *et al.*, 2019). La estimación de los parámetros, como la biomasa y la altura de las plantas, es fundamental para la predicción del rendimiento y la optimización del manejo del ecosistema. Sin embargo, las mediciones *in situ* pueden ser una tarea laboriosa y costosa (Castro *et al.*, 2020).

Las estimaciones de biomasa precisas y en tiempo real también permiten a los productores cumplir con los objetivos del plan de manejo, lo que resulta en una mejor utilización de los potreros, así como un aumento en las tasas de crecimiento de los pastos junto con la productividad general (Andersson *et al.*, 2017). Los avances en agricultura digital, junto con herramientas computacionales, vehículos aéreos no tripulados y cámaras multiespectrales, permiten adquirir datos como índices de vegetación y parámetros biofísicos de manera confiable (Dos Santos *et al.*, 2020). Aunque el alto precio de estos sensores impide que la tecnología de teledetección se aplique ampliamente, las

cámaras de tres bandas (RGB) son una herramienta económica de percepción remota para la observación continua (Fu *et al.*, 2021).

Otra opción son los sensores terrestres, que ofrecen una medición rápida y automatizada de datos de reflectancia espectral y parámetros de la planta, como la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el índice de área foliar (LAI), además, son útiles en combinación con satélites y otras observaciones de campo al monitorear variables tales como biomasa aérea, rendimiento agrícola, absorción de CO₂ y estrés hídrico (Sesnie *et al.*, 2018). Determinar la disponibilidad de biomasa es esencial para una planeación adecuada, ya que las estrategias plantean definir la capacidad de carga de los sistemas de pastoreo, el crecimiento del pasto, el valor nutricional, los regímenes de pastoreo y métodos de carga (Batistoti *et al.*, 2019). Es importante buscar prácticas de manejo adecuadas y generar estudios sobre estos ecosistemas (Bellocchi y Chabbi, 2020).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar tres métodos para estimar biomasa, comparar la precisión del método de drones, el método del ceptómetro y el método de altura de dosel con el del cuadrante y analizar los resultados en un pastizal amacollado arborescente del estado de Chihuahua.

REVISIÓN DE LITERATURA

Pastizales Naturales

Los pastizales son uno de los ecosistemas más dominantes y vastos, cubren aproximadamente el 31 % de la superficie terrestre mundial (Latham *et al.*, 2014). Las tierras destinadas al pastoreo cubren cerca del 70 % de la superficie terrestre a nivel mundial (Sankey *et al.*, 2019). Los pastizales son de los ecosistemas terrestres más extensos, continuamente son utilizados para la producción agropecuaria, presentan una gran diversidad, aunque se encuentran altamente en riesgo (Sala *et al.*, 2000; Olson *et al.*, 2001). Este tipo de vegetación cumple un papel importante en mantener la función del hábitat, especialmente en lugares donde no hay presencia de asociaciones arbóreas (Álvarez *et al.*, 2016).

Los pastizales ofrecen servicios ecosistémicos como la producción de forraje, el ciclo de nutrientes, captura de carbono, la regulación climática, la polinización, así como beneficios culturales (Layke *et al.*, 2012). Los pastizales naturales logran almacenar aproximadamente 45 toneladas de carbono por hectárea al año, superando lo fijado en matorrales, aunque representa la mitad en comparación a un bosque de coníferas (Paz *et al.*, 2009). Además, es importante destacar la capacidad de recarga de acuíferos en áreas de pastizales, ya que supera a bosques y matorrales (Keese *et al.*, 2005).

México posee más de 300,000 Km² de pastizales, que representa cerca del 16 % de la superficie total del país (Zermeño *et al.*, 2011). El desierto Chihuahuense es una de las regiones áridas con mayor biodiversidad. Los endemismos de cactáceas y peces destacan a nivel mundial (Dinerstein *et al.*, 2000). Además, aproximadamente el 90% de las aves de pastizales de América

del Norte llevan todo o parte de su ciclo de vida en esta región, lo que muestra la importancia de este tipo de vegetación (PMARP, 2012).

Sin embargo, actividades humanas como la ganadería, el desarrollo agrícola y la urbanización resultan en la modificación y degradación de estos sistemas, lo que disminuye su capacidad para sostener su función ecológica y así brindar servicios en el futuro (Mendez *et al.*, 2016). La mayor parte de la superficie de pastizales naturales en México presenta una condición de regular a pobre, ya que el sobrepastoreo no permite el desarrollo y la proliferación de las especies más nutritivas y preferidas por el ganado, lo que conlleva al establecimiento de plantas indeseables, invasoras y tóxicas. Esto a su vez, reduce la cobertura vegetal, lo que compromete al suelo a la erosión (Rzedowski, 2006). El cambio de uso de suelo para mejorar el potencial agrícola, resultó en la alteración de los principales ecosistemas en el mundo. El desierto Chihuahuense ha sido modificado a causa de la fragmentación del hábitat, principalmente por actividades agropecuarias como el pastoreo a gran escala (De León Mata *et al.*, 2014).

La degradación de los pastizales propicia la disminución de fertilidad en el suelo. Además, compromete la productividad del ganado y provoca grandes pérdidas económicas (Padilla *et al.*, 2009) También, alteraciones como los incendios y el sobrepastoreo, promueven la invasión de especies exóticas, lo que puede ocasionar la disminución en la cobertura de especies nativas deseables (Hobbs y Huenneke, 1992).

La ganadería es el principal uso de la tierra a nivel mundial. Esta actividad puede alterar tanto la biodiversidad como el funcionamiento de los ecosistemas

(Wang *et al.*, 2019). La calidad del pastizal dentro de los potreros es muy variable durante la temporada de crecimiento, debido a las diferencias en la composición de especies, madurez de la pradera, tipo de suelo y topografía, así como a factores climáticos (Pullanagari *et al.*, 2012). El crecimiento del pasto, así como la alimentación del ganado en pastizales, requiere un monitoreo constante para asegurar niveles consistentes de producción (Safari *et al.*, 2016).

Pastizales Amacollados Arborescentes

Esta comunidad vegetal se compone de dos estratos, uno herbáceo, principalmente por gramíneas grandes de hábito amacollado y por árboles de talla baja (3 a 7 metros de altura), de hoja latifoliada y caduca o bien, árboles con hojas aciculares o escamosas y perennes, que se presentan en áreas de transición de pastizal a bosque. La topografía del terreno es de lomeríos altos y medianos, laderas de pendiente que varía de 15 a 30 %. Las principales especies de árboles son del género *Quercus*, táscate (*Juniperus monosperma*) y pino piñonero (*Pinus cembroides*). Las especies de gramíneas que lo caracterizan son: banderita (*Bouteloua curtipendula*), navajita velluda (*B. hirsuta*), navajita negra (*B. eriopoda*), navajita china (*B. breviseta*) y navajita roja (*B. trifida*; COTECOCA, 1978; Rzedowski, 2006; PMARP, 2012).

Importancia de la Biomasa Aérea

El ecosistema pastizal se utiliza a menudo para generar biomasa. La producción de biomasa está influenciada por el clima y la biodiversidad; sin embargo, la importancia relativa de estos dos factores con relación al manejo no ha sido ampliamente estudiada (Bernhardt-Römermann *et al.*, 2011). La biomasa aérea es un parámetro comúnmente utilizado para la evaluación de los sistemas

pastoriles. La medición precisa y objetiva de la biomasa en los pastizales es un requisito clave para que los productores mejoren la productividad del sistema de pastoreo, lo que permite a los ganaderos compensar mejor los requisitos de alimentación de su ganado (Westwood, 2008).

La biomasa aérea refleja el crecimiento de las plantas y se relaciona con la capacidad de aprovechar la energía solar, el rendimiento productivo, así como la calidad de semilla (Hensgen *et al.*, 2016). La estimación de la biomasa de los pastizales se puede utilizar para monitorear el hábitat de la vida silvestre, el almacenamiento de carbono y la biodiversidad. Además, se puede utilizar como un índice importante para monitorear el impacto del cambio climático y la actividad humana a corto y largo plazo (Schulze-Brüninghoff *et al.*, 2019).

Por lo tanto, la biomasa aérea es uno de los parámetros más importantes y su estimación apropiada puede mejorar el monitoreo de pastizales, además de la predicción del rendimiento (Campos *et al.*, 2016). La estimación de biomasa aérea también es importante para la investigación ecológica a escala regional y global (Yue *et al.*, 2017). Se ha demostrado que los rendimientos de biomasa son más altos a frecuencias de corte intermedias, sin embargo, las interacciones entre la intensidad de la perturbación y la productividad del ecosistema determinan fuertemente la producción de biomasa (Kondoh, 2001). Si la productividad es alta, se favorecen los competidores fuertes; si la perturbación es alta, los buenos colonizadores aumentan en frecuencia. Con alta perturbación y baja productividad, los competidores fuertes no pueden sobrevivir. Si la perturbación disminuye y la productividad aumenta, los competidores fuertes superan a los buenos colonizadores (Bernhardt-Römermann *et al.*, 2011).

Estimar la biomasa aérea en este tipo de vegetación genera información sobre su potencial productivo, también es útil para sus manejadores, al facilitarles tomar decisiones sobre el coeficiente de agostadero, el sistema de pastoreo y aplicación de fertilizantes en el caso de praderas irrigadas (Behrendt *et al.*, 2013). A nivel de bioma, la productividad del ecosistema es predecible a partir de la temperatura y la precipitación (Knapp y Smith, 2001). A escala local o de parcela, tales modelos no pueden explicar muy bien la variabilidad de la biomasa, por lo que se emplean métodos simples para estimar biomasa aérea a través de la medición de las propiedades biofísicas de la planta, como el índice de área foliar (LAI) o la altura de la planta (Lauenroth y Sala, 2016; Crabbe *et al.*, 2019).

Métodos para Estimar Biomasa Aérea

Históricamente, el monitoreo de los pastizales se ha basado en gran medida en mediciones de campo, que pueden verse afectadas por la variabilidad en las estimaciones subjetivas y el sesgo introducido por diferentes equipos y personal a lo largo del tiempo (Sankey *et al.*, 2019). El monitoreo generalmente ocurre en un grupo de ubicaciones muestra, o áreas clave, seleccionadas por su potencial para representar la utilización en unidades de manejo de potreros y paisajes más grandes. Sin embargo, la utilización puede variar mucho en un potrero debido a la preferencia del ganado por especies forrajeras específicas, barreras del terreno, exposición al sol y distancia al agua (Bailey *et al.*, 1996).

Método del cuadrante.

Las mediciones tradicionales de biomasa aérea generalmente se basan en la cosecha de plantas del campo. Este enfoque consume mucho tiempo, requiere mucha mano de obra y no puede proporcionar estimaciones en tiempo

real (Tong *et al.*, 2019). Los métodos directos son los más precisos, aunque tienen la desventaja de ser lentos y en consecuencia, es difícil de implementar a gran escala. Sin embargo, la necesidad de validación de métodos indirectos es necesario, por lo que las técnicas directas también son importantes por su utilidad como métodos de calibración (Jonckheere *et al.*, 2004).

Método del ceptómetro.

En los últimos años aumentó la aplicación de métodos para estimar la biomasa de manera no destructiva, para permitir el monitoreo de la producción primaria neta aérea durante todo el año (Pätzig *et al.*, 2020). Los métodos no destructivos para la estimación de la biomasa aérea tienen varias ventajas sobre los métodos destructivos, particularmente para áreas extensas (Gouraud *et al.*, 2008; Wijesingha *et al.*, 2019). El muestreo destructivo solo da un cálculo del índice de área foliar de una comunidad de plantas dada e interrumpe el sistema donde se realiza la muestra, con efectos ecológicos y económicos potencialmente perjudiciales. La determinación indirecta de índice de área foliar se puede lograr al relacionar la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel, sin la necesidad de cosechar (Johnson *et al.*, 2010). El ceptómetro estima el índice de área foliar a partir de un parámetro de distribución del ángulo de la hoja y de las lecturas del dosel superior e inferior de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), para estimar la fracción de espacio de acuerdo con el modelo de transmisión de luz (Francone *et al.*, 2014). El índice de área foliar (LAI), es una de las variables agronómicas que resume la complejidad generada por la combinación de factores que influyen en la estructura de las

plantas. Está fuertemente relacionada por todas las interacciones entre el genotipo y los factores ambientales (Soltani y Galeshi, 2002).

Las ecuaciones requeridas para convertir el índice de área foliar en biomasa pueden variar según el país, el año, la temporada y tipo de pasto. Por lo tanto, la predicción precisa de biomasa, requiere que se utilice la ecuación de conversión específica regional, estacional y de forraje. Para el uso práctico en campo, los operadores tienden a usar una ecuación, con coeficientes constantes, para toda la temporada de pastoreo. Este enfoque puede llevar a una predicción inexacta de la biomasa disponible (Punalekar *et al.*, 2018).

Método de altura de dosel.

La biomasa de gramíneas tiene una fuerte correlación con la altura del dosel. Por tanto, la altura de la hierba es un parámetro de interés para gestionar el pastoreo y la recolección del ensilado (Cunliffe *et al.*, 2016). Las estimaciones precisas de las variables biofísicas del pasto son importantes para monitorear parámetros fisiológicos importantes durante el ciclo de crecimiento del pasto (Virkajärvi y Järvenranta, 2001). En la gestión del pastoreo rotacional, las mediciones físicas de la altura de la hierba y la estimación de la biomasa se suelen realizar mediante el uso de dispositivos como el medidor de placa ascendente y la varilla de medición (Viljanen *et al.*, 2018).

Método con vehículos aéreos no tripulados.

La percepción remota creció aceleradamente en los últimos 20 años. Estos estudios analizan la relación que hay entre sí de los patrones espaciales y los procesos ecológicos (De León Mata *et al.*, 2014). Las imágenes que se obtienen

por satélite son de gran utilidad ya que permiten monitorear grandes superficies (Sanches *et al.*, 2018).

Desde el surgimiento de la fotografía digital, los sensores de imagen ópticos en el aire están sujetos a una rápida mejora en la resolución. En consecuencia, las metodologías innovadoras y los resultados de estudios que utilizan imágenes de muy alta resolución, serán aplicables a los procesos de monitoreo en un futuro muy cercano (Getzin *et al.*, 2012). Los sistemas aéreos no tripulados (UAS) son robots voladores preprogramados formados por un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y un sistema de control en tierra. Los UAS ahora son diseñados para uso geomático y ofrecen muchas oportunidades en el área de las ciencias ambientales (Watts *et al.*, 2012).

Con la llegada de vehículos aéreos no tripulados baratos y prácticos, los datos de detección remota a altas resoluciones espaciales y temporales se han vuelto cada vez más asequibles (Geipel *et al.*, 2014). Para vincular los monitoreos terrestres y los datos satelitales, se introdujeron los vehículos aéreos no tripulados que proporcionan una resolución espacial a nivel de centímetro y una resolución temporal flexible (Mao *et al.*, 2021). Los vehículos aéreos no tripulados combinados con sensores digitales de alta resolución, la fotogrametría y algoritmos de estructura a partir de movimiento (SfM), son plataformas prometedoras para obtener información sobre la vegetación en campo debido a su bajo costo, alta flexibilidad y alta resolución espacial (Xie *et al.*, 2021). La resolución espacial de las imágenes UAS puede alcanzar una distancia de muestra de suelo por debajo del decímetro, y el período de revisión entre dos

adquisiciones se puede seleccionar para adaptarse a diversas escalas de fenómenos ecológicos (Lisein *et al.*, 2013).

Aunque las imágenes de UAS no cubren las grandes extensiones de los satélites o aeronaves tripuladas, superan la superficie cubierta por la mayoría de los monitoreos terrestres. Estas herramientas y las imágenes que generan tienen el potencial de proveer información con respecto al forraje disponible para el ganado y la vida silvestre (Gillan *et al.*, 2019). Las plataformas de percepción remota, como los UAV's, son excelentes herramientas para buscar datos de biomasa, que permiten que los productores obtengan información sobre las condiciones del campo, como el contenido de humedad del suelo, el índice de área foliar, el estado de los nutrientes, la salud del cultivo, el vigor, la etapa de crecimiento, el índice de estrés, entre otros que finalmente determinan el rendimiento y calidad (Enciso *et al.*, 2019).

Los aviones UAV pueden tener cámara RGB, escáneres láser y cámaras multiespectrales. Las ventajas del UAV son datos de alta resolución y alta densidad, flexibilidad, observación de alta frecuencia, bajo costo y seguridad (Kameyama y Sugiura, 2021). Las cámaras RGB y el procesamiento de imágenes se han utilizado para varios fines de investigación y aplicación agrícolas ya que pueden combinar la información de profundidad con la escena de color en una sola toma (Rueda-Ayala *et al.*, 2019).

En imágenes de color rojo-verde-azul (RGB), cada píxel se define con la combinación de bandas R, G y B. El índice de vegetación calculado a partir de imágenes RGB se utiliza para medir el contenido de clorofila de las hojas. Por lo tanto, las cámaras RGB a bordo de los UAV permiten monitorear las condiciones

de crecimiento al utilizar un índice de vegetación para aplicaciones agrícolas y ecológicas (Guo *et al.*, 2020). Los índices de vegetación minimizan los factores distorsionantes, como el suelo, la irradiancia solar, el ángulo del sol y la atmósfera misma (García *et al.*, 2021). Las cámaras rojo-verde-azul (RGB) son más baratas en comparación con sensores multiespectrales y pueden generar resultados de calidad para generar modelos de superficie de cultivo, ortomosaico y modelos digitales de elevación (MDE). Asimismo, con índices de vegetación, derivados de imágenes RGB, tienen un potencial similar que las imágenes capturadas con sensores avanzados. Estos índices se pueden correlacionar con el crecimiento y desarrollo de las plantas como altura del dosel, densidad, el índice de área foliar, biomasa y el rendimiento (Sumesh *et al.*, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un pastizal amacollado arborescente, en el rancho Teseachi, Namiquipa, en octubre del 2020 al final de la etapa de crecimiento del pastizal. Se localizaron 30 puntos al azar, separados a 50 metros, donde se llevaron a cabo los métodos de muestreo. El primer método de muestreo se realizó con el vehículo aéreo no tripulado (dron). Una vez concluidos los vuelos del dron, se colocó el cuadrante de 1 m² en cada punto y se tomó su coordenada. Se realizó el muestreo con el ceptómetro, se tomaron 9 lecturas dentro del cuadrante y se obtuvo el promedio. Posteriormente se midió la altura promedio de dosel dentro del cuadrante. Finalmente, el muestreo del cuadrante, donde se cortó todo el forraje dentro del cuadrante a ras de suelo y se empaquetó para su análisis en laboratorio. El muestreo con el cuadrante fue el método testigo, para su comparación.

Vehículo Aéreo no Tripulado

Las imágenes se obtuvieron a una altitud de vuelo de 100 m, se cubrió un total de 40 hectáreas, aproximadamente. Se usó un Dron DJI Phantom 4 profesional, de cuatro hélices, con una cámara 4k integrada, que tiene un ángulo de vista de 94°, con un lente de apertura de f/2.8 y un tamaño máximo de imagen de 4000 x 3000 pixeles. Para el procesamiento SfM de las imágenes aéreas se usó el software Agisoft Metashape.

Después de obtener la información de biomasa, se utilizaron 9 puntos del muestreo, se asoció a la coordenada de los sitios y se obtuvieron los valores digitales del ortomosaico generado. Se aplicó el índice de vegetación NGBDI (Normalized Green-Blue Difference Index) y se calculó el promedio de todos los

pixeles que ocuparon la parcela en una ventana móvil de 3 x 3 metros. El NGBDI es una relación normalizada de la diferencia entre la banda verde y la banda azul. La fórmula es la siguiente: $NGBDI = (G-B) / (G+B)$.

Método del Ceptómetro

El método para medir PAR fraccional (radiación fotosintéticamente activa) fue con el ceptómetro ACCUPAR LP-80. Aparato provisto con 80 sensores para radiación con banda en onda de 400 a 700 nanómetros (espectro), que de acuerdo a un índice de área foliar (IAF), calculó la disponibilidad de forraje en ese momento. Se tomaron nueve lecturas y se obtuvo un promedio de IAF en cada sitio de muestreo. El ceptómetro se calibró antes de cada punto de muestreo. Este muestreo es una forma de determinar el crecimiento del dosel y la intercepción de la luz del dosel, junto con el cálculo de la intercepción fraccional. La metodología está mayormente automatizada, ya que mide la radiación fotosintéticamente activa que incide en la varilla de medición. Además de automatizar la medición, los datos también se recopilan y almacenan automáticamente.

Método de Altura de Dosel

Se tomaron mediciones manuales de la altura del dosel del pasto dentro del cuadrante. Se realizó con una regla con una precisión de 0.01 m. La altura se definió como la distancia vertical desde la superficie del suelo hasta el punto promedio del dosel que tocaba la regla.

Método del Cuadrante

Este método es el más utilizado y se obtienen muestreos más homogéneos para medir la biomasa. Se utilizaron cuadrantes de 1 m² (1.25 m x

.8 m), la biomasa aérea dentro de los cuadrantes fue cortada con una oz y colectada en bolsas de papel, las cuales fueron marcadas y registradas sus coordenadas. Posteriormente, el contenido de las bolsas se secó en estufas durante 72 horas a 70°C para obtener los valores de peso seco en gramos por metro cuadrado y kilogramos de materia seca por hectárea (gr/m^2 y kg MS ha^{-1}) de cada sitio.

Análisis Estadístico

Los datos de los muestreos se analizaron para cuantificar la intensidad de la asociación lineal entre dos variables, a través de un modelo de regresión lineal simple. Para los procedimientos se utilizó el programa de acceso libre R Project, versión 4.0.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Vehículo Aéreo no Tripulado

Se obtuvo el ortomosaico de las imágenes capturadas por el UAV, la Figura 1 muestra la composición en falso color (RGB) del área de estudio de pastizal amacollado arborescente. Así mismo, el modelo de regresión lineal simple entre las variables de biomasa versus los datos espectrales del Dron, mostró una relación significativa con la biomasa del pastizal amacollado arborescente; mientras que el modelo de regresión lineal simple arrojó un valor de R^2 de 0.62 ($P < 0.01$; Gráfica 1), lo que coincide con los valores reportados por Gruner *et al.*, (2019), al realizar una predicción de biomasa de pastizales templados heterogéneos con un enfoque SfM basado en imágenes de UAV, presentaron una R^2 de 0.56 y 0.7. Posteriormente, Gruner *et al.*, (2020) evaluaron el potencial de la información espectral y de textura transmitida por UAV para predecir la biomasa aérea y la fijación de Nitrógeno en mezclas de leguminosas y gramíneas, con lo que obtuvieron una R^2 de 0.55 a 0.76.

Lussem *et al.*, (2019) realizaron una estimación de la biomasa en pastizales templados con modelos de superficie de dosel de alta resolución a partir de imágenes RGB e índices de vegetación basados en UAV, donde presentaron resultados de R^2 de 0.57 a 0.73. Valores que concuerdan con los obtenidos para el presente estudio. Gracia-Romero *et al.*, (2019) realizaron un fenotipado basado en imágenes terrestres y UAV. Niu *et al.*, (2019), llevaron a cabo una estimación de la biomasa aérea del maíz al utilizar características derivadas de imágenes RGB basadas en UAV, ambos con modelos de regresión lineal simple y reportaron R^2 de 0.88 y 0.94 y de 0.63 a 0.73, respectivamente.

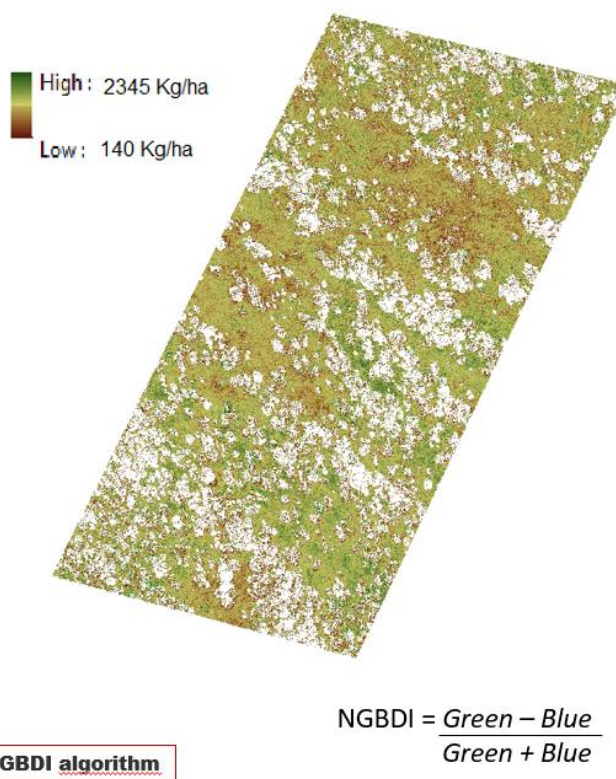
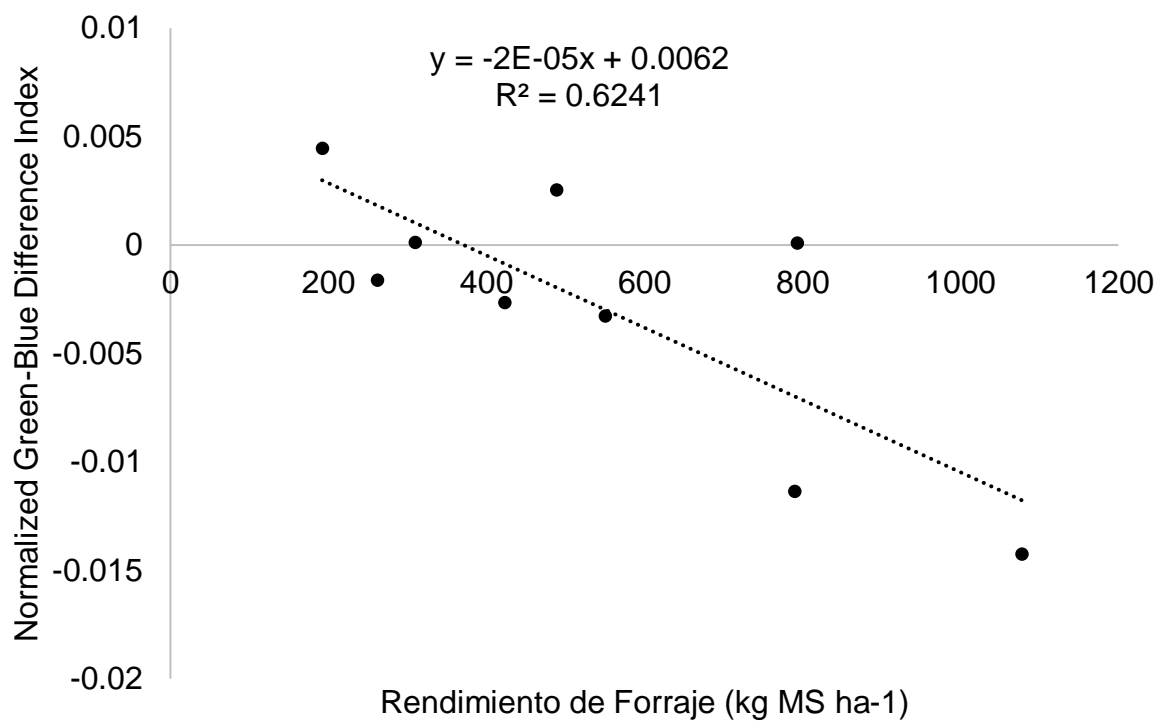


Figura 1. Ortomosaico en composición RGB (R-Red-green-blue) en pastizal amacollado arborescente.



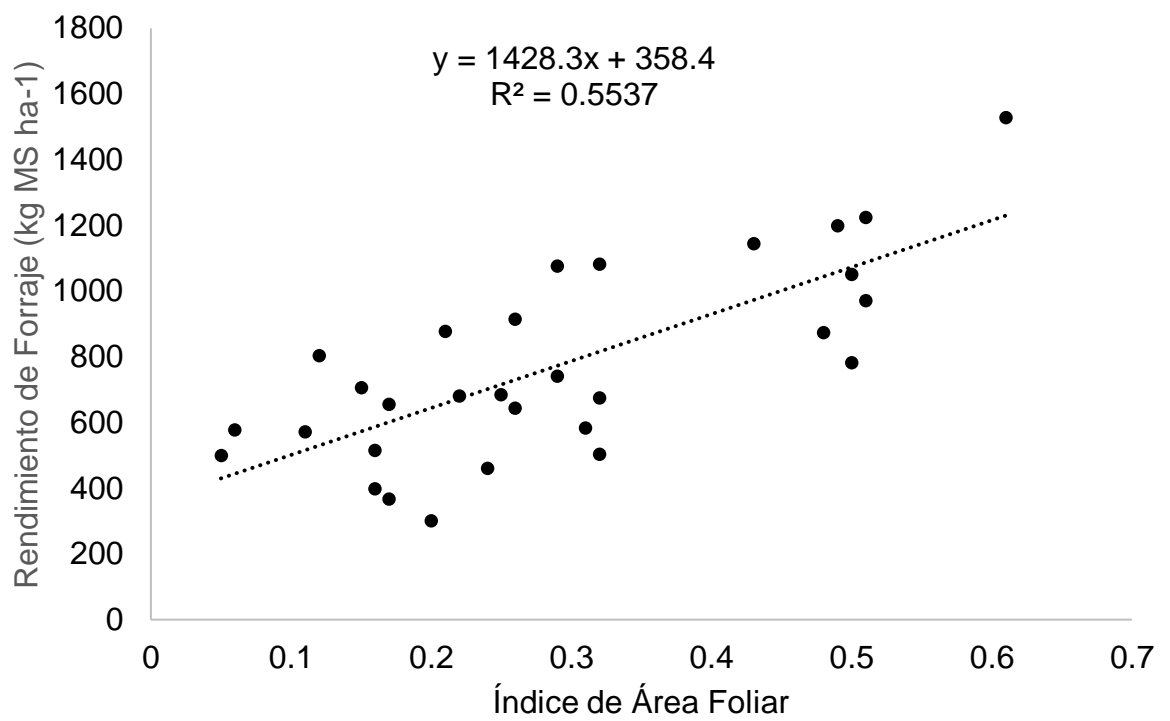
Gráfica 1. Regresión lineal simple entre el índice de área foliar de dron y rendimiento de forraje en pastizal amacollado arborescente.

También, en una estimación de la biomasa del forraje y la cobertura vegetal en pastizales con imágenes de UAV, Théau *et al.*, (2021) obtuvieron una R^2 de 0.94. Zhang *et al.*, (2018) estimaron la altura del dosel de los pastizales y la biomasa aérea a escala cuadrática mediante un vehículo aéreo no tripulado, con resultados que mostraron una R^2 0.89. Al efectuar una evaluación de modelos 3D basados en nubes de puntos para la predicción de biomasa de pastizales, Wijesingha *et al.*, (2019) obtuvieron una R^2 de 0.63.

Método del Ceptómetro

El modelo de regresión lineal simple mostró una asociación significativa ($P < 0.001$) entre el índice de área foliar y rendimiento de forraje en los muestreos del pastizal amacollado arborescente; con un grado de asociación positiva, una R^2 de 0.55 (Gráfica 2), valor por debajo a lo que presentó Hamar *et al.*, (2006) y por debajo de la R^2 de Lu *et al.*, (2021) que presentaron valores superiores a 0.75 al estimar las propiedades espectrales y biofísicas de la vegetación fotosintética y no fotosintética en pastizales mixtos. Klingler *et al.*, (2020), presentaron una R^2 de 0.87 en una comparación de la determinación directa e indirecta del índice de área foliar en pastizales permanentes.

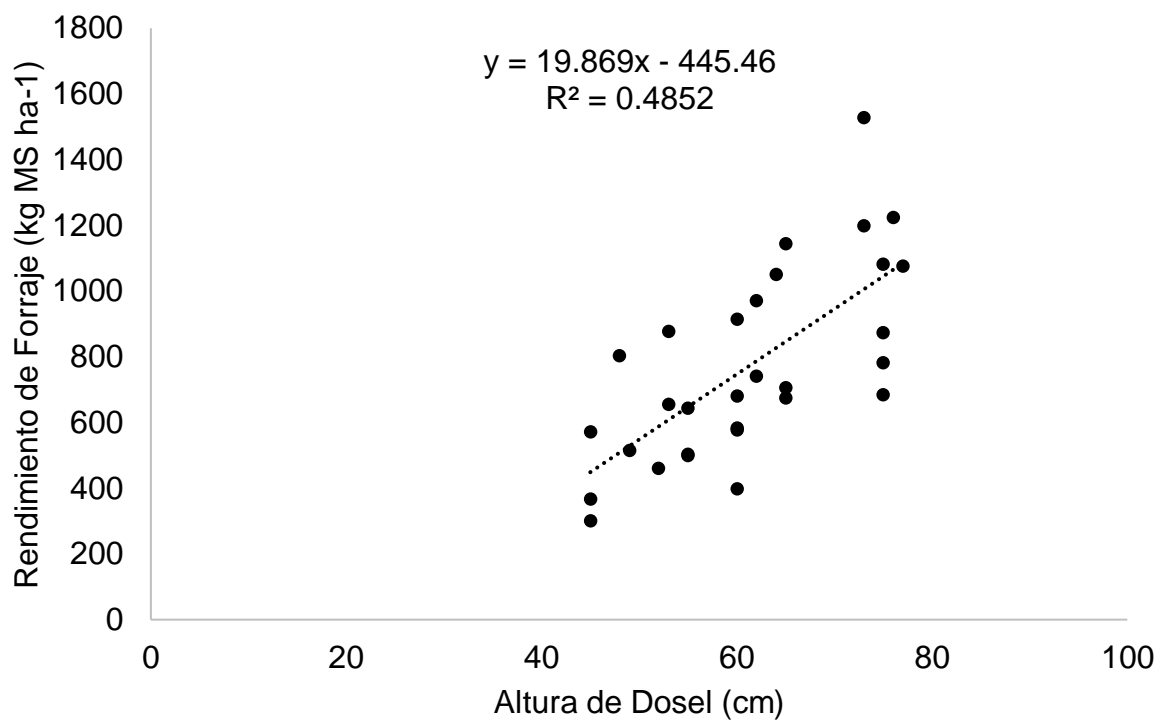
Al realizar una evaluación del índice de área foliar para el período de crecimiento de cultivos, Mamun Hossain *et al.*, (2017) obtuvieron valores de R^2 de 0.7 a 0.95. Ruggieri *et al.*, (2013), evaluaron el comportamiento del pastoreo en pastizales, al medir el índice de área foliar obtuvieron una R^2 de 0.91. Por su parte, Xu *et al.*, (2018), cuantificaron las influencias del pastoreo, el clima y sus interacciones en los pastizales y presentaron una R^2 de 0.66.



Gráfica 2. Regresión lineal simple entre el índice de área foliar de ceptómetro y rendimiento de forraje en pastizal amacollado arborescente.

Método de Altura de Dosel

El modelo de regresión lineal simple mostró una asociación significativa ($P < 0.001$) entre la altura de dosel y rendimiento de forraje en los muestreos del pastizal amacollado arborescente. El modelo de regresión lineal simple presentó una R^2 de 0.48 (Gráfica 3). Valor similar a lo presentado por Gruner *et al.*, (2019), donde realizaron una predicción de biomasa de pastizales templados heterogéneos con un enfoque SfM basado en imágenes de UAV, donde la relación lineal para la altura de planta en tratamientos de pasto puro mostró una R^2 menor de 0.47. Es importante considerar que, en general, una correlación es baja por debajo de 0.30 en valor absoluto, existe una asociación moderada entre 0.30 y 0.70 y alta por encima de 0.70.



Gráfica 3. Regresión lineal simple entre altura de dosel y rendimiento de forraje en pastizal amacollado arborescente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los datos obtenidos de UAV, relacionados con variables de campo de pastizales amacollados arborescentes del estado de Chihuahua, mediante el procesamiento de imágenes con un enfoque SfM pueden generar mapas predictivos de biomasa con un nivel de precisión aceptable.

Se considera que el índice de área foliar adquirido con ceptómetro puede estimar, con una buena confiabilidad y un margen de error aceptable, el rendimiento de forraje en pastizales amacollados arborescentes del estado de Chihuahua. Esta variable está fuertemente relacionada y es posible estimar la producción de biomasa.

De manera contraria, se considera que, bajo las condiciones del presente estudio, no es recomendable utilizar el método mediante la variable altura de dosel al estimar el rendimiento de forraje, ya que presentó una asociación lineal débil, en un pastizal amacollado arborescente del estado de Chihuahua.

LITERATURA CITADA

- Acorsi, M. G., F. das D. Abati Miranda, M. Martello, D. A. Smaniotto y L. R. Sartor. 2019. Estimating biomass of black oat using UAV-based RGB imaging. *Agronomy*. 9:1–14.
- Ali, I., F. Cawkwell, E. Dwyer, B. Barrett y S. Green. 2016. Satellite remote sensing of grasslands: From observation to management. *J. Plant Ecol.* 9:649–671.
- Álvarez, J., I. V. Rivas-Manzano, L. I. Aguilera-Gómez y M. González-Ledesma. 2016. Diversidad y estructura de un pastizal en El Cerrillo, Piedras Blancas, Estado de México, México. *Rev. Mex. Biodivers.* 87:980-989.
- Andersson, K., M. Trotter, A. Robson, D. Schneider, L. Frizell, A. Saint, D. Lamb y C. Blore. 2017. Estimating pasture biomass with active optical sensors. *Adv. Anim. Biosci.* 8:754–757.
- Bailey, D. W., J. E. Gross, E. A. Laca, L. R. Rittenhouse, M. B. Coughenour, D. M. Swift y P. L. Sims. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *J. Range Manag.* 49:386–400.
- Batistoti, J., J. Marcato, L. Ítavo, E. Matsubara, E. Gomes, B. Oliveira, M. Souza, H. Siqueira, G. S. Filho, T. Akiyama, W. Gonçalves, V. Liesenberg, J. Li y A. Dias. 2019. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian Savanna using UAV photogrammetry. *Remote Sens.* 11:1–12.
- Behrendt, K., O. Cacho, J. M. Scott y R. Jones. 2013. Optimising pasture and grazing management decisions on the Cicerone Project farmlets over variable time horizons. *Anim. Prod. Sci.* 53:796–805.
- Bellocchi, G. y A. Chabbi. 2020. Grassland management for sustainable agroecosystems. *Agronomy*. 10:3–7.
- Bernhardt-Römermann, M., C. Römermann, S. Sperlich y W. Schmidt. 2011. Explaining grassland biomass - the contribution of climate, species and functional diversity depends on fertilization and mowing frequency. *J. Appl. Ecol.* 48:1088-1097.
- Campos, M., F. J. García, G. Camps, G. Grau, F. Nutini, A. Crema y M. Boschetti. 2016. Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring. *Remote Sens. Environ.* 187:102–118.
- Castro, W., J. M. Junior, C. Polidoro, L. P. Osco, W. Gonçalves, L. Rodrigues, M. Santos, L. Jank, S. Barrios, C. Valle, R. Simeão, C. Carromeu, E. Silveira,

- L. A. de Castro y E. Matsubara. 2020. Deep learning applied to phenotyping of biomass in forages with uav-based rgb imagery. *Sensors* (Switzerland). 20:1–18.
- COTECOCA. 1978. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaria de Ganadería. Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero. Mexico, D.F. 151 p.
- Crabbe, R. A., D. W. Lamb, C. Edwards, K. Andersson y D. Schneider. 2019. A preliminary investigation of the potential of Sentinel-1 radar to estimate pasture biomass in a grazed pasture landscape. *Remote Sens.* 11(7), 872.
- Cunliffe, A. M., R. E. Brazier y K. Anderson. 2016. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sens. Environ.* 183:129–143.
- De León Mata, G. D., A. Pinedo Álvarez y J. H. Martínez Guerrero. 2014. Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investig. Geogr.* 84:42–53.
- Dinerstein, E., D. Olson, J. Atchley, C. Loucks, S. Contreras-Balderas, R. Abell, E. Iñigo, E. Enkerlin, C. Williams y G. Castilleja. 2000. Ecoregion-based conservation in the Chihuahuan Desert: A biological assessment. WWF, ITESM, CONABIO y PRONATURA. Washington, DC. 122 p.
- Dos Santos, L. M., G. A. S. Ferraz, B. D. de S. Barbosa, A. V. Diotto, D. T. Maciel y L. A. G. Xavier. 2020. Biophysical parameters of coffee crop estimated by UAV RGB images. *Precis. Agric.* 21:1227–1241.
- Enciso, J., C. A. Avila, J. Jung, S. Elsayed-Farag, A. Chang, J. Yeom, J. Landivar, M. Maeda y J. C. Chavez. 2019. Validation of agronomic UAV and field measurements for tomato varieties. *Comput. Electron. Agric.* 158:278–283.
- Francone, C., V. Pagani, M. Foi, G. Cappelli y R. Confalonieri. 2014. Comparison of leaf area index estimates by ceptometer and PocketLAI smart app in canopies with different structures. *F. Crop. Res.* 155:38–41.
- Fu, H., C. Wang, G. Cui, W. She y L. Zhao. 2021. Ramie yield estimation based on UAV RGB images. *Sensors* (Switzerland). 21:1–12.
- García, M., E. Sanz Ablanado y J. R. Rodríguez Pérez. 2021. High-resolution drone-acquired RGB imagery to estimate spatial grape quality variability. *Agronomy.* 11.

- Geipel, J., J. Link y W. Claupein. 2014. Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sens.* 6:10335-10355.
- Getzin, S., K. Wiegand y I. Schöning. 2012. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods Ecol. Evol.* 3:397-404.
- Gillan, J. K., M. P. McClaran, T. L. Swetnam y P. Heilman. 2019. Estimating forage utilization with drone-based photogrammetric point clouds. *Rangel. Ecol. Manag.* 72:575–585.
- Gouraud, C., J. F. Giroux, F. Mesléard y L. Desnouhes. 2008. Non-destructive sampling of *Schoenoplectus maritimus* in Southern France. *Wetlands.* 28:532-537.
- Gracia-Romero, A., S. C. Kefauver, J. A. Fernandez, O. Vergara, M. T. Nieto y J. L. Araus. 2019. UAV and ground image-based phenotyping: a proof of concept with Durum wheat. *Remote Sensing*, 11(10), 1244.
- Grüner, E., T. Astor y M. Wachendorf. 2019. Biomass prediction of heterogeneous temperate grasslands using an SFM approach based on UAV imaging. *Agronomy.* 9.
- Grüner, E., M. Wachendorf y T. Astor. 2020. The potential of UAV-borne spectral and textural information for predicting aboveground biomass and N fixation in legume-grass mixtures. *PLoS One.* 15:1–21.
- Guo, Y., G. Yin, H. Sun, H. Wang, S. Chen, J. Senthilnath, J. Wang y Y. Fu. 2020. Scaling effects on chlorophyll content estimations with RGB camera mounted on a UAV platform using machine-learning methods. *Sensors (Switzerland).* 20:1–22.
- Hamar, M., M. White, C. Lauver y S. Garman. 2006. Interpreting 250m Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Vegetation Indices in the Colorado Plateau, USA. *AGU Fall Meeting Abstracts.* (31), 1081.
- Hensgen, F., L. Bühle y M. Wachendorf. 2016. The effect of harvest, mulching and low-dose fertilization of liquid digestate on above ground biomass yield and diversity of lower mountain semi-natural grasslands. *Agric. Ecosyst. Environ.* 216:283–292.
- Hobbs, R. J. y L. F. Huenneke. 1992. Disturbance, Diversity, and Invasion: Implications for Conservation. *Conserv. Biol.* 6:324-337.

- Johnson, M. V. V., J. R. Kiniry y B. L. Burson. 2010. Ceptometer deployment method affects measurement of fraction of intercepted photosynthetically active radiation. *Agron. J.* 102:1132–1137.
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss y F. Baret. 2004. Review of methods for *in situ* leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 121:19-35.
- Kameyama, S. y K. Sugiura. 2021. Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sens.* 13:1–22.
- Keese, K. E., B. R. Scanlon y R. C. Reedy. 2005. Assessing controls on diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling. *Water Resour. Res.* 41:1-12.
- Klingler, A., A. Schaumberger, F. Vuolo, L. B. Kalmár y E. M. Pötsch. 2020. Comparison of Direct and Indirect Determination of Leaf Area Index in Permanent Grassland. *PFG - J. Photogramm. Remote Sens. Geoinf. Sci.*
- Knapp, A. K. y M. D. Smith. 2001. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science.* 291:481-484.
- Kondoh, M. 2001. Unifying the relationships of species richness to productivity and disturbance. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 268:269-271.
- Latham, J., R. Cumani, I. Rosati y M. Bloise. 2014. Global Land Cover Share (GLC-SHARE) Database Beta-Release Version 1.0-2014; FAO: Rome, Italy.
- Lauenroth, A. W. K. y O. E. Sala. 2016. Long-term forage production. *Ecological Applications*, Vol. 2, No. 4, pp. 397-403.
- Layke, C., A. Mapendembe, C. Brown, M. Walpole y J. Winn. 2012. Indicators from the global and sub-global Millennium Ecosystem Assessments: An analysis and next steps. *Ecol. Indic.* 17:77–87.
- Lisein, J., M. Pierrot-Deseilligny, S. Bonnet y P. Lejeune. 2013. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests.* 4:922-944.
- Lu, B., C. Proctor y Y. He. 2021. Investigating different versions of PROSPECT and PROSAIL for estimating spectral and biophysical properties of photosynthetic and non-photosynthetic vegetation in mixed grasslands. *GIScience & Remote Sens.* 58:3, 354-371.

- Lussem, U., A. Bolten, J. Menne, M. L. Gnyp, J. Schellberg y G. Bareth. 2019. Estimating biomass in temperate grassland with high resolution canopy surface models from UAV-based RGB images and vegetation indices. *J. Appl. Remote Sens.* 13:1.
- Mamun-Hossain, S. A., L. Wang, T. Chen y Z. Li. 2017. Leaf area index assessment for tomato and cucumber growing period under different water treatments. *Plant, Soil Environ.* 63:461–467.
- Mao, P., L. Qin, M. Hao, W. Zhao, J. Luo, X. Qiu, L. Xu, Y. Xiong, Y. Ran, C. Yan y G. Y. Qiu. 2021. An improved approach to estimate above-ground volume and biomass of desert shrub communities based on UAV RGB images. *Ecol. Indic.* 125:107494.
- Mendez, R., J. R. Romo, A. E. Castellanos, F. J. Gandarilla y K. Hartfield. 2016. Analyzing landscape trends on agriculture, introduced exotic grasslands and riparian ecosystems in arid regions of Mexico. *Remote Sens.* 8(8), 664.
- Niu, Y., L. Zhang, H. Zhang, W. Han y X. Peng. 2019. Estimating above-ground biomass of maize using features derived from UAV-based RGB imagery. *Remote Sensing*, 11(11), 1261.
- Olson, D. M., E. Dinerstein, E. D. Wikramanayake, N. D. Burgess, G. V. N. Powell, E. C. Underwood, J. A. D'amico, I. Itoua, H. E. Strand, J. C. Morrison, C. J. Loucks, T. F. Allnutt, T. H. Ricketts, Y. Kura, J. F. Lamoreux, W. W. Wettengel, P. Hedao y K. R. Kassem. 2001. *Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth.* Bioscience. 51:933.
- Padilla, C., G. Crespo y Y. Sardiñas. 2009. Degradación y recuperación de pastizales. *Rev. Cuba. Cienc. Agrícola.* 43:351–354.
- Pätzig, M., F. Geiger, D. Rasche, P. Rauneker y A. Eltner. 2020. Allometric relationships for selected macrophytes of kettle holes in northeast Germany as a basis for efficient biomass estimation using unmanned aerial systems (UAS). *Aquat. Bot.* 162:103-202.
- Paz, F., C. Balbontín, J. E. B. Nesvara y M. C. Solorio. 2009. Análisis Multifractal Del Carbono En Los Suelos 2. Divergencia De Momentos Estadísticos. *Terra Latinoam.* 27:257-264.
- PMARP. 2012. Plan Maestro de la Alianza Regional para la Coservación de los Pastizales del Desierto Chihuahuense. 64 pp. En: http://rmbo.org/v3/Portals/0/Documents/International/Master_Plan_Chihuahua_jan2012.pdf Consultado 18 Marzo 2020.
- Pullanagari, R. R., I. J. Yule, M. P. Tuohy, M. J. Hedley, R. A. Dynes y W. M. King. 2012. In-field hyperspectral proximal sensing for estimating quality parameters of mixed pasture. *Precis. Agric.* 13:351–369.

- Punalekar, S. M., A. Verhoef, T. L. Quaife, D. Humphries, L. Bermingham y C. K. Reynolds. 2018. Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. *Remote Sens. Environ.* 218:207-220.
- Rueda-Ayala, V. P., J. M. Peña, M. Höglind, J. M. Bengochea y D. Andújar. 2019. Comparing UAV-based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. *Sensors (Switzerland)*. 19:1–17.
- Ruggieri, A. C., V. C. Silva, N. C. Meister, F. O. Alari, P. D. L. Michalk, G. D. Millar, W. B. Badgery y M. Kim. 2013. Behaviour of grazing goats on Tanzania grassland under different residue leaf area index in southeastern Brazil. *Plant Sci. Commons*. 22.
- Rzedowski, J., 2006. *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 504 pp.
- Safari, H., T. Fricke y M. Wachendorf. 2016. Determination of fibre and protein content in heterogeneous pastures using field spectroscopy and ultrasonic sward height measurements. *Comput. Electron. Agric.* 123:256–263.
- Sala, O. E., F. S. Chapin, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L. F. Huenneke, R. B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D. M. Lodge, H. A. Mooney, M. Oesterheld, N. L. R. Poff, M. T. Sykes, B. H. Walker, M. Walker y D. H. Wall. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*. 287:1770-1774.
- Sanches, G. M., D. G. Duft, O. T. Kölln, A. C. dos S. Luciano, S. G. Q. De Castro, F. M. Okuno y H. C. J. Franco. 2018. The potential for RGB images obtained using unmanned aerial vehicle to assess and predict yield in sugarcane fields. *Int. J. Remote Sens.* 39:5402–5414.
- Sankey, T. T., J. M. Leonard y M. M. Moore. 2019. Unmanned Aerial Vehicle – Based Rangeland Monitoring: Examining a Century of Vegetation Changes. *Rangel. Ecol. Manag.* 72:858-863.
- Sesnie, S. E., H. Eagleston, L. Johnson y E. Yurcich. 2018. In-situ and remote sensing platforms for mapping fine-fuels and fuel-types in Sonoran semi-desert grasslands. *Remote Sens.* 10.
- Schulze-Brüninghoff, D., F. Hensgen, M. Wachendorf y T. Astor. 2019. Methods for LiDAR-based estimation of extensive grassland biomass. *Comput. Electron. Agric.* 156:693–699.

- Soltani, A. y S. Galeshi. 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: Experimentation and simulation. *F. Crop. Res.* 77:17–30.
- Stumpf, F., M. K. Schneider, A. Keller, A. Mayr, T. Rentschler, R. G. Meuli, M. Schaepman y F. Liebisch. 2020. Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecol. Indic.* 113:106201.
- Sumesh, K. C., S. Ninsawat y J. Som-ard. 2021. Integration of RGB-based vegetation index, crop surface model and object-based image analysis approach for sugarcane yield estimation using unmanned aerial vehicle. *Comput. Electron. Agric.* 180:105903.
- Théau, J., É. Lauzier-Hudon, L. Aubé y N. Devillers. 2021. Estimation of forage biomass and vegetation cover in grasslands using UAV imagery. *PLoS One.* 16:1–18.
- Tong, X., L. Duan, T. Liu y V. P. Singh. 2019. Combined use of *in situ* hyperspectral vegetation indices for estimating pasture biomass at peak productive period for harvest decision. *Precis. Agric.* 20:477–495.
- Viljanen, N., E. Honkavaara, R. Näsi, T. Hakala, O. Niemeläinen y J. Kaivosoja. 2018. A novel machine learning method for estimating biomass of grass swards using a photogrammetric canopy height model, images and vegetation indices captured by a drone. *Agric.* 8(5), 70.
- Virkajärvi, P. y K. Järvenranta. 2001. Leaf dynamics of timothy and meadow fescue under Nordic conditions. *Grass Forage Sci.* 56:294–304.
- Wang, L., M. Delgado-Baquerizo, D. Wang, F. Isbell, Jun Liu, C. Feng, Jushan Liu, Z. Zhong, H. Zhu, X. Yuan, Q. Chang y C. Liu. 2019. Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116:6187–6192.
- Watts, A. C., V. G. Ambrosia y E. A. Hinkley. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sens.* 4:1671-1692.
- Westwood, C. 2008. Pastures for animal production: Understanding the challenges. In: S Boschma, L Serafin and J Ayres (Eds.), Pagina 43 en Memorias The 23rd Annual Conference of the Grassland Society of NSW - 'Pastures at the Cutting Edge', Tamworth.

- Wijesingha, J., T. Moeckel, F. Hensgen y M. Wachendorf. 2019. Evaluation of 3D point cloud-based models for the prediction of grassland biomass. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 78:352–359.
- Xie, T., J. Li, C. Yang, Z. Jiang, Y. Chen, L. Guo y J. Zhang. 2021. Crop height estimation based on UAV images: Methods, errors, and strategies. *Comput. Electron. Agric.* 185:106155.
- Xu, D., N. Koper y X. Guo. 2018. Quantifying the influences of grazing, climate and their interactions on grasslands using Landsat TM images. *Grassl. Sci.* 64:118–127.
- Yue, J., G. Yang, C. Li, Z. Li, Y. Wang, H. Feng y B. Xu. 2017. Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. *Remote Sens.* 9(7), 708.
- Zermeño, G., J. A. Ríos, J. A. Gil-Marin y M. J. A. Cadena. 2011. Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal natural del norte de México. *Bioagro.* 23:43–52.
- Zhang, H., Y. Sun, L. Chang, Y. Qin, J. Chen, Y. Qin, J. Du, S. Yi y Y. Wang. 2018. Estimation of grassland canopy height and aboveground biomass at the quadrat scale using unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.* 10.