

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN PASTIZALES DE DURANGO,
MÉXICO, MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS E ÍNDICES DE
VEGETACIÓN

Tesis

Que presenta AMAURY ESQUIVEL ROMO
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila.

Marzo 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN PASTIZALES DE DURANGO,
MÉXICO, MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS E ÍNDICES DE
VEGETACIÓN

Tesis

Que presenta AMAURY ESQUIVEL ROMO
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Dr. Alejandro Moreno Reséndez
Director UAAAN

Dr. Ulises Noel Gutiérrez Guzmán
Co-Director externo

Torreón, Coahuila.

Marzo 2023

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN PASTIZALES DE DURANGO,
MÉXICO, MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS E ÍNDICES DE
VEGETACIÓN

Tesis

Elaborada por AMAURY ESQUIVEL ROMO como requisito parcial para
obtener el grado de Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



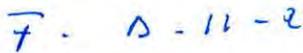
Dr. Alejandro Moreno Reséndez
Asesor principal



Dr. Ulises Noel Gutiérrez Guzmán
Asesor



Dr. Martín Alejandro Bolaños González
Asesor



Dr. Fernando Arellano Rodríguez
Asesor



Dr. Juan Antonio Encina Domínguez
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A la gloriosa **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – Unidad Laguna**, por haberme permitido realizar mis estudios de Doctorado.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por el apoyo económico para la realización de mis estudios de Doctorado.

A mi Asesor principal, **Dr. Alejandro Moreno Resendéz** por su tiempo y dedicación a mi persona, por sus consejos para lograr mi formación como Doctor en Ciencias. Le agradezco de todo corazón.

A mi asesor externo, **Dr. Ulises Noel Gutiérrez Guzmán**, por su gran apoyo en la realización de estos trabajos y además por su incomparable amistad.

A la Jefa del Programa de Doctorado, **Dra. Ma. Guadalupe Calderón Leyva**, por su gran apoyo y consejos.

A mi Comité de Asesoría, **Dr. Fernando Arellano Rodríguez, Dr. Juan Antonio Encina Domínguez y al Dr. Martín Bolaños González**, a todos muchas gracias por su amistad, por sus recomendaciones y atinadas sugerencias para realizar estos trabajos.

A todos los alumnos de la **Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED**, así como de la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-UL** que me apoyaron en los diferentes muestreos realizados.

A mis hermanos **Andrés Esquivel y Alonso Esquivel**, así como a mis primos **Misael Esquivel, Leobardo Esquivel y Gamaliel Esquivel** por su gran apoyo incondicional para viajar y realizar los muestreos.

A mi amiga **Aurelia Nájera Cruz**, por sus consejos y gran apoyo secretarial que desarrolla en el posgrado.

A **Don Rubén D. Gutiérrez** propietario del **Rancho La Cieneguilla** por todas las facilidades otorgadas para la realización de estos estudios.

A TODOS USTEDES LES AGRADEZCO DE CORAZÓN...

DEDICATORIA

A **DIOS** nuestro Señor, por prestarme la vida y permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi formación personal y profesional. Gracias, señor por tu sabiduría puesta en mí.

A mis padres **ANDRES ESQUIVEL NAVA** y **CECILIA ROMO MARTINEZ** por brindarme el apoyo constante para lograr mi formación personal y profesional; además también por sus consejos para ser una persona de bien, por siempre darme su amor y cariño, saben que los quiero mucho.

A mis hermanos **ANDRES ESQUIVEL ROMO** y **ALONSO ESQUIVEL ROMO**, por todo su apoyo incondicional, por saber ser pacientes cuando les falle en algún momento por atender de mis muestreos, sé que ustedes siguen mis pasos, los quiero mucho.

A mis abuelas **AMPARO NAVA RAMÍREZ** y **FELIPA MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ**, por todo su cariño hacia mí y por todos sus comentarios positivos los cuales me han ayudado muchísimo, las quiero mucho.

Este documento está dedicado a la memoria de mi gran amigo **Dr. SANTIAGO ZÚÑIGA GARCÍA** (1983-2020) quien me motivó a hacer el doctorado, y a seguir adelante pese a las adversidades, por ser mi ejemplo por seguir, te quiero mucho amigo mío y te mando un gran abrazo hasta el cielo.

A mis amigos **Dra. María Esther Ríos Vega**, **Dr. Ulises Noel Gutiérrez Guzmán**, **Dr. Jorge Arturo Bustamante Agrade**, **Dr. Apolinar Gonzales Mancilla** y **MC. Luis Jesús Barrera Flores**, quienes me han apoyado ante todas las adversidades, por sus consejos para poder salir adelante en esta etapa de mi formación.

CERTIFICADO DE ACEPTACIÓN Y ENVÍO DE ARTÍCULOS

Aceptación del artículo No. 1



Nova Scientia

León, Guanajuato a 18 de agosto de 2022

Apreciable Dr. Ulises Noel Gutiérrez Guzmán:

Con gusto le comunicamos que su trabajo

"Imágenes digitales obtenidas por dron para estimar el rendimiento de la biomasa en un sitio de pastizal del estado de Durango"

Escrito en coautoría con Amaury Esquivel-Romo, Alejandro Moreno-Reséndez, Francisco Gerardo Veliz-Deras, Fernando Arellano-Rodríguez, Jorge Arturo Bustamante-Andrade, María Esther Ríos Vega y Apolinar González Mancilla.

Fue aceptado el **6 de julio de 2022**

Nuestra revista publica dos números en los meses de mayo y noviembre su artículo será publicado en alguno de estos números. Desde su creación **Nova Scientia** ha implementado un sistema de arbitraje doble ciego que garantice el rigor en el análisis de los artículos.

Usted podrá consultar la revista en la siguiente dirección:

<http://novascientia.delasalle.edu.mx>



ATENTAMENTE

José Luis Álvarez
Secretario de la Revista



Nova Scientia

Revista de Investigación de la Universidad De La Salle Bajío

Nova Scientia ISSN 2007 - 0705 está indizada en:

CONACYT <http://www.conacyt.gob.mx/Indice/Paginas/Indice8.aspx>

Latindex <http://www.latindex.org/buscador/ficRev.html?folio=19346&opcion=1>

DOAJ <http://www.doaj.org/openurl?genre=journal&issn=20070705>

SciELO http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_serial&pid=2007-0705&lng=es&nrm=iso

Dialnet <http://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=13824>

PERIODICA http://biblat.unam.mx/index.php?valor=disciplinas/rev_disciplinas.php&id_disciplina=23

Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, Guanajuato México. Tel. 52 477 7108500

Artículo número 2, enviado y en revisión.

[RMCP] Envío recibido

De: MVZ. Arturo García Fraustro (cienciaspecuarias@inifap.gob.mx)

Para: alejamorsa@yahoo.com.mx

Fecha: miércoles, 18 de enero de 2023, 19:04 GMT-6

Dr. Alejandro Moreno Reséndez:

Hemos recibido y agradecemos el envío de su manuscrito 6398: "RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y DOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN OBTENIDOS DE IMÁGENES SATÉLITE SENTINEL 2A EN UN PASTIZAL DEL ESTADO DE DURANGO" a la Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. A través del sistema de gestión de revistas online usted podrá seguir su progreso del proceso editorial identificándose en el sitio web de la revista:

URL del manuscrito:

<https://cienciaspecuarias.inifap.gob.mx/index.php/Pecuarias/author/submission/6398>

Nombre de usuario/o: alejamorsa

Si tiene cualquier pregunta no dude en contactar con nosotros/as a cienciaspecuarias@inifap.gob.mx. Gracias por tener en cuenta nuestra revista para difundir su trabajo.

MVZ. Arturo García Fraustro
Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias

Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias
<https://cienciaspecuarias.inifap.gob.mx>

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	ii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis general	4
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Importancia económica y ecológica de los pastizales	5
Teledetección y sensores remotos utilizados en el monitoreo de la vegetación.....	7
El uso de VANT en el monitoreo de la vegetación	10
Índices de vegetación para evaluar biomasa vegetal	13
<i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</i>	13
<i>Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)</i>	13
Modelos predictivos en la producción de biomasa	15
ARTICULO 1	17
ARTICULO 2	31
CONCLUSIÓN GENERAL	50
LITERATURA CITADA	51

Índice de figuras

Contenido	Página
Figura 1 Vehículo aéreo no tripulado (dron) preparado a ser despegado para el análisis de la fitomasa aérea en un sitio de pastizal.	12

INTRODUCCIÓN

Los pastizales son regiones ecológicas que ocupan el 54% del planeta, mientras que las praderas de Norteamérica es uno de los biomas más representativos del continente (CCA, 2010); en estos ecosistemas se imposibilita la práctica de la agricultura convencional (Soussana y Lüscher, 2007; O'Mara, 2012) y brindan servicios importantes para la sostenibilidad, donde los beneficios ambientales que proporcionan estos sitios ecológicos son fundamentales para atenuar los efectos negativos del cambio climático (Cornejo-Denman *et al.*, 2020).

Los pastizales tiene funciones de captura en las herbáceas y arbustivas, además funciona como almacén de carbono orgánico en el suelo (Bai y Cotrufo, 2022), con el propósito de decidir en el manejo adecuado de los ecosistemas de herbáceas; puede constituir una alternativa viable para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Havstad *et al.*, 2007). Además, algunos servicios ecosistémicos están expuestos a eventos meteorológicos extremos que provocan fluctuaciones en la producción de biomasa en la vegetación, aunado la falta de mediciones del rendimiento, que ocasionan que sea en gran medida imposible asegurar la producción de los pastizales, y con ello una sub utilización del potencial forrajero de los predios o de igual manera, una sobreutilización de la fitomasa, a través de las carga animal inferiores o superiores utilizadas en las áreas de pastizal (Zhao *et al.*, 2020).

Serna (2009) menciona que el manejo inadecuado de las áreas de pastoreo es una de las causas básicos de la afectación a las herbáceas y conlleva la degradación del suelo, a su vez, produce una baja eficiencia en los sistemas de explotación de bovinos en apacentamiento. Lo cual representa un problema para los productores ya que existe una sobreexplotación de la vegetación, esto se traduce en sobre apacentamiento, quedando el suelo vulnerable a eventos como: viento, lluvia, etc., disminuyendo así su fertilidad (Cornejo-Denman *et al.*, 2020).

En el presente se puede utilizar la tecnología para hacer un uso eficiente de los pastizales, iniciando por la estimación de la cobertura vegetal que propicia mayor

acumulación de biomasa. Para ello, existen herramientas no destructivas, como la tecnología de teledetección y los Índices de productividad vegetal, lo que conlleva a mejorar la gestión en el uso de la biomasa aérea en estos ecosistemas. La utilización de modelos con percepción remota, al servicio de la determinación de la biomasa, en sitios ecológicos como los pastizales, se ha incrementado en las últimas décadas (De León-Mata *et al.*, 2014). Las tecnologías de observación remota usando fotografías de teledetección es una metodología económica, con la que se logran evaluar y analizar superficies de gran extensión o regiones con difícil acceso (Wulder 1998; Wynne *et al.*, 2000). El uso de nuevas tecnologías; al servicio de los zonas agrosilvopastoriles como: los sensores remotos; basados en vehículos aéreos no tripulados (drones) y las imágenes satelitales (Fernández-Lozano *et al.*, 2016), con imágenes de distintas bandas espectrales y con alta resolución, permiten hacer la evaluación de las áreas con vegetación de herbáceas o pastizales, con menor costo y trabajo de campo (Muñoz, 2013; Cabada *et al.*, 2019).

OBJETIVO GENERAL

- Identificar la distribución espacial y temporal de la producción de biomasa en un pastizal en Durango utilizando imágenes de sensores de satélite y VANT.

Objetivos específicos

- Evaluar la productividad de la biomasa aérea usando imágenes obtenidas de sensores montados en VANT
- Estimar la distribución de las especies del pastizal en el área de estudio, utilizando imágenes de teledetección obtenidas de un VANT
- Identificar los índices de vegetación del pastizal para evaluar la salud y presencia de la vegetación, lo que permitirá determinar la condición general del área de estudio

Hipótesis general

El uso de imágenes de sensores remotos y los índices de vegetación usando imágenes de sensor de satélite y VANT no permite determinar la distribución espacial y temporal de la producción de biomasa en un sitio de pastizal de Durango.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia económica y ecológica de los pastizales

A nivel mundial los pastizales son de suma importancia por su extensión, brindan bienes y servicios que permiten la conservación de la flora se ve favorecida mediante su cuidado y manejo adecuados, estas áreas son de uso ganadero y silvícola de importancia económica (Acorsi *et al.*, 2019). Los pastizales ofrecen múltiples beneficios a la sociedad, como la producción de insumos, materias primas alimenticias e industriales, además de servicios ambientales como la mitigación del cambio climático, secuestro de carbono atmosférico además de la infiltración y reposición de aguas subterráneas entre otros (Stumpf *et al.*, 2020).

De acuerdo a las estimaciones se considera que los pastizales se encuentran distribuidos entre 45 y 56 millones de km² de la corteza terrestre del planeta (WRI, 2000), se considera un bioma ampliamente distribuido con alta productividad y amplia diversidad ecológica, pero también tiene la mayor fragilidad por su conversión del suelo a las actividades agrícolas (Sala *et al.*, 2000; Olson *et al.*, 2001).

La conversión de los pastizales en tierras de cultivos o pastizales de monocultivo propiciado por la expansión de la agricultura y la ganadería intensiva propiciado por una alta demanda de alimentos a nivel mundial, que propician modificaciones de las zonas limítrofes de estas regiones ecológicas en todo el planeta. Esta dinámica incluye el norte de México, donde la fragmentación de la vegetación nativa de estos sitios por acciones antropogénicas, como el sobrepastoreo ha modificado los límites de estos ecosistemas (Pinto, 2006; Hoth, 2009; Sánchez *et al.*, 2009).

En México existen 300,000 km² de pastizales, que corresponden al 16% de la extensión territorial total del país (Zermeño *et al.*, 2011; Castano-Marin *et al.*, 2017). Los ecosistemas mencionados se encuentran predominantemente en la porción norte de México, teniendo como límite dos desiertos más extensos del país: el desierto de Chihuahua y el desierto de Sonora, se considera que los zacatales

presentan diversidad significativa tanto en flora como en fauna (Jurado-Guerra *et al.*, 2021).

Los pastizales son ecosistemas que producen la mayor biomasa que requiere el ganado, además de los beneficios propiciados con las mejores cualidades del suelo, equilibrio hidrológico, balance atmosférico, por mencionar algunos. Aunado a que son abundantes en diversidad biológica, fundamentales para el adecuado funcionamiento de estos biomas terrestres (Stumpf *et al.*, 2020). El buen estado del ecosistema de pastizal está estrechamente relacionado con la condición de la vegetación, la producción y la abundancia vegetal (Ali *et al.*, 2016).

Para determinar la producción de biomasa *in situ* es una tarea que demanda mayor cantidad de tiempo y costo económico (Castro *et al.*, 2020). Por lo tanto, a nivel mundial los pastizales son las regiones ecológicas con mayor degradación y afectación por actividades humanas, tienen alto riesgo por el sobrepastoreo, los incendios, la urbanización y el cambio climático (Hoekstra *et al.*, 2005), ocasionada por la expansión de tierras de cultivo (Matthews *et al.*, 2000).

Actualmente, se estima que se ha perdido alrededor del 30% de la superficie original de las praderas en las planicies de América del Norte (Samson *et al.*, 2004). La excesiva agricultura, actividad pecuaria y el desarrollo urbano, además de la drástica reducción de herbívoros nativos, se traduce en procesos de desertificación notables y la invasión por especies arbustivas indeseables en estos sitios (Murphy, 2003; Samson *et al.*, 2004). La afectación de estos ecosistemas favorece los riesgos de disminución de la fertilidad del suelo, lo que a su vez puede disminuir la productividad del agostadero, esta situación propicia una reducción de la ganancia de peso de los bovinos, y consecuentemente, en pérdidas económicas para los ganaderos (Padilla *et al.*, 2009).

En este sentido, es fundamental propiciar la conservación, el cuidado de los pastizales de todas las latitudes del mundo donde se encuentran distribuidos los pastizales, por todos los beneficios en bienes y servicios que brindan a la

humanidad, aunado a que representan el hogar de especies de mamíferos y aves, como indicadores del estado de salud del pastizal (Macias-Duarte *et al.*, 2011; 2013) a consecuencia de lo anterior, en los países que integran la región Norteamericana, se han realizado distintas acciones para el manejo sostenible de la flora y fauna del ecosistema de pastizal (Berlanga *et al.*, 2010).

Teledetección y sensores remotos utilizados en el monitoreo de la vegetación

Las herramientas, dispositivos y técnicas de percepción remota permiten el análisis y la recopilación de información de entidades ubicados en la superficie terrestre (Romero, 2006). El empleo de tecnología de imágenes satelitales o aéreas en las actividades ganaderas posibilita una recopilación ágil de datos y su posterior análisis (Herrera *et al.*, 2018). El conocimiento generado a partir de imágenes satelitales o fotografías aéreas obtenidas por sensores como satélites, vehículos aéreos no tripulados, donde se puede analizar la condición de la vegetación y la biomasa disponible en condiciones naturales (Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018).

A nivel mundial la actividad ganadera es la actividad principal en la utilización productiva del suelo de las praderas (Bernal *et al.*, 2020). En consecuencia, esto afecta la riqueza biológica y por lo tanto las interacciones de los organismos vivos (Wang *et al.*, 2019). El estado de salud de los ecosistemas se refleja en su capacidad para mantener la productividad, la diversidad y la resiliencia frente a perturbaciones. Dicha condición puede ser evaluada a través de diversos indicadores, tales como la cobertura vegetal, la biomasa, la diversidad de especies, la condición del suelo y la calidad del agua, los cuales están influenciados por factores como la precipitación y la temperatura (Pullanagari *et al.*, 2012; Van *et al.*, 2018).

Para preservar la calidad de los agostaderos y asegurar un adecuado suministro de alimento para el ganado, es fundamental llevar a cabo una evaluación constante de la producción de biomasa (Safari *et al.*, 2016).

Las imágenes de satélite se procesan en programas de cartografía, donde se gestiona, procesa y analiza la información, donde la teledetección permite capturar la radiación en forma de luz utilizando diferentes bandas, lo que permite obtener índices relacionados con el proceso de la fotosíntesis, además de la cobertura del suelo, la temperatura de la superficie, el contenido de humedad, etc. (Herrera *et al.*, 2018).

Se utiliza comúnmente las mediciones directas en el campo para evaluar la condición de las plantas en un ecosistema de herbáceas, sin embargo, esto puede incrementar los costos e incrementar los errores o sesgo en las mediciones realizada por el personal de campo (Sankey *et al.*, 2019). La evaluación de los pastizales se realiza con muestreos que tienen en cuenta las cualidades y aptitudes de los mismos, así como la calidad de los recursos vegetales disponibles en las áreas de pastoreo. Además, se toman en consideración las condiciones de selección de las especies alimenticias por parte de los animales que pastorean en dichas áreas (Bailey *et al.*, 1996).

La estimación de biomasa en pastizales es necesario que sean precisas y se pueden obtener en tiempo real, estas evaluaciones permiten a los ganaderos mejorar los coeficientes de agostadero en función de la condición de las herbáceas en estas áreas con manejo silvopastoril (Andersson *et al.*, 2017).

Por tal razón; en las últimas décadas, se ha empleado las imágenes de satélite o de VANT para evaluar y analizar la biomasa en los sitios de pastizal, complementado con la metodología tradicional de medición directa, para obtener la determinación de la producción forrajera de forma objetiva y en consecuencia realizar mejoras o ajustes en los planes de manejo y el uso sostenible de los agostaderos (Cruz-Flores *et al.*, 2020).

El desarrollo tecnológico actual, donde los equipos, programas informáticos, en conjunto con los VANT y los dispositivos para captura de imágenes han permitido obtener datos confiables acerca de las condiciones de las plantas en el agostadero y con ello se busca determinar las medidas biométricas de los vegetales de manera más precisa y en menos tiempo que por los medios tradicionales como la medida directa en campo (Dos Santos *et al.*, 2020). Una alternativa práctica y económica para evaluar las condiciones actuales y monitorear la vegetación es utilizar imágenes de drones de distintas bandas hiperespectrales (Fu *et al.*, 2021).

Otra opción para medir la cantidad de radiación electromagnética reflejada por la vegetación, así como para inferir medidas de altura, diámetro, volumen, peso, densidad y área foliar de las plantas, es el uso de imágenes de VANT y satélite. Además, estas herramientas nos permiten medir los diferentes tipos de radiación que influyen en el proceso de la fotosíntesis de manera rápida y automatizada. De esta manera, podemos analizar y generar información sobre biomasa, estrés y absorción de carbono de manera más eficiente (Sesnie *et al.*, 2018).

Una actividad indispensable en el manejo de pastizales, es evaluar la disponibilidad de biomasa aérea de la vegetación, este análisis permite planificar y definir estrategias para maximizar la producción de forraje y aunado con la capacidad de carga animal presente en el predio que afecta directamente la producción de alimento, por lo que es esencial realizar esta evaluación de forma regular y precisa (Batistoti *et al.*, 2019). Es importante explorar alternativas en la evaluación de las poblaciones vegetales, para lograr una eficiencia en el manejo de las herbáceas utilizadas en la producción de forraje (Bellocchi y Chabbi, 2020).

En la actualidad, la utilización de imágenes capturadas por sensores instalados en satélites orbitando en el espacio, se ha convertido en una alternativa económica y rápida para obtener información valiosa sobre la condición de la cobertura vegetal. Esto ha permitido hacer análisis y monitoreo para la planificación de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales.

Estas fotografías satelitales y de VANT son una herramienta valiosa en las evaluaciones de condición de la vegetación, para evaluar la presencia de insectos dañinos a las plantas o presencia de enfermedades, afectaciones del fuego y afectación al proceso hídrico en ríos y arroyos (Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018).

El uso de VANT en el monitoreo de la vegetación

El uso de la teledetección ha experimentado un incremento importante en el campo de la investigación enfocado las actividades agropecuarias y por lo tanto en la administración de las áreas de pastoreo, estas técnicas están enfocadas en lograr un uso apropiado y sostenible de la vegetación con una carga animal adecuada, buscando resolver la distribución de la vegetación y los factores bióticos que interactúan en estos biomas (De León-Mata *et al.*, 2014).

El avance de la tecnología de VANT en conjunto con los programas permiten su aplicación en la industria, construcción y en las ciencias como la topografía, geografía y ciencias ambientales entre otras actividades donde su utilización es cotidiana y constante (Watts *et al.*, 2012).

Recientemente el uso cada vez más común de los VANT mejor conocidos como drones, con cualidades que son económicos y fáciles de manejar, en conjunto con la información disponible de alta resolución espacial en línea y obtenida por vuelos con estos equipos propicia que sea una tecnología en constante avance y utilización cotidianamente (Geipel *et al.*, 2014). Esta información obtenida por los VANT proporciona imágenes de alta resolución que genera más certidumbre a los datos y por consecuencia a los análisis (Mao *et al.*, 2021).

Las imágenes de satélite y drones con técnicas de determinación de propiedades geométricas de los objetos, procesos de autocorrección y operaciones matemáticas en las imágenes, ofrece una opción real para la gestión y análisis de información en la estimación de la biomasa, estas técnicas son económicas y rápidas (Xie *et al.*, 2021).

Aunque los VATN no tienen la capacidad de cubrir vastas áreas como los satélites o aviones tripulados, su alcance supera la superficie evaluada por los métodos de monitoreo terrestres convencionales, estos instrumentos junto con las imágenes pueden proporcionar información valiosa sobre la cantidad de biomasa para los animales domésticos y silvestres (Gillan *et al.*, 2019).

Estas herramientas como las imágenes permiten a los ganaderos y agricultores recopilar información sobre las condiciones de la vegetación, teniendo indicadores como contenido de clorofila, la densidad de la cubierta vegetal y otros parámetros importantes para evaluar el crecimiento y la productividad de las plantas, entre otros factores que influyen en el rendimiento y calidad del ecosistema local (Enciso *et al.*, 2019).

Las fotografías de VANT comúnmente son una combinación de bandas RGB (Red-Green y Blue) (Palacios-Sánchez *et al.*, 2018). La estimación del contenido de pigmentos fotosintéticos en los folíolos y la correlación con la tasa fotosintética se logra mediante el cálculo del índice de vegetación a partir de imágenes de amplio rango de longitudes de onda del espectro electromagnético, en este caso los sensores incorporados en los drones posibilitan la continua evaluación de las condiciones de crecimiento de la vegetación en las actividades productivas y en los recursos naturales (Veneros *et al.*, 2020).

Los coeficientes de biomasa vegetal ejercen un efecto positivo sobre la vegetación densa, ya que minimizan los factores que generan distorsión de la imagen, como el sustrato edáfico, la irradiación solar, el ángulo de la luz y el efecto capa de gases de la Tierra (García *et al.*, 2021).

Actualmente una opción más económica en comparación con los sensores multiespectrales son las cámaras RGB montadas en un VANT, que propician información de buena calidad mediante la captura de imágenes, construcción de modelos de relieve del terreno, donde estos insumos permiten su aplicación en la vigilancia constante de la condición de los agostaderos y sus respectivos índices que determinan la condición del ecosistema estudiado (Sumesh *et al.*, 2021).

Según Guo *et al.* (2020), el empleo de VANT en las zonas agrícolas, ganaderas y silvícolas ha transformado la gestión de estos ecosistemas y ha brindado a los propietarios la oportunidad de obtener un mayor conocimiento del potencial productivo de sus terrenos.



Figura 1. Vehículo aéreo no tripulado (dron) preparado a ser despegado para el análisis de la biomasa aérea en un sitio de pastizal.

Índices de vegetación para evaluar biomasa vegetal

El índice de vegetación es un conjunto de operaciones matemáticas obtenidas de valores digitales de una imagen, realizando la combinación de bandas espectrales, generalmente el rojo y el infrarrojo cercano (Alvarado *et al.*, 2019). Con la función principal es obtener información en relación con la vegetación para medir la biomasa y el vigor de las plantas, disminuyendo el efecto de las perturbaciones emitidas por el suelo y la atmósfera (Cruz-Flores *et al.*, 2020).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Fue propuesta en 1974, esta fórmula su objetivo es diferenciar la vegetación y la cobertura del suelo usando como insumo las imágenes de satélite (Rouse *et al.*, 1974). De acuerdo con Neigh *et al.* (2008) explican que el método se basa en la normalización de la diferencia entre la reflectancia en el rojo (670 nm) y en el infrarrojo cercano (860 nm), que son las áreas del espectro electromagnético donde se genera la absorción de la luz por los pigmentos fotosintéticos, generalmente los valores -1 indican presencia de agua, valores cercano a cero (0) se relacionan con suelo desnudo, nubosidad, agua congelada o construcciones, mientras que los valores mayores a 1 son de la cobertura vegetal.

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El índice de vegetación tiene como propósito reducir la influencia del suelo en la reflectancia de las plantas. Para lograrlo, se agrega un factor de ajuste de suelo (L) a la fórmula de NDVI, con valores comprendidos de 0 a 1 en función de la cobertura presente (Huete, 1988). Los índices de vegetación tienen aplicación en la vigilancia de la cantidad de materia vegetal o biomasa en los agostaderos, es una opción fácil, rentable y efectiva para agilizar los estudios de campo, esto permite analizar las complicadas interacciones entre distintos factores bióticos y abióticos, lo que hace

crucial interpretar los cambios en los ecosistemas (Feeley *et al.*, 2005). Estos valores permiten apreciar la dinámica que ocurre en el sitio de estudio, como: el rendimiento de la biomasa; partiendo de datos existentes, aunado a la disponibilidad de las imágenes de satélite o dron y recopilando los datos *in situ*, con ello se logra la determinación de los índices de cobertura y los procesos de cambio en las áreas de pastizales (Sacristan, 2006).

Es crucial realizar una evaluación constante de las áreas de pastoreo mediante la determinación de la biomasa y el monitoreo de los cambios en el manejo de los agostaderos, esta tarea es aún más relevante en la actualidad debido a los efectos que los cambios en el clima terrestre están teniendo a nivel global, especialmente en los ecosistemas más frágiles como los agostaderos. Por lo tanto, la teledetección se presenta como una opción viable para llevar a cabo estudios de sucesión ecológica en estos ecosistemas (Cruz-Flores *et al.*, 2020).

Estas estimaciones se basan en los datos obtenidos de imágenes, usando cálculos de los índices de vegetación, que brindan valores numéricos útiles para calcular la cantidad de biomasa o la salud de la vegetación, donde el índice de vegetación se obtiene al combinar las bandas espectrales a través de operaciones matemáticas, lo que permite obtener un valor que indica la cantidad de materia vegetal presente en los píxeles (Gonzaga, 2015).

Utilizando imágenes y programas especializados se pueden generar mapas de vegetación que permiten identificar cambios en la vegetación, así como la presencia de agua y la condición del suelo, entre otros aspectos que influyen en los pastizales. La generación de esta información es una alternativa económica y eficiente para el proceso de evaluación, donde los mapas de vegetación se consideran el producto final de este proceso (Bonet, 2004).

Los índices de vegetación se calculan mediante la utilización de los contrastes presentes en la imagen de hiperspectral, determinados a partir de las diferencias existentes entre la cobertura, cuando la vegetación se encuentra en buen estado, se aprecian contrastes en el espectro visible, particularmente en la banda roja y el infrarrojo cercano, una cualidad de las plantas es que la clorofila y pigmentos tienen la capacidad de absorber gran parte de la energía solar que reciben (Cruz-Flores *et al.*, 2020).

Modelos predictivos en la producción de biomasa

El conocimiento sobre el aumento y desarrollo de las especies vegetales en pastizales de zonas áridas es limitado. Como resultado, se produce un sobrepastoreo que reduce la calidad de la vegetación y disminuye la disponibilidad de alimento para el ganado, debido a esto, las especies más apetecibles para el ganado sufren una mayor presión, lo que tiene un impacto negativo en la condición del hábitat (Flores *et al.*, 2018).

La producción de biomasa aérea en la vegetación es el resultado del proceso de conversión de la energía luminosa en energía química, el cual permite a las plantas llevar a cabo sus funciones fisiológicas y acumular reservas de carbono tanto en la planta como en el suelo. Medir la cantidad de biomasa aérea es un indicador clave para evaluar la productividad de las áreas de vegetación natural, lo que resulta fundamental para su manejo a largo plazo (Hernández-Ramos *et al.*, 2019).

Para evaluar el rendimiento de la biomasa, existen diversas técnicas disponibles (Aristizábal, 2011). En general, los procesos indirectos se basan en algoritmos y ecuaciones predictivas que utilizan variables indirectas. Estas técnicas permiten calcular rápidamente y con un alto nivel de confiabilidad la biomasa, lo que las convierte en una opción adecuada para su uso en pequeñas áreas o en superficies de manejo ganadero de gran tamaño (Flores *et al.*, 2018).

La determinación de la producción de biomasa en las áreas de pastizales representa una variable de difícil determinación, sin embargo, con la metodología de los modelos predictivos; a partir de ecuaciones para calcular los índices de vegetación, se puede realizar directamente y es una técnica económica (Solano *et al.*, 2014).

En la actualidad, existe un fuerte interés por evaluar la producción de biomasa. Dado que el método de estimación directa resulta costoso, se han desarrollado modelos matemáticos predictivos basados en variables observables de fácil obtención y en relaciones alométricas que permiten estimar la biomasa aérea de los diferentes componentes de la vegetación (Porté, 2002).

ARTICULO 1

Last name(s), Name initial(s) ... & Last name(s), Name initial(s). (Year).
Title. *Nova Scientia*, volume(issue), initial page-final page. [doi/ns.vi](https://doi.org/10.17177/nova.2022.1401.01)



Imágenes digitales obtenidas por dron para estimar el rendimiento de la biomasa en un sitio de pastizal del estado de Durango

Digital images obtained by drone to estimate biomass yield in a grassland site in the state of Durango

Amaury Esquivel-Romo^{1,2}  <https://orcid.org/0000-0002-4208-923X> - Alejandro Moreno-Reséndez¹  <https://orcid.org/0000-0001-8858-0190> - Ulises Noel Gutiérrez-Guzmán²  <https://orcid.org/0000-0002-6409-1947> - Francisco Gerardo Veliz-Deras¹  <https://orcid.org/0000-0002-5105-1508> - Fernando Arellano-Rodríguez¹  <https://orcid.org/0000-0002-6110-5338> - Jorge Arturo Bustamante-Andrade^{1,2}  <https://orcid.org/0000-0003-1642-3916> - María Esther Rios-Vega²  <https://orcid.org/0000-0002-7527-9806> - Apolinar González-Mancilla²  <https://orcid.org/0000-0002-1066-1916>

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonino Narro, Unidad Laguna. Torreón, Coahuila, México.

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Gómez Palacio, Durango, México.

 Autor de correspondencia: ulises.gutierrez@ujed.mx

Recepción: dd-mm-aa / Aceptación: dd-mm-aa / Publicación: dd-mm-aa

© Nova Scientia, bajo licencia Creative Commons / ISSN 2007-0705

Si incluye documento con información adicional, indíquelo aquí

Resumen

La adquisición de imágenes de alta resolución mediante drones y su posterior procesamiento proporcionan información valiosa sobre variables biofísicas de vegetación de pastizales. El objetivo de este estudio fue generar un modelo de predicción de la dinámica de la productividad anual de un pastizal semiárido del norte de México mediante la cobertura vegetal estimada en fotografías digitales obtenidas por dron. Se diseñó un sistema de muestreo permanente en el predio ganadero La Cieneguilla. Las variables de estudio medidas fueron la producción de biomasa de corte directo como variable dependiente y la cobertura vegetal estimada en imágenes digitales adquiridas por dron como variable independiente. El número de muestras recogidas de ambas variables fue de 640 durante el año 2020. Con el 50% de los datos se generó el modelo de predicción y con el otro 50% de los datos el modelo de validación, los modelos de regresión ajustados fueron de la forma $Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$ con R^2 ajustado = 71.64% y 69.90% respectivamente. Esta metodología propuesta ofrece un medio no destructivo y preciso para el monitoreo y evaluación anual de pastizales en áreas secas.

Palabras clave: Modelo de predicción; cobertura vegetal; clasificación supervisada; CobCal.

Abstract

The acquisition of high-resolution images by drones and their subsequent processing provides valuable information on biophysical variables of grassland vegetation. The objective of this study was to generate a prediction model of the annual productivity dynamics of a semi-arid grassland in northern Mexico through the estimated vegetation cover in digital photographs obtained by drone. A permanent sampling system was designed in the La Cieneguilla cattle ranch. The study variables measured were the direct cut biomass production as the dependent variable and the vegetation cover estimated in digital images acquired by drone as the independent variable. The number of samples collected for both variables was 640 during the year 2020. With 50% of the data, the prediction model was generated and with the other 50% of the data, the validation model, the adjusted regression models were the form $Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$ with adjusted $R^2 = 71.64\%$ and 69.90% respectively. This proposed methodology offers a non-destructive and accurate means for annual monitoring and evaluation of grasslands in dry areas.

Keywords: prediction model; vegetal cover; supervised classification; CobCal.

Título del artículo

1. Introducción

Los pastizales son uno de los principales ecosistemas del mundo y cubren cerca de un tercio de la superficie terrestre (Lemaire *et al.*, 2011). En México, los pastizales de zonas áridas se encuentran ampliamente distribuidos en el norte y centro del país, se les considera ecosistemas muy importantes desde el punto de vista ecológico y económico (Espinoza *et al.*, 2000). Son reconocidos por brindar importantes servicios ecosistémicos más allá del forraje para el ganado, incluidos el mantenimiento de suelos estables y productivos, suministro de agua limpia y alta biodiversidad (Habel *et al.*, 2013, Teague *et al.*, 2013). Sin embargo, la degradación de la vegetación y los suelos es común en la mayoría de los pastizales semiáridos de México y del mundo (Moreno *et al.*, 2014, Parr *et al.*, 2014).

La evaluación de la vegetación de las tierras de pastoreo es esencial para determinar la capacidad de carga y evitar el exceso de ganado y/o el sobrepastoreo de los pastizales de una granja, rancho o unidad de tierra pública, además el tener conocimiento de la capacidad de pastoreo actual o la capacidad de carga a largo plazo. Una alternativa es a través del monitoreo del rendimiento de forraje lo cual es de suma importancia para respaldar las decisiones de manejo en pastizales (Lussem *et al.*, 2018, Viljanen *et al.*, 2018). La biomasa de los pastizales es un indicador importante de la productividad de dichos ecosistemas y el método comúnmente aceptado para su medición es cosechar y pesar plantas directamente en un área determinada (Everson *et al.*, 1990, Sorensen *et al.*, 2012).

En la actualidad las nuevas tecnologías aplicadas para la obtención de información sobre variables biofísicas de la vegetación como es la percepción remota pueden tener un rol decisivo en el desarrollo de soluciones de monitoreo de ecosistemas de pastizal (Hernández *et al.*, 2019), además, los sensores remotos representan una fuente de datos clave en la estimación de la biomasa y con el desarrollo de esta tecnología es posible obtener imágenes de mayor precisión y escala (Viljanen *et al.*, 2018, Lussem *et al.*, 2019).

Generalmente, los trabajos de investigación para predecir el rendimiento de la biomasa de pastizales basados en imágenes de satélite y cálculo de índices de vegetación se basan en la época de crecimiento cuando la vegetación esta verde o vigorosa y es cuando los sensores tienen la habilidad de detectar mejor esta característica (Butt *et al.*, 2011, Cong *et al.*, 2012, Chen *et al.*, 2013). Sin embargo, esta temporada es corta en relación con el año (tres a cuatro meses) pero ¿qué pasa cuando la vegetación esta seca o senescente y los índices disminuyen la habilidad de predicción? Es necesario implementar otras metodologías para contar con modelos robustos de predicción de la producción de biomasa independientemente de la época del año para la gestión adecuada de los pastizales.

El surgimiento de UAV permite la obtención de imágenes de muy alta resolución espacial y en tiempo real (Bending *et al.*, 2014). Grtner *et al.*, (2019) comentan que una estimación adecuada y precisa del rendimiento en pastizales es obligatoria para las decisiones de manejo del pastoreo y una opción viable para esto es el uso de cámaras RGB (rojo, verde, azul) instaladas en un vehículo aéreo no tripulado (UAV), las cuales representan una tecnología no destructiva prometedora para la evaluación especialmente en áreas grandes y remotas. La portabilidad de cámaras ópticas por los UAV que cubren las regiones del espectro visible (Wang *et al.*, 2017). Los beneficios de la técnica de estimación fotográfica incluyen la reducción del tiempo de campo, la minimización del muestreo destructivo y la estimación subjetiva del observador al estimar la biomasa en el campo (Morgan *et al.*, 2017).

Medir la cobertura vegetal es una de las formas más comunes de describir cuantitativamente la vegetación, debido a su velocidad y bajo impacto en el área muestreada (Symstad *et al.*, 2008). Los métodos principales para medir la cobertura son intersección de la línea, frecuencia puntual, estimación visual y métodos fotográficos. Se estudiaron las correlaciones entre las estimaciones del porcentaje de cobertura vegetal basadas en imágenes y dieron como resultado valores de R2 superiores al 92 % (Booth *et al.*, 2006).

El método de clasificación supervisada de imágenes digitales por medio de aplicaciones automatizadas es una alternativa viable para determinar la cobertura vegetal independientemente del estado fisiológico de la planta (Byrne *et al.*, 2011). Diferentes estudios realizados con el propósito de estimar la biomasa aérea herbácea han sido realizados con variables de fácil medición como la altura o la cobertura aérea o basal, esto se efectuado a través de modelos de regresión (Nafus *et al.*, 2009, MacDonald *et al.*, 2012).

Por lo tanto, el propósito de este estudio es encontrar la relación entre el rendimiento de la biomasa de pastizales anual y la cobertura vegetal estimada en fotografías RGB obtenidas con dron a través de modelos de regresión sin importar el estado fisiológico de la vegetación a nivel de una unidad productiva ganadera.

Primer apellido del primer autor *et al.*

2. Métodos, técnicas e instrumentos

Este presente estudio se realizó en un pastizal privado ubicado dentro de la colonia agrícola y ganadera La Cieneguilla, Durango, México, en las coordenadas geográficas 25° 39' N, 104° 39' O, la altura promedio del sitio es de 1910 m (figura 1). El clima predominante en el sitio es estepario, presenta dos periodos típicos de zonas áridas: el periodo de lluvias (agosto-noviembre) y el periodo de secas (diciembre-julio), el promedio de precipitación anual es de 450 mm y la temperatura promedio anual es de 20 °C. El suelo es de tipo migajón arcillo-arenoso, con pendientes suave del 1 al 8 %. El tipo de vegetación está clasificado como pastizal natural con dominancia de *Bouteloua gracilis*. El sitio se ubica en una región ganadera prioritaria de estado, el sistema de producción predominante es el sistema vaca-becerro de condiciones extensivas, el mercado principal del sistema es la venta de becerros para engorda en corrales a Estados Unidos de América.

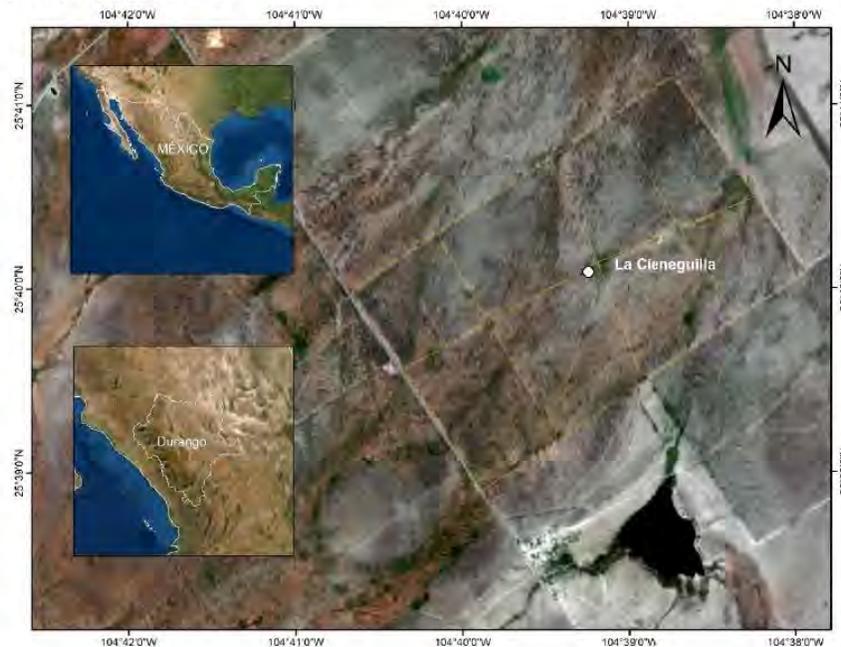


Figura 1.- Ubicación geográfica del área de estudio.

Figure 1.- Geographic location of the study area.

Área experimental

El predio ganadero utilizado tiene una extensión de 980 has, dividido en ocho potreros, se seleccionó al azar un potrero con 150 has. Para la obtención de las variables de estudio se diseñó un sistema de muestreo permanente (SMP), se establecieron 16 puntos en el terreno distribuidos en cuadrícula tratando de cubrir el área del potrero, en cada punto se fijó al suelo un poste metálico y se referenció geográficamente. Cada punto se tomó como centro de una parcela de una hectárea de superficie (100 m por 100 m), cada hectárea se subdividió en cuatro subparcelas de 25 m por 25 m, esta se denominó estación de muestreo (EM) (figura 2).

Título del artículo



Figura 2. Ubicación de sitio de muestreo permanente dentro del predio ganadero La Cieneguilla.
Figure 2. Location of the permanent sampling site within the La Cieneguilla cattle ranch.

Medición de variables

Las variables del estudio fueron el rendimiento de la biomasa (variable dependiente) y la cobertura vegetal (variable independiente). Para obtener los datos de rendimiento la unidad experimental consistió en un aro de poliducto color naranja con un diámetro de 1.6 m y un área efectiva de 2.01 m², en cada parcela a partir del centro se lanzaron al azar cuatro aros, uno por cada subparcela tomando como referencia el norte y a favor de las manecillas del reloj. Una vez realizado esto, se inició un vuelo controlado manualmente usando un dron marca DJI Phantom 4 Pro con una cámara digital integrada de 20 megapíxeles, este fue posado encima del aro a una altura promedio de 3 m suficiente para cubrir la superficie de la unidad experimental, con la cámara posicionada de manera vertical al suelo se tomó una fotografía con una resolución menor de 1 cm, esto se realizó para los otros tres aros.

Posterior a la toma de las imágenes se procedió a cosechar la biomasa en pie que estaba contenida en cada unidad de muestreo, todo el material recolectado se depositó en bolsa de papel identificada y georeferenciada las cuales fueron enviadas al laboratorio de nutrición para determinar el contenido de materia seca en horno a 65°C por 48 horas, el resultado obtenido se consideró como rendimiento y se expresó g/m². Las imágenes obtenidas con el dron fueron resguardadas en la memoria interna, posteriormente fueron descargadas y renombradas con los datos de identificación correspondientes a cada punto y subparcela para su análisis. Después de esto las imágenes fueron clasificadas de acuerdo con los atributos de dos clases principales de píxeles (1) vegetación verde o seca y (2) suelo desnudo usando el programa CobCal V 2.1 (Ferrari *et al.*, 2009), que emplea técnicas de colorimetría para calcular el porcentaje y la superficie de la cobertura vegetal en un espacio muestral, este programa es de versión gratuita, solo requiere un poco de adiestramiento por el usuario.

Finalmente, los datos de salida proporcionan la imagen clasificada y el porcentaje de cobertura de la vegetación que se encuentra dentro de la delimitación (mascara) que es puesta por el usuario considerado la superficie de la unidad de muestreo del aro de poliducto color naranja (figura 3).

Primer apellido del primer autor *et al.*

E3M3

Porcentaje de cobertura: 21,73%
 Superficie cubierta: 4,368.78cm²
 Fecha de proceso: 02/03/2022 11:48:02 a. m.

Imagen original



Imagen resultado



CobCal v2.1.0.63

Figura 3.- Clasificación de imagen usando el programa CobCal 2.1.

Figure 3.- Image classification using the CobCal 2.1 program.

El periodo de estudio comprendió de enero a diciembre de 2020, originalmente se planeó realizar muestreos una vez por mes, sin embargo, por cuestión de la pandemia de Covid-19 no fue posible realizar los muestreos de los meses de marzo y abril por restricciones de movilidad impuestos por la autoridad competente. Las muestras obtenidas por fecha de muestreo fueron 64 y en total para todo el estudio se recabaron 640.

Análisis estadístico

Para el análisis de la información obtenida se utilizó el programa estadístico Minitab 18. Se realizaron pruebas de rutina para corroborar la distribución normal a la variable de rendimiento, no se cumplieron los supuestos por lo cual se procedió a hacer transformaciones de la variable, el mejor ajuste a la normalidad fue con transformación Johnson. Se parearon los datos de rendimiento transformados con sus respectivos valores de cobertura vegetal para realizar el análisis de regresión lineal entre ambas variables. Del total de 640 datos pareados se dividieron al 50% y se crearon dos grupos, con el primer set se generó el Modelo _{predicción} y con el segundo set se generó el Modelo _{validación}. El modelo con el mejor ajuste fue de la forma $Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$.

3. Resultados y discusión

Cobertura vegetal y producción de biomasa

El resumen estadístico de las variables del estudio se muestra en el (cuadro 1). El rango entre el valor mínimo y máximo con relación al promedio del rendimiento de la biomasa y la cobertura vegetal es cambiante dado que a lo largo del año ambas variables están correlacionadas a la precipitación pluvial y al efecto del pastoreo continuo por ganado.

Título del artículo

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las variables evaluadas en el sitio La Cieneguilla, Durango en el año 2020.
Table 1. Descriptive statistics of the variables evaluated at the La Cieneguilla site, Durango in the year 2020.

Variable	N	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
Rendimiento (g/m ²)	640	18.754	11.382	60.69	0.498	61.692	0.87	0.65
Cobertura vegetal (%)	640	24.126	16.213	67.20	0.390	81.570	0.47	-0.40

N= número de observaciones

N= number of observations

Las curvas encontradas de rendimiento y cobertura vegetal promedio mensual son muy similares, primeramente, se puede diferenciar la época de secas (enero-junio) y la época de lluvias (julio-diciembre), además se observa una estrecha relación entre ambas variables, aumentan y disminuyen armónicamente lo cual refuerza nuestra hipótesis que es posible estimar el rendimiento de la biomasa de pastizales a través de la medición de la cobertura vegetal (figura 5).

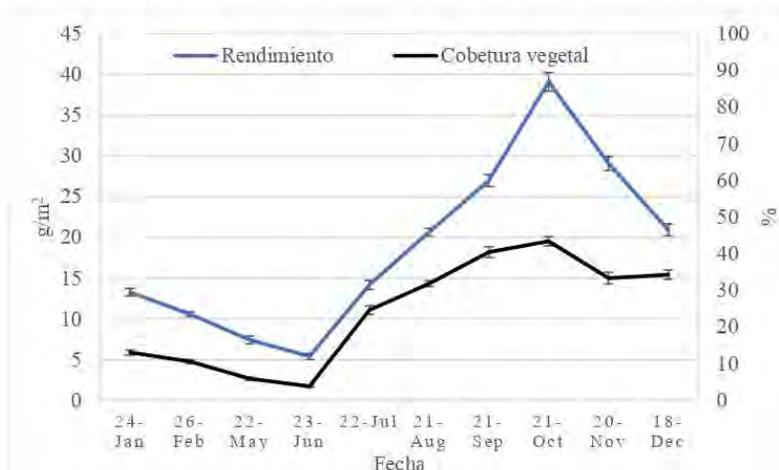


Figura 5. Comportamiento del rendimiento y cobertura vegetal durante el periodo de estudio.
Figure 5. Behavior of yield and vegetal cover during the study period.

Generación de modelos de regresión

Antes de realizar las pruebas para encontrar el modelo de predicción con el mejor ajuste se analizó la variable de rendimiento de la biomasa para corroborar los supuestos de normalidad mediante la prueba Anderson-Darling, encontrándose un valor de probabilidad <0.005, por lo cual, se asume que los datos provienen de una población no normal o con desviación significativa de la normalidad. Tsutsumi *et al.*, (2007) mencionaron que la biomasa de pastos generalmente no se ajusta a la distribución normal y al ser analizada mediante una distribución de frecuencias se presenta un sesgo o una "cola larga".

Para ajustar los datos a la distribución normal se procedió a realizar transformación de la variable mediante la opción de Identificación de la distribución individual en el programa Minitab18, el mejor ajuste fue con la función de transformación SB de la familia de Johnson con la variable limitada (Chou *et al.*, 1998) = $1.59640 + 1.34320 \times \text{Ln} \left[\frac{(X + 2.58471)}{(79.3318 - X)} \right]$ con un valor de $p = 0.302$, cumpliendo con los supuestos de normalidad (figura 6).

Primer apellido del primer autor *et al.*

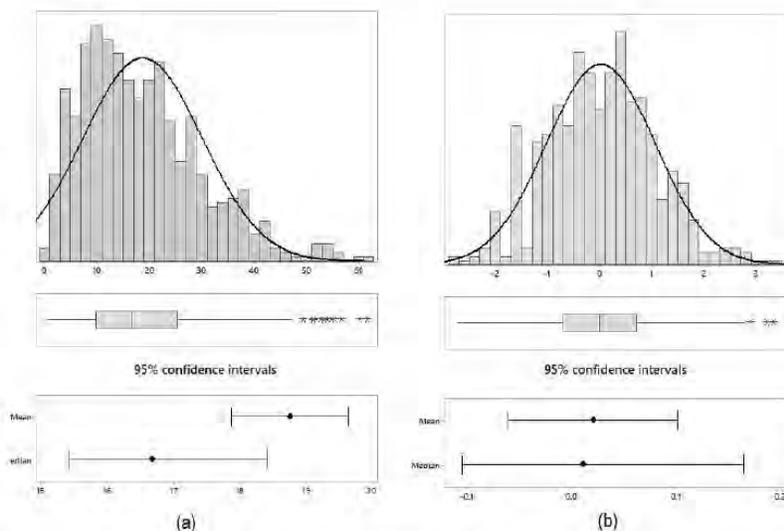


Figura 6. Distribución de frecuencias de la variable peso de la biomasa (a) sin transformación y (b) con transformación Johnson SB.

Figure 6. Frequency distribution of the biomass weight variable (a) without transformation and (b) with Johnson SB transformation.

Según Lagos y Vargas (2003), el sistema Johnson se aplica cuando el supuesto de normalidad de la característica bajo estudio no se cumple, cuando esto sucede es posible transformar los datos no-normales a datos normales, a través de técnicas como el Sistema de Familias de Distribuciones de Johnson. Los datos transformados en nuestro estudio se ajustaron a la distribución Johnson tipo SB “acotada”, cuyo objeto es aplicar los métodos y teoría de la distribución normal a un amplio rango de distribuciones no normales a través de transformaciones a partir de distribuciones exponencial y seno hiperbólico. Debido a su flexibilidad, esta distribución se emplea en varios campos como economía, ingeniería biomédica y análisis forestal (Marrone, 2017).

Los datos de la biomasa transformados fueron pareados con los datos correspondientes de la cobertura vegetal y se les asignó un número del 1 al 640, se crearon dos subgrupos con el 50% de datos cada uno, el criterio de selección de los datos de cada grupo fue de números pares para el primer grupo y números impares para el segundo grupo. El primer grupo se utilizó para generar el Modelo predicción y el segundo grupo para construir el Modelo validación.

Se realizó la primera ronda y se determinó que el Modelo de predicción que se ajusta adecuadamente a los datos es un modelo cuadrático $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$ el cual se puede utilizar para predecir el rendimiento de la biomasa con transformación Johnson para un valor de cobertura vegetal, con un valor de R^2 ajustado de 68.52%. En los gráficos de los residuales se detectaron ocho observaciones con residuo grande y poco común, se eliminaron dichas observaciones y se realizó la segunda ronda. Se realizó la tercera ronda eliminando tres observaciones. Finalmente, la ecuación ajustada para el modelo cuadrático que describe la relación es: $Y = -1.4312 + 0.07583 X - 0.000467 X^2$ con un valor de R^2 ajustado de 71.64% (cuadro 2).

Título del artículo

Cuadro 2. Parámetros del Modelo predicción con el rendimiento de la biomasa (Y) versus el porcentaje de cobertura aérea (X) en La Cieneguilla, Durango, México.

Table 2. Parameters of the prediction model with the biomass yield (Y) versus the percentage of aerial cover (X) in La Cieneguilla, Durango, Mexico.

Término	Coefficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor p	Gauss Markov (residuales)	
β_0	-1.4312	0.0724	-19.78	0.000	D. Normal	Si
$\beta_1 X$	0.07583	0.00611	12.41	0.000	Independencia	Si
$\beta_2 X^2$	-0.000467	0.000109	-4.28	0.000	Homocedasticidad	Si

R² ajustado = 71.64%

Para el Modelo de validación se utilizó el segundo grupo de datos retenidos, se realizó la primera ronda y de manera similar el modelo con el mejor ajuste es de tipo cuadrático con un R² ajustado de 66.86%, además, resultaron 12 observaciones con residuo grande y poco común, estas fueron eliminadas y se obtuvo la ecuación ajustada para el modelo cuadrático $Y = -1.4834 + 0.08073 X - 0.000554 X^2$ con valor de R² ajustado = 69.90% (cuadro 3).

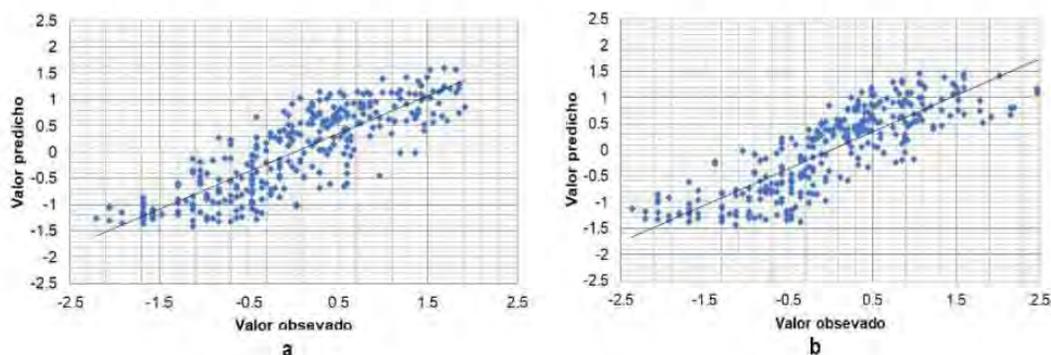
Cuadro 3. Parámetros del Modelo validación del rendimiento de la biomasa (Y) versus el porcentaje de cobertura aérea (X) en La Cieneguilla, Durango.

Table 3. Parameters of the biomass yield validation model (Y) versus the percentage of aerial cover (X) in La Cieneguilla, Durango.

Término	Coefficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor p	Gauss Markov (residuales)	
β_0	-1.4834	0.0732	-20.26	0.000	D. Normal	Si
$\beta_1 X$	0.08073	0.00576	14.02	0.000	Independencia	Si
$\beta_2 X^2$	-0.000554	0.000099	-5.62	0.000	Homocedasticidad	Si

R² ajustado = 69.90%

En la (figura 7) se observa la distribución de los valores observados vs valores predichos para ambos modelos.



Primer apellido del primer autor *et al.*

Figura 7. (a) Relación entre los valores predichos del Modelo predicción $Y = -1.4312 + 0.07583 X - 0.000467 X^2$ y los valores observados. (b) Relación entre los valores predichos del Modelo validación $Y = -1.4834 + 0.08073 X - 0.000554 X^2$ y los valores observados.

Figure 7. (a) Relationship between the predicted values of the Prediction Model $Y = -1.4312 + 0.07583 X - 0.000467 X^2$ and the observed values. (b) Relationship between the predicted values of the Validation Model $Y = -1.4834 + 0.08073 X - 0.000554 X^2$ and the observed values.

Validación de modelos de regresión

La validación de un modelo está desempeñando un papel cada vez más importante en la evaluación del rendimiento y la confiabilidad de un sistema complejo cuando se trata de modelado y simulación con el fin de tener mayor precisión de validación general de los modelos (Xiaomo *et al.*, 2013). Con ambos modelos generados se realizó una comparación estadística de sus coeficientes mediante la prueba de “t” de Student, estos no difirieron estadísticamente lo cual demuestra que el Modelo predicción fue validado con la información del Modelo validación (cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de los coeficientes de los modelos con $t(320+320-11-12-2) = 615$, $p < 0.05$ = 1.967.

Table 4. Comparison of the coefficients of the models with $t(320+320-11-12-2) = 615$, $p < 0.05$ = 1.967.

Modelo	β_0	β_1	β_2
Predicción	-1.4312	0.07583	-0.000467
Validación	-1.4834	0.08073	-0.000554
t Student	0.070 n. s.	0.006 n. s.	0.0001 n. s.

n. s.: no significativo a $p < 0.05$.

n. s.: not significant at $p < 0.05$.

La cobertura vegetal y la cantidad de biomasa disponible son características de las plantas herbáceas de zonas áridas y semiáridas que cambian en respuesta a la estacionalidad de precipitación anual y al régimen de uso antrópico. Esto resulta en dificultades para elaborar planes de manejo adecuado en cuanto a la carga animal óptima en un determinado tiempo. En este sentido, es muy necesario tener una medida de la cubierta vegetal del dosel que se correlacione bien con la biomasa seca. Idealmente, si un método tiene una alta correlación positiva con la biomasa aérea, entonces el muestreo destructivo es innecesario (Marssett *et al.*, 2006). En este estudio la biomasa se correlacionó positivamente con la cobertura vegetal, este resultado es similar a lo reportado por Vanamburg *et al.*, (2006) realizaron un experimento con mediciones de biomasa cosechada de pradera de pastos cortos del este de Colorado utilizando la precisión y la eficiencia imágenes de cámaras digitales convencionales (RGB) proporcionando estimaciones razonables de la biomasa de $R^2 = 0.55$. Chávez *et al.* (2017) reportaron correlaciones superiores a las de nuestro estudio de $R^2 = 0.98$, utilizó fotografías digitales para la estimación de la cobertura aérea usando métodos de clasificación supervisada además de muestreos para la estimación de la producción de biomasa de pastizales en seis estados en México. Sin embargo, los datos procesados corresponden a la fase lineal de la etapa de crecimiento vegetativo y nosotros consideramos la disponibilidad de biomasa anual.

Los resultados comparables de este trabajo con otros estudios se limitan en cuanto a la metodología empleada, existen trabajos diversos con el uso de fotografías obtenidas por dron y la estimación del dosel o la cobertura vegetal, pero incluyen además el cálculo indirecto de la altura de la vegetación que puede generar geometría 3D según los principios de la fotogrametría, lo cual en algunos casos mejora la precisión en la estimación de la biomasa de pastizales (Barrachina, 2015, Possoch, 2016, Lussem *et al.*, 2019, Barnetson *et al.*, 2020). Sin embargo, estos trabajos tienen algunas limitaciones importantes a considerar como es la gran cantidad de imágenes adquiridas con un levantamiento por dron sobre una determinada superficie mediante un plan de vuelo programado y un traslape mínimo del 75%, por consiguiente es muy laborioso su manejo de forma personal y deben ser procesadas en programas comerciales que ofrecen la creación de productos basadas en la nube para obtener orto mosaicos RGB y NDVI de alta resolución, pero es probable que sean costosas en grandes extensiones de pastizales (Gillan *et al.*, 2019). Otras técnicas novedosas incluyen drones con sistemas láser para adquirir información de la vegetación, por ejemplo, los sistemas Lidar se han utilizado para estimar la biomasa de pastizales (Cooper *et al.*, 2017, Wang *et al.*, 2017). Sin embargo, debido al alto costo de adquirir datos Lidar, los estudios se limitaron principalmente a áreas pequeñas y no se aplicaron ampliamente

Título del artículo

en áreas grandes (Zhang *et al.*, 2018). En nuestro estudio la adquisición de imágenes digitales fue a través de vuelos en modo manual y puntuales del dron, se utilizó un programa de licencia libre para su análisis, sólo fue necesario un entrenamiento previo para la clasificación de las imágenes y se consiguió una predicción del 70% del rendimiento de la biomasa de pastizales, por lo cual esta metodología modesta es una alternativa viable para ser considerada en estudios posteriores.

Por otro lado, la validación de los modelos de regresión es un aspecto muy importante y para realizarla existen distintas maneras. Entre otras, la retención de datos es la metodología más común para validación de modelos (Neter *et al.*, 1996). Oliveras *et al.*, (2013) retuvieron un 20% de sus muestras para validar sus modelos. En un estudio de para determinar el rendimiento de dos pastos nativos en Noruega Ancin-Murguzur *et al.*, (2019) retuvieron un 25% de las muestras para realizar validación. Bendig *et al.*, (2014) probaron cinco modelos para la estimación de biomasa fresca y seca aérea mediante validación cruzada con el 30% de retención de datos. En nuestro estudio utilizamos el 50% de los datos para realizar la validación al igual que Flombaum y Sala (2007) con un set de datos de 50%. Finalmente, Búrquez y Martínez-Yrizar (2011) recomiendan validar los modelos a través de la comparación de la cosecha directa de la biomasa aérea de años subsiguientes.

4. Conclusiones

En este estudio se presenta un método simple para estimar el rendimiento de la biomasa de pastizales basado en la relación que guarda con la cobertura vegetal, se obtuvo un modelo de regresión aplicable independientemente al estado fenológico de la vegetación y temporada del año. El coeficiente de determinación ($R^2= 0.71$) demuestran que la cobertura vegetal derivada de imágenes RGB basadas en dron es un indicador adecuado para estimar la biomasa. Se probó la calidad del modelo de predicción anual a través de validación cruzada con la retención del 50% de los datos. La variación interanual es una característica inherente a los ecosistemas de pastizal debido a las condiciones climáticas cambiantes, precipitación y uso antrópico, entonces es importante poder validar este modelo encontrado con datos de años posteriores al estudio para para garantizar la solidez y la transferibilidad del modelo encontrado.

5. Información adicional

Se ilustra en la (figura 8) el resumen grafico del procedimiento experimental desarrollado en Sitio Permanente de Muestreo dentro del rancho La Cieneguilla, Durango.



Figura 8. Representación esquemática del procedimiento experimental en el sitio permanente de muestreo
Figure 8. Schematic representation of the experimental procedure at the permanent sampling site

Primer apellido del primer autor *et al.*

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado a través del programa Becas Nacionales para la realización de estudios de Doctorado.

Los autores agradecen las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo de investigación al Sr. Rubén D. Gutiérrez Franco, propietario del rancho ganadero la Cieneguilla.

También se agradece a los alumnos de la FAZ-UJED por el apoyo técnico para el trabajo de campo.

Información de los autores

Amaury Esquivel-Romo^{1,2}  <https://orcid.org/0000-0002-4208-923X>

Alejandro Moreno-Reséndez¹  <https://orcid.org/0000-0001-8858-0190>

Ulises Noel Gutiérrez-Guzmán²  <https://orcid.org/0000-0002-6409-1947> 

Francisco Gerardo Veliz-Deras¹  <https://orcid.org/0000-0002-5105-1508>

Fernando Arellano-Rodríguez¹  <https://orcid.org/0000-0002-6110-5338>

Jorge Arturo Bustamante-Andrade^{1,2}  <https://orcid.org/0000-0003-1642-3916>

María Esther Rios-Vega²  <https://orcid.org/0000-0002-7527-9806>

Apolinar González-Mancilla²  <https://orcid.org/0000-0002-1066-1916>

Contribución de los autores en el desarrollo del trabajo

Conceptualización, AE-R, UNG-G, Análisis formal, AE-R, UNG-G, AM-R, Adquisición de fondos, AE-R, AM-R, FGV-D, Investigación, AE-R, UNG-G, FA-R, JAB-A, Metodología, AE-R, UNG-G, AM-R, Administración de proyectos, AE-R, AM-R, FGV-D, Recursos, UNG-G., JAB-A, MER-V, AG-M, Supervisión y Redacción, UNG-G, FA-R, MER-V, AG-M. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

- Ancin-Murguzur, F.J., Taff, G., Davids, C., Tømmervik, H., Mølmann, J., Jørgensen, M. (2019). Yield Estimates by a Two-Step Approach Using Hyperspectral Methods in Grasslands at High Latitudes. *Remote Sens.*, 11, 400. <https://doi.org/10.3390/rs11040400>
- Barnetson, J., Phinn, S. y Scarth, P. (2020). Estimación de la biomasa y la calidad de los pastos vegetales a partir de imágenes de UAV en los pastizales de Queensland. *AgriEngineering*, 2 (4),523-543. <https://doi.org/10.3390/agriengineering2040035>
- Barrachina, M., Cristóbal, J. and Tulla, A. F. (2015). Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 38 184 –192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.12.002>
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S. and Bareth, G. (2014). Biomass estimation of barley using Crop Area Models (CSM) derived from UAV-based RGB images. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–1041 <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
- Booth, D.T., Cox, S.E., Meikle, T.W. y Fitzgerald, C. (2006). The accuracy of ground-cover measurements. *Rangeland Ecology & Management* 59: 179-188. <https://doi.org/10.2111/05-069R1.1>
- Búrquez, A. y Martínez-Yrizar A. (2011). Accuracy and bias on the estimation of aboveground biomass in the woody vegetation of the Sonoran Desert. *Botany* 89: 625-633. <https://doi.org/10.1139/b11-050>
- Butt, B. M., Turner, D., Singh, A., Brottem, L. (2011). Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. *Remote Sensing of Environment* 115(12):3367–3376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.001>

Título del artículo

- Byrne, K.M., Lauenroth, W.K., Adler, P.B. y Byrne, C.M. (2011). Estimating aboveground net primary production in grasslands: a comparison of nondestructive methods. *Rangeland Ecology & Management* 64: 498-505. <https://doi.org/10.2111/REM-D-10-00145.1>
- Chávez, C. E., Paz P. F., y Bolaños G. M. A. (2017). Estimation of biomass and aerial cover using radiometry and digital images at the field level in grasslands and shrublands. *Terra Latinoamericana*, 35(3), 247-257. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i3.133>
- Chen, Z., Shao, Q., Liu, J., Wang, J. (2012). Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau, based on MODIS remote sensing data. *Science China Earth Sciences* 55(8):1306–1312. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-012-4389-0>
- Chou, Y., Polansky, A.M. y Mason, R.L. (1998). Transforming Nonnormal Data to Normality in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, 30, 133–141. <https://doi.org/10.1080/00224065.1998.11979832>
- Cong, N., Piao, S.L., Chen, A.P., Wang, X.H., Lin, S.P., Chen, S.J., Han, G.S., Zhou, X.P., Zhang. (2012). Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 165:104–113. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.009>
- Cooper, S., Roy, D., Schaaf, C., Paynter, I. (2017). Examination of the potential of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry for rapid nondestructive field measurement of grass biomass. *Remote Sens.* 9, 531. <https://doi.org/10.3390/rs9060531>
- Espinoza, C., Aguilar, A.L., Martínez, E., Gómez L. y Loa E. (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). México, DF. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>
- Everson, T.M., Clarke, G.P.Y. & Everson, C.S. (1990). Precision in monitoring plant species composition in montane grasslands. *Vegetation* 88, 135–141 1990. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00044830>
- Ferrari, D.M., Pozzolo, O.R. & Ferrari, H.J. (2009). CobCal, software for vegetation cover estimation. National Institute of Agricultural Technology, EEA Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina. https://www.produccion-animal.com.ar/software/02-cobertura_vegetal.pdf
- Flombaum, P. y Sala, O.E. (2007). A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. *Journal of Arid Environments* 69: 352-358. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.09.008>
- Gillan, J. K., McClaran, M. P. T., Swetnam, L. y Heilman, P. (2019). Estimating Forage Utilization with Drone-Based Photogrametric Point Clouds. *Rangeland Ecology and Management* 72(4), 575-585. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.02.009>
- Grüner, E., Astor, T. y Wachendorf, M. (2019). Predicción de biomasa de pastizales templados heterogéneos utilizando un enfoque SfM basado en imágenes de UAV. *Agronomía*, 9 (2), 54. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020054>
- Habel, J. C., Dengler, J., Janišová, M., Török, P., Wellstein, C. y Wiek, M. (2013). European grassland ecosystems: threatened hotspots of biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 22(10), 2131-2138. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-013-0537-x>
- Hernández, M. L. A., Medina, C. N., Cabada, T. C. A., Avalos, C. R. (2019). Avances en la aplicación del NDVI para el monitoreo de la biomasa forrajera en un matorral arbocrasicaulescente asociado con pasto buffel. *Campo Experimental Todos Santos*, CIRNO, INIFAP. https://smcsmx.org/files/2022/Si_el_suelo_respira_tu_respiras.pdf
- Lagos, I. J. y Vargas, J. A. (2003). Sistema de familias de distribuciones de Johnson, una alternativa para el manejo de datos no normales en cartas de control. *Revista Colombiana de Estadística*, 26(1), 25-40. <http://dx.doi.org/10.15446/rce>
- Lemaire, G., Hodgson, J. y Chabbi, A. (2011). Grassland productivity and ecosystem services. Cabi. <https://www.cabi.org/bookshop/book/9781845938093/>
- Lussem, U., Bolten, A., Gnyp, M.L., Jasper, J. & Bareth, G. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV images to estimate forage yield in grasslands. *Remote Sens Spatial Inf Sci*, 42, 1215-1219.

Primer apellido del primer autor *et al.*

- <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-3/1215/2018/isprs-archives-XLII-3-1215-2018.pdf>
- MacDonald, R.L., Burke, J.M., Chen, H.Y.H. y Prepas, E.E. 2012. Relationship between aboveground biomass and percent cover of ground vegetation in Canadian boreal plain riparian forests. *Forest Science* 58: 47-53. <https://doi.org/10.5849/forsci.10-129>
- Marrone, L. A. 2017. Caracterización de tráfico-distribución de Johnson SB. In XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/63947/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marsset, R.C., Qi, J., Heilman, P., Sharon, H., Biedenbender, M., Watson, C., Amer S., Weltz, M., Goodrich, D. y Marsset, R. (2006). Remote Sensing for Grassland Management in the Arid Southwest. *Rangeland Ecology and Management* 59: 530–540. <https://doi.org/10.2111/05-201R.1>
- Moreno, G. C. A., Schellberg, J., Ewert, F., Bruser K., Canales-Prati, P., Linstadter, A., Oomen R. J., Ruppert, J. C. & Perelman, S. B. (2014). Response of community-aggregated plant functional traits along grazing gradients: insights from African semi-arid grasslands *Applied Vegetation Science*. 17 470–481. <https://doi.org/10.1111/avsc.12092>
- Morgan, H. R., Reid, N., & Hunter, J. T. (2017). Estimation of aboveground herbaceous biomass using visually ranked digital photographs. *The Rangeland Journal*, 40(1), 9-18. <https://doi.org/10.1071/RJ17033>
- Nafus, A.M., McClaran, M.P., Archer, S.R. y Throop, H.L. (2009). Multispecies allometric models to predict grass biomass in semidesert rangeland. *Rangeland Ecology & Management* 62: 68-72. <https://doi.org/10.2111/08-003>
- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. y Wasserman, W. (1996). *Applied linear regression models*. 3rd ed. Irwin Inc. Chicago IL. 720 p.
- Oliveras, I., Eynden, M.V.D., Malhi, Y., Cahuana, N., Menor, C., Zamora, F. y Haugaasen, T. (2013). Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral Ecology* 39: 408-415. <https://doi.org/10.1111/aec.12098>
- Parr, C. L., Lehmann, C. E., Bond, W. J., Hoffmann, W. A., & Andersen, A. N. 2014. Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. *Trends in ecology & evolution*, 29(4), 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.02.004>
- Possoch, M., Bieker, S., Hoffmeister, D., Bolten, A., Schellberg, J., Bareth, G. (2016). Multi-temporal crop surface models combined with the RGB vegetation index from UAV-based images for forage monitoring in grassland. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 41, 991–998. <https://doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-991-2016>
- Sorensen, G.E., Wester, D.B. y Rideout-Hanzak, S. (2012). A nondestructive method to estimate standing crop of purple threeawn and blue grama. *Rangeland Ecology & Management* 65: 538-542. <https://doi.org/10.2111/REM-D-11-00227.1>
- Symstad, A. J., Cody L., Wienk, and Andy D. Thorstenson. (2008). Precision, Repeatability, and Efficiency of Two Canopy-Cover Estimate Methods in Northern Great Plains Vegetation, *Rangeland Ecology and Management* 61(4), 419-429. <https://doi.org/10.2111/08-010.1>
- Teague, R., Provenza, F., Kreuter, U., Steffens, T., Barnes, M. (2013). Multi-paddock grazing on rangelands: Why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience? *Journal of Environmental Management*. 128: 699-717. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.064>
- Tsutsumi, M., Itano, S. and Shiyomi, M. (2007). Number of Samples Required for Estimating Herbaceous Biomass. *Rangeland Ecology and Management* 60: 447-452. [https://doi.org/10.2111/1551-5028\(2007\)60\[447:NOSRFE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2111/1551-5028(2007)60[447:NOSRFE]2.0.CO;2)
- Vanamburg, L.K., Trlica, M.J., Hoffer, R.M. and Weltz, M.A. (2006). Terrestrial digital images for grassland biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(05), 939-950. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160500114789>

Título del artículo

- Viljanen, N., Honkavaara, E., Näsi, R., Hakala, T., Niemeläinen, O., Kaivosoja, J. A. (2018). Novel Machine Learning Method for Estimating Biomass of Grass Swards Using a Photogrammetric Canopy Height Model, Images and Vegetation Indices Captured by a Drone. *Agriculture*, 8, 70. <https://doi.org/10.3390/agriculture8050070>
- Wang, D., Xin, X., Shao, Q., Brolly, M., Zhu, Z., Chen, J. (2017). Modeling aboveground biomass in hulunber grassland ecosystem by using unmanned aerial vehicle discrete lidar. *Sensors*. 17, 180. <https://doi.org/10.3390/s17010180>
- Xiaoke, Zhang., Xuyang, Lu., Xiaodan, Wang. (2013). Spatial-temporal variation of NDVI of different classes and groups of alpine grasslands in northern Tibet. *Mountain Research and Development*, 35(3), 254-263. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00110.1>
- Zhang, H., Sun, Y., Chang, L., Qin, Y., Chen, J., Qin, Y., Du, J., Yi, S., Wang, Y. (2018). Estimation of Grassland Canopy Height and Aboveground Biomass at the Quadrat Scale Using Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sens*. 10, 851. <https://doi.org/10.3390/rs10060851>

ARTICULO 2

**RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y DOS ÍNDICES DE
VEGETACIÓN OBTENIDOS DE IMÁGENES SATÉLITE SENTINEL 2A EN UN
PASTIZAL DEL ESTADO DE DURANGO**

**RELATIONSHIP BETWEEN BIOMASS PRODUCTION AND TWO
VEGETATION INDICES OBTAINED FROM SENTINEL 2A SATELLITE
IMAGES IN A GRASSLAND IN THE STATE OF DURANGO**

Resumen

La dinámica de la producción de biomasa anual de pastizales es básica para realizar ajustes en la carga animal, se realizó un estudio para encontrar la relación entre la producción de biomasa durante los años 2020 y 2021 con índices de vegetación NDVI y SAVI obtenidas de imágenes de satélites para un sitio de pastizal en el norte del estado de Durango, México. La producción de biomasa se determinó a través corte directo; la unidad de muestreo consistió en cuatro aros de poliducto con un área de 2.01 m², se establecieron 16 estaciones en el predio, se consideraron 10 mediciones en el año 2020 y 11 en el 2021. Por cada fecha de muestreo de biomasa se descargó una imagen Sentinel 2 A, en la cual se calcularon los índices de vegetación NDVI y SAVI. Con la producción de biomasa se determinó una regresión lineal simple con los dos índices considerados como variables independientes. Los resultados obtenidos del análisis de regresión mostraron una relación baja del NDVI (año 2020 $R^2 = 0.26$ y año 2021 $R^2 = 0.23$), lo mismo sucedió con el índice de vegetación SAVI (año 2020 $R^2 = 0.37$ y el año 2021 $R^2 = 0.23$). En ocho meses la vegetación se encuentra en senescencia donde la correlación es nula. Por lo cual, se concluye que los índices tienen la habilidad de predecir la biomasa de pastizales solo en un periodo corto del año correspondiente a la estación de crecimiento de las áreas de pastizal.

Palabras clave: Cobertura vegetal, regresión lineal, imágenes de satélite.

**RELATIONSHIP BETWEEN BIOMASS PRODUCTION AND TWO
VEGETATION INDICES OBTAINED FROM SENTINEL 2A SATELLITE
IMAGES IN A GRASSLAND IN THE STATE OF DURANGO**

Abstract

The dynamics of the annual biomass production of grasslands is basic to make adjustments in the stocking rate, a study was carried out to find the relationship between biomass production during the years 2020 and 2021 with NDVI and SAVI vegetation indices obtained from images of satellites for a pasture site in the north of the state of Durango, Mexico. Biomass production was determined through direct cutting; The sampling unit consisted of four polyduct rings with an area of 2.01 m², 16 stations were established on the property, 10 measurements were considered in 2020 and 11 in 2021. An image was downloaded for each biomass sampling date Sentinel 2 A, in which the NDVI and SAVI vegetation indices were calculated. With biomass production, a simple linear regression was determined with the two indices considered as independent variables. The results obtained from the regression analysis showed a low relationship of the NDVI (year 2020 $R^2 = 0.26$ and year 2021 $R^2 = 0.23$), the same happened with the vegetation index SAVI (year 2020 $R^2 = 0.37$ and year 2021 $R^2 = 0.23$). In eight months the vegetation is in senescence where the correlation is null. Therefore, it is concluded that the indices have the ability to predict the biomass of grasslands only in a short period of the year corresponding to the growing season of the grassland areas.

Keywords: Vegetation cover, linear regression, satellite images.

Introducción

El estado de Durango cuenta con una alta diversidad ecosistémica, sin embargo, prácticamente la mitad del territorio es considerada de manera natural como áreas de pastizal⁽¹⁾. Estas áreas cumplen con funciones ecológicas de gran importancia entre las que

se encuentra la captación de agua, el secuestro de carbono y la estabilidad del sitio a partir de la cobertura vegetal^(2,3,4). El cambio climático, las actividades humanas (pastoreo o recreación), el incremento de las especies invasoras, el sobrepastoreo, la agricultura y la urbanización acompañada del crecimiento de la población han inducido a la desertificación global y la degradación de los pastizales, poniendo en riesgo los servicios y funciones de estos ecosistemas^(5,6). La falta de información sobre la productividad anual de forrajes en los pastizales, ha ocasionado que se desarrollen alternativas a partir del uso de nuevas tecnologías, cuyo rol es decisivo en el monitoreo de estas áreas para facilitar las actividades como el manejo del hato, el ajuste de carga animal y la suplementación⁽⁷⁾. Dichas tecnologías, como la sensoria remota, proveen imágenes multitemporales con la rapidez, calidad y eficacia adecuadas para monitorear la vegetación con menor esfuerzo que los métodos tradicionales⁽⁸⁻¹⁰⁾. En las últimas décadas se han desarrollado diferentes índices de vegetación (VI, por sus siglas en inglés) para obtener información sobre el estado de la vegetación y sus características. Una cubierta vegetal en buen estado de salud tiene una firma espectral, que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (600 y 700 nm), que es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo (700 y 1100 nm), que es reflejada por las plantas⁽¹¹⁾. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) se usa, comúnmente, para evaluar el "vigor" de la vegetación⁽¹²⁾, que puede calcularse por la producción del ecosistema, el NDVI se ha utilizado para medir la productividad primaria neta⁽¹³⁾. El Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) es un índice que intenta minimizar las influencias del resplandor del suelo utilizando un factor de corrección de destello del suelo, éste con frecuencia se utiliza en regiones áridas en donde la cubierta de vegetación es escasa⁽¹⁴⁾. Estos índices tienen una estrecha relación con la variable de productividad de biomasa, lo cual permite su uso para la predicción de la

producción de vegetación⁽¹⁵⁾. Por lo anterior, el objetivo fue determinar el grado de asociación entre las dos variables de estudio, la producción de biomasa y los índices de vegetación NDVI y SAVI obtenidos a partir de imágenes del satélite Sentinel-2, en un sitio de pastizal en el estado de Durango.

Materiales y métodos

Ubicación del área experimental

Este estudio se llevó a cabo en el rancho ganadero de la colonia agrícola y ganadera La Cieneguilla, municipio de Hidalgo Durango, México, con coordenadas 25° 39' N, 104° 39' O, la altura promedio del sitio es de 1910 msnm (Figura 1). El clima predominante en el sitio es estepario, semiárido templado (BS1 kw) y árido semi-cálido (BWhw), presenta dos periodos claros: el periodo de lluvias (agosto-noviembre) y el periodo de seca (diciembre-julio), el promedio de la precipitación anual es de 450 mm y la temperatura promedio anual es de 20 °C⁽¹⁶⁾.



Figura 1. Ubicación geográfica del predio ganadero La Cieneguilla, municipio de Hidalgo Durango.

El suelo es migajón arenoso y migajón arcilloso-arenoso, con pendientes del 1 al 8 %. El tipo de vegetación está clasificado como pastizal natural, con dominancia de *Bouteloua gracilis* (Willd. ex Kunth) Lag. ex Griffiths. El área de estudio está englobada en la Región Hidrológica No. 36 Nazas-Aguanaval⁽¹⁷⁾. El sitio se ubica en la región ganadera prioritaria del estado, el sistema de producción predominante es el sistema vaca-becerro en condiciones extensivas, el mercado principal del sistema es la venta de becerros al destete, para engorda en corrales, a Estados Unidos de América.

Área experimental

El predio ganadero tiene una extensión de 980 ha, dividido en ocho potreros, se seleccionó al azar un potrero con 130 ha. Para la obtención de las variables de estudio se diseñó un sistema de muestreo permanente (SPM), se establecieron 16 puntos de muestreo en el terreno, distribuidos en forma de cuadrícula, tratando de cubrir el área del potrero, en cada punto se fijó al suelo un poste metálico en base a la metodología descrita por Gutiérrez *et al*⁽¹⁷⁾ y se referenció geográficamente a través del uso de un GPS (GARMIN, modelo GPSmap 62). Cada punto se estableció como centro de una parcela de una hectárea de superficie (100 x 100 m), cada parcela se subdividió en cuatro subparcelas de (25 x 25 m), cada parcela se denominó estación de muestreo EM (Figura 2).

Variables evaluadas

Las variables del estudio fueron; el rendimiento de producción de biomasa (variable dependiente), la cual se determinó en una superficie de 1 ha y la frecuencia fue un día al mes durante dos años consecutivos y los valores de NDVI y SAVI como (variables independientes).

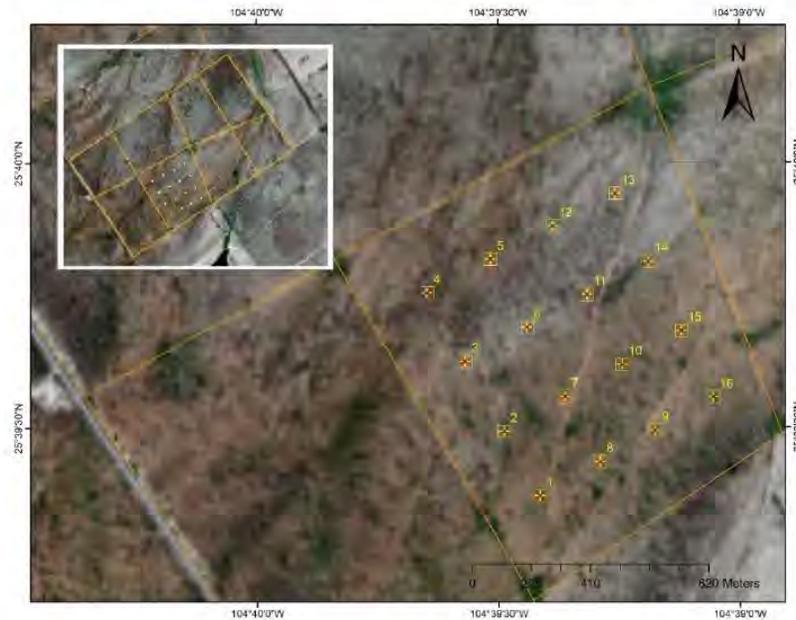


Figura 2. Ubicación geográfica de sitio de muestreo permanente dentro del predio ganadero La Cieneguilla, municipio de Hidalgo Durango.

Para obtener el valor del NDVI para los puntos de biomasa, establecidos dentro del rancho la Cieneguilla, se procedió a realizar lo siguiente: de la base de datos Copernicus, de la agencia espacial de la Unión Europea, se obtuvo la información de imágenes de alta resolución que genera el satélite Sentinel-2, usando específicamente las bandas 4 y 8, que corresponden a las bandas rojo e infrarrojo cercano, respectivamente, una vez que se obtuvieron estos archivos, se procedió a trabajar en el programa ArcMap 10.4.1, se empleó la calculadora Ráster y usando las ecuaciones de Rouse *et al*⁽¹⁸⁾ el $NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R}$ y de Huete⁽¹⁹⁾, respectivamente, el $SAVI = \frac{IRC-R}{IRC+R} * (1 + L)$, posterior a ello se generó una imagen con los valores de NDVI (Figura 3) y SAVI (Figura 4) para el área de estudio, al final se superpusieron los puntos de biomasa, previamente georreferenciados, y se ejecutó una extracción de valores de puntos empleando la herramienta *Spatial Analys Tools*, con la cual

se generó un archivo con extensión “.dbf”, que contiene los valores de los índices, este archivo se puede visualizar utilizando el programa Microsoft Excel 365. La cobertura vegetal del potrero seleccionado para los años 2020 y 2021 fue de 24%, por consecuencia el porcentaje de suelo desnudo fue de 76 %, este valor fue utilizado para el cálculo del índice de vegetación SAVI considerándolo como valor de ajuste de suelo.

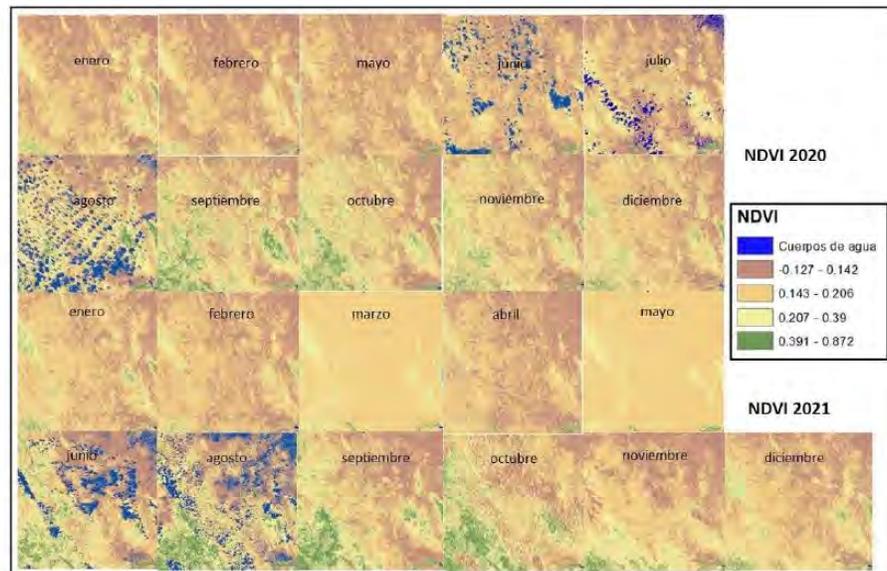


Figura 3. Mosaico de imágenes generadas a partir del índice de vegetación NDVI, en los años 2020 y 2021, del predio ganadero la Cieneguilla, municipio de Hidalgo Durango.

En referencia a la relación entre la variable dependiente, producción de biomasa, con respecto a las variables independientes, índices de vegetación NDVI y SAVI, se utilizó un modelo de regresión lineal simple para calcular el grado de asociación entre éstas, a partir de la determinación de la R^2 , el conjunto de datos fueron analizados con el software Minitab 18, a través de estadística descriptiva.

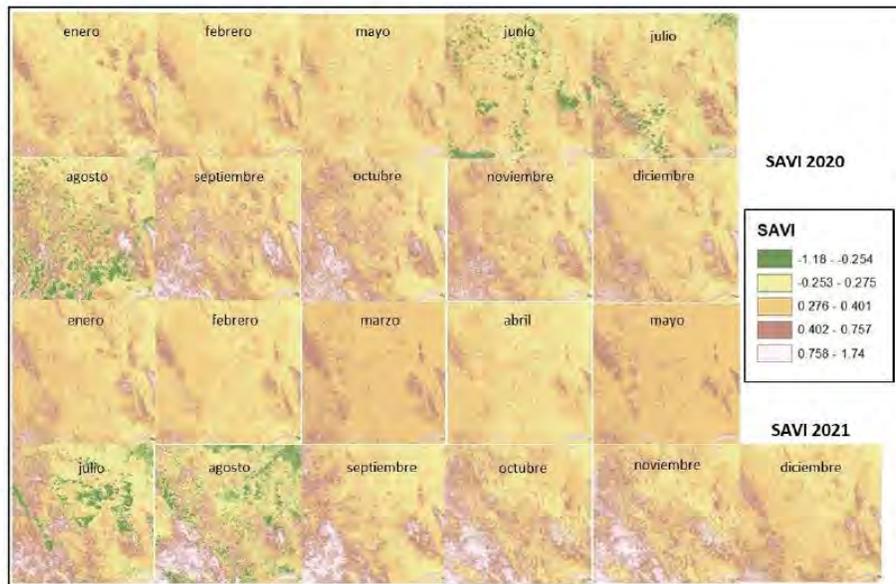


Figura 4. Mosaico de imágenes generadas a partir del índice de vegetación SAVI, en los años 2020 y 2021, del rancho ganadero la Cieneguilla, municipio de Hidalgo Durango.

En las áreas de pastizal del estado de Durango se cuenta con dos temporadas muy marcadas, en cuanto al régimen de precipitación, para este análisis se consideraron 640 datos registrados en el año 2020, sin considerar los datos de los meses de marzo y abril debido a la pandemia del Covid-19 y 740 datos registrados en el 2021, sin considerar los datos del mes de junio debido a problemas de conexión entre el Dron y el control. Con los cuales se obtuvieron valores de producción de biomasa (gramos por metro cuadrado), y los valores de NDVI y SAVI con el programa Minitab 18.

Resultados y discusión

Producción de biomasa

En el (Cuadro 1) se puede apreciar la producción de biomasa para el año 2020 fue de 13.81 g/m^2 , mientras que para el año 2021 fue de 19.52 g/m^2 . Los valores promedio del índice de vegetación NDVI fueron 0.24 para el año 2020, mientras que para el año 2021 el valor

promedio fue de 0.25, en lo que respecta al índice de vegetación SAVI los valores promedio fueron de 0.46 para el año 2020, y para el año 2021 fue 0.40.

En este sentido, la variable de producción de biomasa es la más importante en jerarquía debido a que se ve afectada por el clima y la biodiversidad^(20,21), además refleja el crecimiento de las plantas al usar la energía solar, y se involucran conceptos como rendimiento y producción^(22,23). Asimismo, su determinación se puede utilizar como pieza clave para monitorear los impactos del cambio climático mediante actividades humanas a corto y largo plazo⁽²⁴⁾. Por lo tanto, la biomasa es uno de los parámetros prioritarios para determinar el comportamiento productivo de los sitios de pastizal^(25,26).

Cuadro 1. Estadística descriptiva de la producción de biomasa aérea y de los índices de vegetación: NDVI y SAVI en el rancho ganadero La Cieneguilla, municipio Hidalgo, Durango.

Año	Variable	N	Media	Error estándar de		Mediana	Máximo	Rango	Asimetría
				la media	Mínimo				
2020	Biomasa (g/m ²)	640	13.81	0.55	0.50	7.96	97.02	96.52	1.41
	NDVI	640	0.24	0.00	0.13	0.20	0.59	0.46	1.16
	SAVI	640	0.46	0.01	0.19	0.38	1.18	0.99	1.21
2021	Biomasa (g/m ²)	704	19.52	0.40	0.10	17.91	81.60	80.60	1.13
	NDVI	704	0.25	0.00	0.11	0.23	0.50	0.39	0.73
	SAVI	704	0.40	0.00	0.22	0.36	0.83	0.61	1.20

N= Número de observaciones.

Índices de vegetación

En referencia a la variable de índices de vegetación, el NDVI tuvo un comportamiento de predicción de la cobertura vegetal de 26 % para el año 2020, (Figura 5) mientras que para el año 2021 fue de 23.1 %, producto del modelo de regresión lineal con respecto a la producción de biomasa.

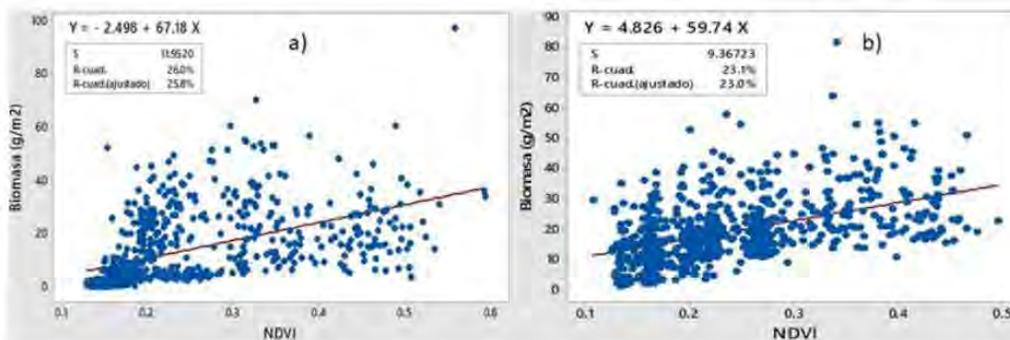


Figura 5. Modelo de regresión lineal simple entre el NDVI (a, año 2020 y b, año 2021) y la producción de biomasa en el rancho ganadero la Cieneguilla, municipio de Hidalgo, Durango.

Sin embargo, los resultados obtenidos, contrastan con lo reportado por Lussem *et al*⁽²⁷⁾, quienes realizaron una estimación de la biomasa en pastizales templados con modelos de superficie de dosel de alta resolución a partir de imágenes *Red, Green and Blue* (RGB) e índices de vegetación basados en *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), y determinaron resultados de R^2 de 0.57 a 0.73, con lo cual se establece que es necesario llevar a cabo la combinación de metodologías más objetivas, para encontrar una correlación positiva, en función de lo que se esperaba fuera que existieran discrepancias entre la reflectancia de la cobertura vegetal y el recurso suelo, en los dos índices utilizados, por corresponder a una alternativa de bajo costo situación que no ocurrió, tomando en cuenta la colorimetría que refleja la vegetación nativa de los pastizales. En contraste, en trabajos realizados en cultivos

donde es muy notoria la diferencia de color, con respecto al suelo en las diferentes etapas fenológicas, la correlación oscila entre 0.63 y 0.90 tal y como lo muestran los resultados encontrados por valores que concuerdan con los resultados reportados por Niu et al⁽²⁸⁾, quienes 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. Por lo cual se establece que las relaciones entre las variables evaluadas en este estudio fueron muy bajas, a consecuencia de la mínima diferencia entre el suelo y la vegetación nativa del sitio de pastizal.

Tomando en cuenta los estudios mencionados anteriormente, se establece que es prioritario replicar el estudio con la combinación de otras metodologías, para generar contrastes entre la cobertura vegetal y el suelo tal como lo reportan Niu et al; Nagler et al; Fensholt et al⁽²⁸⁻³⁰⁾ quienes relacionaron la fotosíntesis y la producción primaria de la vegetación. Tomando en cuenta lo anterior, esta metodología sigue vigente como opción para medir la producción de biomasa en los sitios de pastizal, siempre y cuando exista variabilidad en la reflectancia de la cobertura vegetal en cuanto a la colorimetría de la biomasa tal y como lo reportan Nagler et al; Fensholt et al; Wilson & Norman^(29,31).

En lo que respecta al SAVI mostro un comportamiento de predicción de la producción de biomasa de 37.6 % para el año 2020, y para el año 2021 de 23.5 % (Figura 6), dichos valores porcentuales indican que la predicción de la productividad de biomasa, a partir del SAVI resultan bajos debido a que no existe correlación con respecto a la variable dependiente, dicho comportamiento se puede explicar con el fundamento de que; éste índice no detecta la variabilidad en la colorimetría del suelo con respecto a la vegetación senescente a lo largo del año.

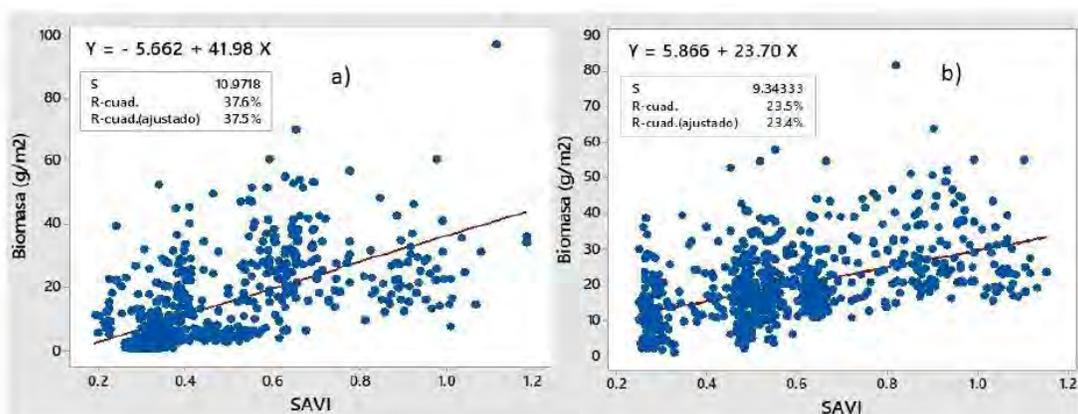


Figura 6. Modelo de regresión lineal simple entre el índice de vegetación SAVI (a año 2020 y b año 2021) y la producción de biomasa en el rancho ganadero la Cieneguilla, municipio de Hidalgo, Durango.

Es fundamental establecer planes de gestión en el manejo de los sitios de pastizal, en función de que existen fluctuaciones en espacio y tiempo de la biomasa que representan un indicador correspondiente a la dinámica de estos ecosistemas. Y el uso de los índices de vegetación representa una alternativa de bajo costo los productores⁽³²⁾. Sin embargo, Gonzaga⁽³³⁾ reporta que esta metodología, es ampliamente utilizada siempre y cuando no existan fluctuaciones en la vegetación en los sitios de muestreo, en referencia a la colorimetría del suelo que en determinada estación del año no se diferencia del color de la biomasa lo cual se traduce en errores en la determinación de los modelos de regresión, dicha información coincide con lo reportado por Huete⁽³⁴⁾. Situación que explica la mínima discrepancia encontrada entre la producción de biomasa obtenida, con los valores bajos de R^2 generados con los dos índices de vegetación calculados.

Conclusiones

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, en referencia a la producción de biomasa aérea en corte directo, con respecto a la predicción de la productividad de la

cobertura vegetal con el uso de índices de vegetación, se establece que los resultados no soportan la hipótesis de trabajo, debido que el uso de estos índices de vegetación solo predicen de un 23-37 % de la producción de biomasa aérea en este sitio de pastizal, debido a que la forma en la cual se lleva a cabo, el contraste de la colorimetría que refleja la vegetación a lo largo del año es relativa, por tal razón no existe correlación entre la variable dependiente producción de biomasa aérea por corte directo y las variables independientes que son los índices de vegetación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado a través del programa Becas Nacionales para la realización de estudios de Doctorado. Los autores agradecen las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo de investigación al Sr. Rubén D. Gutiérrez Franco, propietario del rancho ganadero la Cieneguilla. También se agradecer a los alumnos de la FAZ-UJED por el apoyo técnico para el trabajo de campo.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

1. Elizondo MSG, Elizondo MG, y Linares MAM. Vegetación y ecorregiones de Durango. Plaza y Valdés. 2007.
2. White RP, Murray S, Rohweder M, Prince SD, y Thompson KM. *Grassland ecosystems* 2000. (p. 81). Washington, DC, USA: World Resources Institute.
3. Xu D, y Guo X. Some Insights on Grassland Health Assessment Based on Remote Sensing. *Sensors*, 2015. 15(2), 3070–3089. <https://doi.org/10.3390/s150203070>

4. Layke C, Mapendembe A, Brown C, Walpole M. y Winn J. Indicadores de las Evaluaciones de Ecosistemas del Milenio globales y subglobales: un análisis y próximos pasos. *Indicadores ecológicos*. 2012. 17, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.025>
5. Jin Y, Yang X, Qiu J, Li J, Gao T, Wu Q, Zhao F, Ma H, Yu H, & Xu B. Remote Sensing-Based Biomass Estimation and Its Spatio-Temporal Variations in Temperate Grassland, Northern China. *Remote Sensing*, 2014. 6(2), 1496–1513. <https://doi.org/10.3390/rs6021496>
6. Cheng X, An S, Chen J, Li B, Liu Y, & Liu S. Spatial relationships among species, above-ground biomass, N, and P in degraded grasslands in Ordos Plateau, northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2007. 68(4), 652-667. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.07.006>
7. Hernández MLA, Medina CN, Cabada TCA, Avalos CR. Avances en la aplicación del NDVI para el monitoreo de la biomasa forrajera en un matorral arbocrasicaulescente asociado con pasto buffel. Campo Experimental Todos Santos, 2019. CIRNO, INIFAP.
8. Muñoz AP. Apuntes de teledetección: Índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales, Información para el Desarrollo y la Innovación. 2013. Pag. 1-15.
9. Gaitán JJ, Bran D, Oliva G, Ciari G, Nakamatsu V, Salomone J. y Maestre FT. Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological indicators*. 2013. 34, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.05.007>
10. Cabada TCA, Hernández MLA y Medina CNJ. Implementación de vehículos aéreos no tripulados y sensores remotos para el monitoreo de la biomasa forrajera en zonas áridas.

Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias. La Paz, Baja California Sur, México. 2019. pp 1-2.

11. Carvacho BL. and Sánchez MM. Comparison of vegetation indices from MODIS in the region of Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, in the period 2001-2005. 2010. <http://hdl.handle.net/11441/66614>
12. Paruelo JM, Epstein HE, Lauenroth WK, & Burke IC. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1997. 78(3), 953-958. <https://doi.org/10.2307/2266073>
13. Zhang B, Zhang L, Xie D, Yin X, Liu C, & Liu G. Application of synthetic NDVI time series blended from Landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. *Remote Sensing*, 2015. 8(1), 10. <https://doi.org/10.3390/rs8010010>
14. Ren H, Zhou G, y Zhang X. Estimación de la biomasa aérea verde de la estepa desértica en Mongolia Interior basada en el método del área de la curva de reflectancia de borde rojo. *Ingeniería de biosistemas*. 2011. 109 (4), 385-395. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.004>
15. González L, Paredes P. and Rial P. Severity of drought in Santa Cruz. Evaluation through vegetation indices of MODIS images. 2009. In: B. G. Díaz and Y P. Calviño (eds).
16. Espinoza CL. Aguilar AE. Martínez L. Gómez EL. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). 2000. México, DF.
17. Gutiérrez GUN, Castellanos PE, Quiñones VJJ, Serrato CJS, Martínez RJJ, Orona CI, Chairez HI. Cobertura vegetal estimada por fotografías digitales relacionada con la biomasa en un sitio de pastizal del norte de México. *Revista internacional de botánica Experimental FYTON*. 2015. ISSN 0031 9457 (2015) 84: 312-318

18. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, and Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) Third Earth Resources Technology Satellite-1 1974. Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C. pp. 309-317.
19. Huete AR. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 1988. 25 : 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
20. Bernhardt-Römermann M, Römermann C, Sperlich S, & Schmidt W. Explaining grassland biomass—the contribution of climate, species and functional diversity depends on fertilization and mowing frequency. *Journal of Applied Ecology*. 2011. 48(5), 1088-1097. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01968.x> Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation. A review. *Wetl. Ecol. Manag.* (2010). 18, 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>
21. Ding L, Li Z, Shen B, Wang X, Xu D, Yan R, & Wang P. Spatial patterns and driving factors of aboveground and belowground biomass over the eastern Eurasian steppe. *Science of The Total Environment*. 2022. 803, 149700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149700>
22. Hensgen F, Bühle L. y Wachendorf M. 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.* 2016. 216:283–292. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.009>
23. Zheng C, Abd-Elrahman A, Whitaker V, & Dalid C. Prediction of Strawberry Dry Biomass from UAV Multispectral Imagery Using Multiple Machine Learning Methods. *Remote Sensing*, 2022. 14(18), 4511. <https://doi.org/10.3390/rs14184511>

24. Schulze-Brüninghoff, D, Hensgen F, Wachendorf M y Astor T. Methods for LiDAR-based estimation of extensive grassland biomass. *Comput. Electron. Agric.* 2019. 156:693–699.
25. Psomas A, Kneubühler M, Huber S, Itten K and Zimmermann NE. Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats. *International Journal of Remote Sensing* 2011. 32: 9007-9031. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.532172>
26. Campos-Taberner M, García-Haro FJ, Camps-Valls G, Grau-Muedra G, Nutini F, Crema A, & Boschetti M. Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring. *Remote Sensing of Environment*. 2016. 187, 102-118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.009>
27. Lussem U, Bolten A, Menne J, Gnyp ML, Schellberg J, & Bareth G. Estimating biomass in temperate grassland with high resolution canopy surface models from UAV-based RGB images and vegetation indices. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019. 13(3), 034525. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.034525>
28. Niu Y, Zhang L, Zhang H, Han W, y Peng W. Estimating above-ground biomass of maize using features derived from UAV-based RGB imagery. *Remote Sensing*, 2019. 11(11), 1261. <https://doi.org/10.3390/rs11111261>
29. Nagler PL, Glenn EP, Thompson TL, & Huete A. Leaf area index and normalized difference vegetation index as predictors of canopy characteristics and light interception by riparian species on the Lower Colorado River. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004. 125(1-2), 1-17 <https://doi:10.1016/j.agrformet.2004.03.008>
30. Fensholt R, Sandholt I, & Rasmussen MS. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ

- measurements. *Remote sensing of Environment*. 2004 .91(3-4), 490-507. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.04.009>
31. Wilson NR, & Norman LM. Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDVI) and normalized difference vegetation index (NDVI). *International Journal of Remote Sensing*, 2018. 39(10), 3243-3274. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1437297>
 32. Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review. *Wetl. Ecol. Manag.* 2010. 18, 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>
 33. Gonzaga C. Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales para análisis de Coberturas Vegetales en la Provincia de Loja, Ecuador. 31 Revista Cedama. 2015. Vol. 5. N° 1. Pp.30-41. Recuperado de: <http://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/43/41>
 34. Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 2002. 83, 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
 35. Sánchez-Rodríguez E, Torres-Crespo MÁ, Fernández-Palacios C, Aguilar-Alba AM, Pino-Serrato IL, & Granado Ruiz L. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimación del riesgo de incendios en Andalucía. In *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible: Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativo, SIG y Teledetección 2000. (9º. 2000. Alcalá de Henares)*. Universidad de Alcalá. Asociación de Geógrafos Españoles.

CONCLUSIÓN GENERAL

El uso y análisis de imágenes capturadas por sensores en satélites y vehículos aéreos no tripulados (VANT) facilitaron la evaluación de la producción de biomasa y la determinación de la distribución espacial de la vegetación en un pastizal del Estado de Durango. Además, el uso de herramientas y técnicas de fotogrametría permitió calcular la productividad del pastizal considerando la biomasa como variable, así como la cuantificación y ubicación geográfica de las especies presentes en el área de estudio. Finalmente, al utilizar índices de vegetación, se determinó la condición de los pastizales en cuanto al vigor y salud de la vegetación durante el periodo de evaluación.

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. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070344>
- 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. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw005>
- Alvarado, C., Leandro, A., y Sarango, D. 2019. Comparación de Índices de Vegetación con imágenes Landsat usando la computación en la nube: zona Pampa de Majes-Siguas, Arequipa Perú, *Rev. Inv. de Física*, 22(1). 27-34. <https://doi.org/10.15381/rif.v22i1.20280>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S2040470017000838>
- Aristizábal, D. J. 2011. Desarrollo de modelos de fitomasa aérea en sombríos de caféto (*Coffea arabica* L.) mediante datos simulados. *Rev. U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 14(1). 49-56. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n1.2011.756>
- Bai, Y., y Cotrufo, M. F. 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 377(6606). 603-608. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>
- 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. <http://dx.doi.org/10.2307/4002919>
- Batistoti, J., J. Marcato, L. Itavo, 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. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11202447>
- Bellocchi, G. y A. Chabbi. 2020. Grassland management for sustainable agroecosystems. *Agronomy*. 10: 3–7. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010078>

- Berlanga, H., J. A. Kennedy, T. D. Rich, M. C. Arizmendi, C. J. Beardmore, P. J. Blancher, G. S. Butcher, A. R. Couturier, A. A. Dayer, D. W. Demarest, W. E. Easton, M. Gustafson, E. Inigo-Elias, E. A. Krebs, A. O. Panjabi, V. Rodriguez-Contreras, K. V. Rosenberg, J. M. Ruth, E. Santana-Castellon, R. M. Vidal y T. Will 2010. Conservando a nuestras aves compartidas: la visión trinacional de Compañeros en Vuelo para la conservación de las aves terrestres, Cornell Lab. Of Ornithology, Ithaca, Nueva York. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2947.9529>
- Bernal, J. L. C., Cuenca, L. A. B., y Ortega, Y. B. S. 2020. Producción ganadera: la deforestación y degradación del suelo, una estrategia para el desarrollo sostenible. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(1). 77-82. <https://aes.ucf.edu/cu/index.php/aes/article/view/389>
- Bonet, F.J. 2004. Caracterización de la dinámica Vegetal en el parque Natural de Sierra de Huétor (Granada, España) mediante el uso de SIG. En: Conesa, C., Álvarez, Y., Martínez, J. B. (eds.), Medio Ambiente, recursos y riesgos naturales: Análisis mediante tecnología SIG y Teledetección, I. 141-153. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>
- Cabada, T. C. A. Hernández, M.L.A y Medina, C.N.J. 2019. Implementación de vehículos aéreos no tripulados y sensores remotos para el monitoreo de la fitomasa forrajera en zonas áridas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. La Paz B.C. Sur, México. 1-2.
- Castano-Marín, A. M., Riaño-Herrera, N. M., Peña-Quiñones, A. J., Ramírez-Builes, V. H., Valencia-Salazar, A., Figueroa-Casas, A., y Góez-Vinasco, G. A. 2017. Energy, water vapor and carbon fluxes in Andean agroecosystems: conceptualization and methodological standardization. *Acta Agronómica*, 66(1). 27-34. <https://doi.org/10.15446/acaq.v66n1.52543>
- Castro, W., J. M. Junior, C. Polidoro, L. P. Osco, W. Gonçalves, L. Rodríguez, 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. <https://doi.org/10.3390/s20174802>
- Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) 2010. Pastizales de América del Norte Montreal Quebec, Canadá. info@cec.org/www.cec.org/paq1-4
- Cornejo-Denman, L., Romo-León, J. R., Hartfield, K., van Leeuwen, W. J., Ponce-Campos, G. E., y Castellanos-Villegas, A. 2020. Landscape dynamics in an iconic watershed of Northwestern México: Vegetation condition insights using landsat and planetscope data. *Remote Sensing*, 12(16). 2519. <https://doi.org/10.3390/rs12162519>

- Cruz-Flores, D.D., Curbelo Benítez, E.A., Ferrer-Sánchez, Y., Ávila, D.D. 2020. Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas* 29(1): 1885. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>
- De León-Mata, G. D., Álvarez, A. P., y Guerrero, J. H. M. 2014. Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (84). 42-53. <https://doi.org/10.14350/riq.36568>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09716-4>
- Enciso, J., C. A. Ávila, J. Jung, S. Elsayed-Farag, A. Chang, J. Yeom, J. Landivar, M. Maeda y J. C. Chávez. 2019. Validation of agronomic UAV and field measurements for tomato varieties. *Comput. Electron. Agric.* 158:278. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.011>
- Feeley, K.J., Gillespie, T., Terborgh, J. 2005. The utility of spectral indices from lysat ETM+ for measuring the structure y composition of tropical dry forests. *Biotrópica* 37(4): 508-519. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00069.x>
- Fernandez Lozano, J, Gutiérrez-Alonso, G, Calabrés-Tomé, S, y García-Talegón, J. (2016). Drones: Nuevas aplicaciones geomáticas en el campo de las Ciencias de la Tierra. En IX Congreso Geológico de España (pp. 725-728).
- Flores, M. F, Vega-Nieva, D. J, Corral-Rivas, J. J, Álvarez-González, J. G, Ruiz-González, A. D, López-Sánchez, C. A, y Carrillo, A. 2018. Desarrollo de ecuaciones alométricas de fitomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46). 157-185. <http://doi:10.29298/rmcf.v9i46.119>
- Fu, H, C. Wang, G. Cui, W. She y L. Zhao. 2021. Ramie yield estimation based on UAV RGB images. *Sensors*, 21(2). 669. <https://doi.org/10.3390/s21020669>
- García, M, E. Sanz Ablanedo y J. R. Rodríguez Pérez. 2021. High-resolution drone acquired RGB imagery to estimate spatial grape quality variability. *Agronomy*. 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040655>
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs61110335>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.02.009>
- Gonzaga, C.A. 2015. Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *Revista CEDAMAZ* 5(1): 30-4.
- 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. <https://doi.org/10.3390/s20185130>
- Havstad, K. M, Peters, D. P, Skaggs, R, Brown, J, Bestelmeyer, B., Fredrickson, E., y Wright, J. 2007. Ecological services to and from rangelands of the United States. *Ecological Economics*, 64(2). 261-268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.12.001>
- Hernández-Ramos, A, Cano-Pineda, A, Flores-López, C, Hernández-Ramos, J, García-Cuevas, X., Martínez-Salvador, M., & Martínez Ángel, L. (2019). Modelos para estimar fitomasa de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521806>
- Herrera, M, Porras, L, y Estrella, C. 2018. Propuesta de declaración del espectro electromagnético para Ecuador. *Revista Geoespacial*, 15(1). 15-32. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v15i1.1356>
- Hobbs, R. J. y L. F. Huenneke. 1992. Disturbance, Diversity, and Invasion: Implications for Conservation. *Conserv. Biol.* 6: 324-337. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.06030324.x>
- Hoekstra, M. J, Boucher, M.T, Ricketts, H. T, Roberts, C. 2005. Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection. *Ecology Letters*. 8: 23-29. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00686.x>
- Hoth, J. 2009. Chihuahuan desert lessons: there is much the deserts of North America can teach the world about grasslands conservation. *World Wildlife Fund, Chihuahuan desert program* [http://www.pcap-sk.org/docs/5_resandlit/Chihuahuan_Desert_lessons_BC_Grasslands_2008-09.pdf 11 de Julio de 2013]
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25. 53–70. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

- Jurado-Guerra, P, Velázquez-Martínez, M, Sánchez-Gutiérrez, R. A, Álvarez-Holguín, A, Domínguez-Martínez, P. A, Gutiérrez-Luna, R, y Chávez-Ruiz, M. G. 2021. Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: Estatus actual, retos y perspectivas. *Rev. Mex. de cien. pecuarias*, 12, 261-285. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875>
- Macias-Duarte y Panjabi, O. A. 2013. Association of Habitat Characteristics with Winter Survival of Declining Grassland Bird in Chihuahuan Desert Grasslands of México. *The Auk* 130 (1): 141-149. <https://doi.org/10.1525/auk.2012.12047>
- Macias-Duarte, A, A. O. Panjabi, D. Pool, Erin Youngberg y Greg Levandoski. 2011. Wintering Grassland Bird Density in Chihuahuan Desert Grassland Priority Conservation Areas, 2007-2011. Rocky Mountain Bird Observatory, Brighton, CO.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107494>
- Martínez-Barbáchano, R, y Solís-Miranda, G. A. 2018. Caracterización espectral y detección de Flecha Seca en palma africana en Puntarenas, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*. 61 ISSN 1011-484X, julio-diciembre 2018 ISSN 1011-484X, julio-diciembre 2018 *Revista Geográfica de América Central* 61: 349–377 <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.13>
- Matthews, E, Payne, R, Rohweder, M, y Murray, S. 2000. *Pilot analysis of global ecosystems: forest ecosystems*. World Resources Institute. ISBN : 1569734593 Publisher: World Resources Institute Country of publication : USA Language of text : English
- Matthews, H, Taylor, M, Percy-Smith, B, y Limb, M. 2000. The unacceptable flaneur: The shopping mall as a teenage hangout. *Childhood*, 7(3). 279-294. <https://doi.org/10.1177/0907568200007003003>
- Muñoz, A. P. 2013 Apuntes de teledetección: Índices de vegetación. Centro de información de recursos naturales, información para el desarrollo y la innovación 1-15. CIREN. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>
- Murphy, M.T. 2003. Avian Population Trends within the evolving agricultural landscape of eastern and central United States. *The Auk* 120(1): 20. <https://doi.org/10.1093/auk/120.1.20>
- Neigh, C.S.R, Tucker, C.J, Townshend, J.R.G. 2008. North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing Environment*, 112: 1749-1772. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.018>

- 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. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- 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>
- Padilla, C, G. Crespo y Y. Sardiñas. 2009. Degradación y recuperación de pastizales. *Rev. Cuba. Cienc. Agrícola*. 43: 351–354.
- Palacios-Sánchez, L. A, Paz-Pellat, F, Oropeza-Mota, J. L, Figueroa-Sandoval, B, Martínez-Menez, M, Ortiz-Solorio, C. A, y Exebio-García, A. 2018. Corrector atmosférico en imágenes Landsat. *Terra Latinoamericana*, 36(4). 309-321. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.232>
- Pinto, J. 2006, Evolución del paisaje y estado de conservación de la reserva forestal El Chore, Kempffiana, 2(1). 45-56.
- Porté, A. 2002. Allometric relationship for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecol. and Manag*, 158. 71-83. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00673-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00673-3)
- 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.
- Romero, F. S. 2006. La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*. *Revista AquaTIC*, 24. 13-41. <http://www.revistaaquatic.com/aquatic/art.asp?t=p&c=196>
- Rouse, J.W, Haas, R.W, Schell, J.A, Deering, D.H, Harían, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT. Greenbelt, MD, Estados Unidos.
- Sacristán, F. 2006. La tecnología al servicio del medio ambiente. *Revista Cubana de Meteorología* 13. 1: 51-55. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/281>
- Safari, H, T. Fricke y M. Wachendorf. 2016. Determination of fiber and protein content in heterogeneous pastures using field spectroscopy and ultrasonic

- sward height measurements. *Comput. Electron. Agric.* 123: 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.002>
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- Samson, F. B, F. L. Knopf, y W. R. Ostlie. 2004. Great Plains Ecosystems: Past, present, and future. *Wildlife Society Bulletin* 32: 6–15. [https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2004\)32\[6:GPEPPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)32[6:GPEPPA]2.0.CO;2)
- Sánchez, C. S, A. Flores M. I. A, Cruz L. y A. Velázquez. 2009. “Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas”, en Dirzo, R., R. González y I. J. March (coords.), *El capital natural de México: estado de conservación y tendencias de cambio*, II, 75-129.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.04.002>
- Senra, A. 2009. Impacto del manejo del ecosistema del pastizal en la fertilidad natural y sostenibilidad del suelo. *Avances en investigación agropecuaria*, 13(2). 3-16.
- 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 semidesert grasslands. *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10091358>
- Solano, D, Vega. C, Eras. V. H, y Cueva, K. 2014. Generación de modelos alométricos para determinar fitomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. 4(1). 32-44.
- Soussana, J. F, y Lüscher. A. 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. *Grass and forage science*, 62(2). 127-134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00577.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106201>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105903>
- Van, C. E, Vanierschot, L, Fernández-Castilla, B, Honnay, O, y Somers, B. 2018. The functional characterization of grass-and shrubland ecosystems using hyperspectral remote sensing: trends, accuracy, and moderating variables. *Remote Sens of Environment*, 209: 747-763. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.030>
- Veneros, J, García, L, Morales, E, Gómez, V, Torres, M, y López-Morales, F. 2020. Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4). 99-107. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
- 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807354116>
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- WRI, 2000. Taking stock of Ecosystems-Grasslands ecosystems, in *World resources 2000-2001: People and Ecosystems (Chapter 2)*, The fraying web of life, World Resources Institute, ISBN1-56973-443-7; 119-131.
- Wulder, M. A. 1998. Optical remote sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters, *Progress in Physical Geography*, 22 (4), 449-476. <https://doi.org/10.1177/030913339802200402>
- Wynne, R. H, R. G. Oderwald, G. A. Reams y J. A. Scrivani. 2000. Optical remote sensing for forest area estimation, *Journal of Forestry*, 98: 31-36. <https://doi.org/10.1093/jof/98.5.31>
- 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: 106-155. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106155>
- 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.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612011000100005&lng=es&tlng=es.

Zhao, Y, Liu, Z. y Wu, J. 2020. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecol* 35, 793–814. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00980-3>