



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CARRERA DE AGRONOMÍA

Trabajo de Integración Curricular
previo a obtención del Grado
Académico de Ingeniero Agrónomo

Título del Proyecto de Investigación:

“ESTIMACIÓN DE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN GENOTIPOS DE PASTOS
TROPICALES *Brachiaria* y *Megathyrus* BAJO IMÁGENES ESPECTRALES
OBTENIDAS DE SENSORES REMOTOS”

Autor:

Bryan Nery Vélez Tipan

Director del Proyecto de Investigación:

Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Bryan Nery Vélez Tipan**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente;

Bryan Nery Vélez Tipan
C.C.: 1205407644
Autor



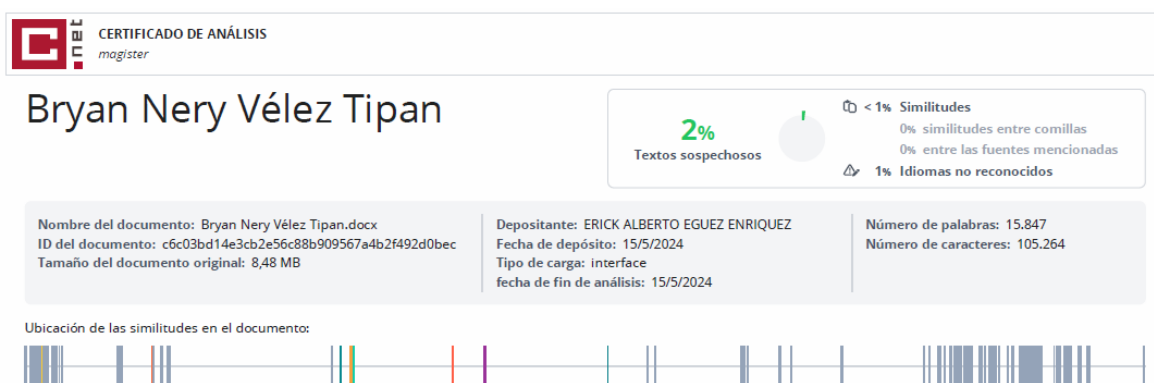
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito **Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que la estudiante **Bryan Nery Vélez Tipan**, realizó el Proyecto de Investigación titulado “**Estimación de índice de área foliar en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* bajo imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos**”, previo a la obtención del Grado Académico de Ingeniero Agrónomo, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.
Director del Proyecto de Investigación

REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito **Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.**, mediante el presente cumpto en presentar a usted, el informe de proyecto de investigación titulado “**Estimación de índice de área foliar en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* bajo imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos**” presentado por el estudiante **Bryan Nery Vélez Tipan**, egresado de la carrera de Agronomía, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis de COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 98 % y similitud 2 %, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el reglamento.



Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.
Director del Proyecto de Investigación



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CARRERA DE AGRONOMÍA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Estimación de índice de área foliar en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* bajo imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos”

Presentado a la Comisión Académica como requisito previo a la obtención del título
de **Ingeniero Agrónomo**

Aprobado por:

Presidente del Tribunal
Ing. Víctor Guamán Sarango, PhD.

Miembro del Tribunal
Ing. César Bermeo Toledo, M. Sc.

Miembro del Tribunal
Ing. Carlos Sánchez Fonseca, PhD.

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2024

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la guía espiritual durante todo el proceso de este proyecto de investigación. Su infinita misericordia ha sido mi inspiración y sostén en cada paso que he dado.

A mis padres, quienes han sido mi apoyo inquebrantable desde el inicio de esta travesía académica, por su apoyo constante y nunca dejarme solo.

A mi esposa, por su aliento constante, sus palabras de aliento y su comprensión en los momentos de dedicación intensa a este proyecto. Su presencia y cariño han sido un bálsamo en los momentos de desafío y esfuerzo.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por su apoyo incondicional y su contribución a este proyecto.

Bryan Nery Vélez Tipan

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, fuente de toda sabiduría y guía en mi camino. Gracias por iluminar mi mente y mi corazón en cada paso que doy.

A mis padres, quienes han sido mi ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor incondicional. Todo lo que soy y todo lo que he logrado es gracias a su apoyo constante y su sacrificio. Este trabajo es también suyo.

A mi abuela, quien en su memoria sigue siendo mi inspiración y mi guía desde el cielo. Siempre llevaré conmigo sus enseñanzas y su amor, y dedico este logro a su recuerdo y legado.

.

Bryan Nery Vélez Tipan

RESUMEN

La agricultura moderna enfrenta el desafío de optimizar la producción de alimentos en un contexto de creciente demanda y limitaciones ambientales. En este escenario, el uso de tecnologías de sensores remotos para el monitoreo de cultivos emerge como un área poco explorada, con gran potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad agrícola. Por tal razón, la investigación tuvo como objetivo estimar el índice de área foliar (IAF) en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* utilizando imágenes espectrales obtenidas mediante sensores remotos. El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP, ubicada en la provincia de Los Ríos. Se evaluaron dos pendientes de suelo (0% y 65%) y cuatro especies de pastos (*M. mombasa*, *M. saboya*, *B. xaraes* y *B. basilik*), bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial de 2x4 y cuatro repeticiones. Los resultados revelaron que ni el contenido de clorofila ni la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el estrato bajo variaron significativamente en función de las pendientes de suelo estudiadas. Sin embargo, la PAR en los estratos alto y medio fue mayor en la pendiente cero, sin diferencias entre especies de pastos. No se encontró una correlación significativa entre la PAR y el índice de clorofila ($r=0.2693$), pero sí fuertes correlaciones entre el IAF pre y post corte con el índice del cultivo ($r=0.7229$ y $r=0.7063$, respectivamente).

Palabras clave: Ceptómetro, clorofila, RPA, RGB.

ABSTRACT

Modern agriculture faces the challenge of optimizing food production in a context of growing demand and environmental limitations. In this scenario, the use of remote sensing technologies for crop monitoring emerges as an underexplored area, with great potential to improve agricultural efficiency and sustainability. For this reason, the research aimed to estimate the leaf area index (LAI) in genotypes of tropical grasses *Brachiaria* and *Megathyrsus* using spectral images obtained through remote sensors. The study was carried out at the INIAP Tropical Pichilingue Experimental Station, located in the province of Los Ríos. Two soil slopes (0% and 65%) and four grass species (*M. mombasa*, *M. savoy*, *B. xaraes* and *B. basilik*) were evaluated under a randomized complete block experimental design with a 2x4 factorial arrangement. and four repetitions. The results revealed that neither the chlorophyll content nor the photosynthetically active radiation (PAR) in the lower stratum varied significantly depending on the soil slopes studied. However, the PAR in the upper and middle strata was greater on the zero slope, with no differences between grass species. No significant correlation was found between the PAR and the chlorophyll index ($r=0.2693$), but strong correlations were found between the pre- and post-cut LAI with the crop index ($r=0.7229$ and $r=0.7063$, respectively).

Keywords: Keptometer, chlorophyll, RPA, RGB.

TABLA DE CONTENIDO

Portada.....	i
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	ii
Certificación de culminación del Proyecto de Investigación	iii
Reporte de la herramienta de prevención de coincidencia y/o plagio académico	iv
Certificación de aprobación por Tribunal de Sustentación	v
Agradecimiento	vi
Dedicatoria.....	vii
Resumen	viii
Abstract.....	ix
Tabla de contenido.....	x
Código Dublín	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.	
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Problema de investigación	4
1.1.1. Planteamiento del problema	4
1.1.2. Formulación del problema	5
1.1.3. Sistematización del problema	5
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. Justificación.....	7
CAPÍTULO II.	
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1. Marco conceptual.....	9

2.1.1. Imágenes espectrales	9
2.1.2. Índice de clorofila	9
2.1.3. Índice del cultivo.....	9
2.1.4. Índice de área foliar	9
2.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	9
2.2. Marco referencial	10
2.2.1. Genotipos de pastos tropicales	10
2.2.1.1. <i>Megathyrsus mombasa</i>	10
2.2.1.2. <i>Megathyrsus saboya</i>	12
2.2.1.3. <i>Brachiaria xaraes</i>	13
2.2.1.4. <i>Brachiaria basilik</i>	14
2.2.2. Aplicabilidad e importancia de las imágenes espectrales en la agricultura.....	15
2.2.3. Dron DJI Mavic 3 Multispectral.....	16
2.2.4. Interacción entre la luz y las plantas.....	17
2.2.5. Interacción de la radiación electromagnética (REM) con la vegetación.....	18
2.2.6. Importancia de la radiación fotosintéticamente activa	19
CAPÍTULO III.	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	20
3.1. Localización	21
3.2. Tipo de investigación	21
3.3. Métodos de investigación.....	21
3.3.1. Método deductivo.....	21
3.3.2. Método analítico	22
3.3.3. Método sintético.....	22
3.4. Fuentes de recopilación de la información.....	22

3.5. Diseño experimental de la investigación	22
3.5.1. Factores en estudio	22
3.5.2. Tratamientos estudiados	23
3.5.3. Diseño experimental	23
3.5.4. Delineamiento experimental	24
3.6. Instrumentos de investigación.....	24
3.6.1. Manejo específico el experimento.....	24
3.6.1.1. Limpieza y preparación del terreno.	24
3.6.1.2. Delimitación del terreno.	25
3.6.1.3. Siembra.....	25
3.6.1.4. Fertilización.	25
3.6.1.5. Control de malezas.....	25
3.6.1.6. Riego.....	25
3.6.1.7. Controles fitosanitarios.....	26
3.6.1.8. Corte de los pastos.	26
3.6.2. Variables evaluadas.....	26
3.6.2.1. Contenido de clorofila (SPAD).	26
3.6.2.2. Radiación fotosintéticamente activa (PAR).	26
3.6.2.3. Índice de área foliar.....	27
3.6.2.4. Relación entre el IAF y PAR.	27
3.6.2.5. Relación entre el IAF y el índice del cultivo.	27
3.6.2.6. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	28
3.7. Tratamiento de los datos	28
3.8. Recursos humanos y materiales	28
3.8.1. Recursos humanos	28

3.8.2. Recursos materiales.....	29
3.8.2.1. Equipos/materiales de oficina.....	29
3.8.2.2. Equipos/materiales de campo.	29
CAPÍTULO IV.	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1. Resultados.....	31
4.1.1. Contenido de clorofila (SPAD).....	31
4.1.2. Radiación fotosintéticamente activa (PAR).....	33
4.1.3. Relación entre el IAF y PAR.....	34
4.1.4. Relación entre el IAF y el índice del cultivo.....	35
4.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	36
4.2. Discusión.....	38
CAPÍTULO V.	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1. Conclusiones	41
5.2. Recomendaciones.....	42
CAPÍTULO VI.	
BIBLIOGRAFÍA	43
6.1. Bibliografía	44
CAPÍTULO VII.	
ANEXOS.....	50
7.1. Anexos	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características climáticas del sitio experimental	21
Tabla 2.	Descripción de los tratamientos evaluados en la investigación	23
Tabla 3.	Esquema del análisis de varianza utilizado en el estudio.....	23
Tabla 4.	Descripción del delineamiento experimental	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Contenido de clorofila de los pastos en estudio en respuesta a las diferentes pendientes en estudio durante 8 semanas de evaluación.....	31
Figura 2.	Contenido de clorofila de cuatro especies de pastos tropicales en estudio durante 8 semanas de evaluación	32
Figura 3.	Efecto de las pendientes de suelo sobre el contenido de clorofila de las..... cuatro especies de pastos tropicales en estudio	32
Figura 4.	Promedio de contenido de clorofila de las cuatro especies de pastos..... tropicales en estudio	33
Figura 5.	Radiación fotosintéticamente activa (PAR) en los pastos estudiados en respuesta a las diferentes pendientes de suelo establecidas	33
Figura 6.	Radiación fotosintéticamente activa (PAR) en las diferentes especies de pasto en estudio.	34
Figura 7.	Correlación entre la PAR y el contenido de clorofila en las cuatro especies de pasto en estudio.	35
Figura 8.	Correlación entre el índice de área foliar (IAF) pre-corte y el índice del cultivo (IC) en las cuatro especies de pasto en estudio.	35
Figura 9.	Correlación entre el índice de área foliar (IAF) post-corte y el índice del cultivo (IC) en las cuatro especies de pasto en estudio.	36
Figura 10.	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) pre y post corte de los pastos en respuesta a las pendientes de suelo evaluadas	37
Figura 11.	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) pre y post corte de las especies de pastos evaluadas.....	37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.	Datos obtenidos de la evaluación de NDVI pre corte en los pastos evaluados	51
Anexo B.	Datos obtenidos de la evaluación de NDVI post corte en los pastos evaluados	51
Anexo C.	Procesamiento de imágenes tomadas del sitio experimental en el vuelo realizado en pre corte de los pastos	52
Anexo D.	Procesamiento de imágenes tomadas del sitio experimental en el vuelo realizado en post corte de los pastos.....	53
Anexo E.	Resultados del test de normalidad de Shapiro-Wilk aplicado a los datos	53
Anexo F.	Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: contenido de clorofila y área foliar	54
Anexo G.	Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: índice de área foliar (IAF) pre y post corte.....	54
Anexo H.	Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: índice del cultivo y NDVI pre corte	55
Anexo I.	Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: NDVI post corte y PAR bajo.....	55
Anexo J.	Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: PAR alto y APAR.....	56
Anexo K.	Croquis del experimento y distribución de las subparcelas en el sitio experimental.	56
Anexo L.	Siembra de los pastos en el sitio experimental	57
Anexo M.	Aplicación de riego en las unidades experimentales	57
Anexo N.	Instalación del ceptómetro para la evaluación de la PAR	58

CÓDIGO DUBLÍN

Título:	Estimación de índice de área foliar en genotipos de pastos tropicales <i>Brachiaria</i> y <i>Megathyrsus</i> bajo imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos			
Autor:	Bryan Nery Vélez Tipan			
Palabras clave:	Ceptómetro	clorofila	RPA	RGB
Fecha de publicación				
Editorial:	Quevedo: UTEQ, 2024			
Resumen:	La agricultura moderna enfrenta el desafío de optimizar la producción de alimentos en un contexto de creciente demanda y limitaciones ambientales. En este escenario, el uso de tecnologías de sensores remotos para el monitoreo de cultivos emerge como un área poco explorada, con gran potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad agrícola. Por tal razón, la investigación tuvo como objetivo estimar el índice de área foliar (IAF) en genotipos de pastos tropicales <i>Brachiaria</i> y <i>Megathyrsus</i> utilizando imágenes espectrales obtenidas mediante sensores remotos. El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP, ubicada en la provincia de Los Ríos. Se evaluaron dos pendientes de suelo (0% y 65%) y cuatro especies de pastos (<i>M. mombasa</i>, <i>M. saboya</i>, <i>B. xaraes</i> y <i>B. basilik</i>), bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial de 2x4 y cuatro repeticiones. Los resultados revelaron que...			
Abstract	Modern agriculture faces the challenge of optimizing food production in a context of growing demand and environmental limitations. In this scenario, the use of remote sensing technologies for crop monitoring emerges as an underexplored area, with great potential to improve agricultural efficiency and sustainability. For this reason, the research aimed to estimate the leaf area index (LAI) in genotypes of tropical grasses <i>Brachiaria</i> and <i>Megathyrsus</i> using spectral images obtained through remote sensors. The study was carried out at the INIAP Tropical Pichilingue Experimental Station, located in the province of Los Ríos. Two soil slopes (0% and 65%) and four grass species (<i>M. mombasa</i>, <i>M. saboya</i>, <i>B. xaraes</i> and <i>B. basilik</i>) were evaluated under a randomized complete block experimental design with a 2x4 factorial arrangement. and four repetitions. The results revealed that...			
Descripción:	75 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162			
Url				

INTRODUCCIÓN

Los pastizales representan uno de los ecosistemas más vastos en los continentes libres de hielo, ocupando grandes extensiones de África y Asia. En Ecuador, la superficie destinada a pastos supera la de cualquier otro cultivo, reflejando su importancia económica y ecológica (Gardiner, 2008). Entre las especies de pasto más cultivadas en regiones tropicales y subtropicales se encuentran *Brachiaria* y *Megathyrsus*, que proporcionan el alimento primario para los animales y constituyen una fuente significativa de ingresos para agricultores y ganaderos (Carbo y Cedeño, 2023).

El estudio de los pastizales ha avanzado considerablemente, pero aún existen aspectos críticos que requieren mayor investigación. Se ha documentado cómo las condiciones morfológicas, edáficas y climáticas afectan el crecimiento de los pastos. Estos factores pueden aumentar o disminuir el desarrollo de hojas y tallos, lo que a su vez impacta la relación suelo/pasto y la producción de nutrientes esenciales para los animales (Baker *et al.*, 2019). La capacidad de los pastos para producir forraje de alta calidad y en cantidad superior a las praderas naturales subraya la importancia de entender y manejar estos factores (Reyes-Pérez *et al.*, 2020).

Brachiaria es una especie conocida por su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas, mostrando un crecimiento robusto y persistencia en suelos con niveles medios de acidez y fertilidad (Lucero-Pita *et al.*, 2023). En contraste, *Megathyrsus* se destaca por su elevado potencial en la producción de biomasa y su calidad. Sin embargo, su rendimiento y composición química pueden ser significativamente afectados por la edad de la planta y las condiciones climáticas locales (Derichs *et al.*, 2021). Estas especies han abierto nuevas oportunidades en las regiones tropicales y subtropicales debido a su amplio rango de adaptación (Lara-Calderón *et al.*, 2024).

Las pendientes de los terrenos también juegan un papel crucial en el desarrollo de los pastos. Las variaciones en la topografía pueden influir en la distribución de agua y nutrientes, así como en la erosión del suelo, lo que afecta directamente la productividad y calidad del forraje. Entender estos efectos es esencial para la gestión efectiva de los pastizales en áreas con topografía diversa, ya que las pendientes pueden crear microclimas y variaciones en las condiciones del suelo que impactan significativamente el crecimiento de los pastos.

El Índice de Área Foliar (IAF) es una medida crítica que indica la cantidad de superficie foliar por unidad de área de suelo. Este índice está estrechamente relacionado con la fotosíntesis y los procesos de transpiración, los cuales son fundamentales para la acumulación de biomasa y la producción de cultivos (Verma *et al.*, 2018). En los pastos tropicales, la producción de materia seca se basa en el equilibrio entre la tasa fotosintética y la tasa de respiración de la planta (Kharuf *et al.*, 2018). Una herramienta prometedora para estimar la producción forrajera es el uso de sensores remotos, que permiten recolectar datos precisos sobre el IAF (Varas-Alava, 2022).

La agricultura a nivel mundial está experimentando una revolución tecnológica, integrando herramientas avanzadas que permiten la recolección de datos de manera digital (Akpootu *et al.*, 2023). Las naves no piloteadas, como drones equipados con cámaras de alta definición, están resolviendo problemas en campos de cultivo de gran extensión al permitir la toma de información en minutos (Kharuf-Gutiérrez *et al.*, 2018). Los agricultores están adoptando tecnologías de sensores remotos debido a su capacidad para captar información precisa de los cultivos y facilitar la toma de decisiones informadas (Sripradit, 2022).

Las cámaras multiespectrales, que capturan imágenes en bandas RGB y otras adicionales más allá del espectro visible, así como las cámaras infrarrojas o térmicas que obtienen diferentes bandas del espectro electromagnético, están transformando la manera en que se monitorean y gestionan los cultivos (Bendezu-Ledesma, 2022). Los sensores remotos ópticos en satélites también juegan un papel crucial al medir la radiación solar reflejada por la superficie terrestre y asociar esta información con las características de la vegetación observada (Olivares y López, 2019). El empleo de estas tecnologías permite adquirir datos detallados y generar evaluaciones precisas y localizadas de los cultivos (Kawaguchi-Akitsu *et al.*, 2022).

En este contexto, la estimación del Índice de Área Foliar en pastos tropicales mediante imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos se presenta como una herramienta innovadora y necesaria. Este estudio tiene como objetivo desarrollar un método preciso y confiable para estimar el IAF en pastos de las especies *Brachiaria* y *Megathyrus*, utilizando tecnología avanzada de sensores remotos. La estimación precisa del IAF es fundamental para comprender la productividad y la salud de los ecosistemas de pastos tropicales, lo que a su vez puede mejorar la gestión de los pastizales y optimizar la producción forrajera.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

En el contexto de la producción agrícola y ganadera en regiones tropicales, el índice de área foliar (IAF) juega un papel fundamental en la evaluación de la salud y productividad de los pastos. Específicamente, en genotipos como *Brachiaria* y *Megathyrsus*, ampliamente utilizados en sistemas de pastoreo, la medición precisa del IAF es crucial para optimizar la producción de forraje y garantizar una alimentación adecuada para el ganado. Sin embargo, la determinación directa del IAF mediante técnicas convencionales, como el corte y pesaje de la biomasa foliar, es costosa, laboriosa y destructiva para la planta. Esta limitación ha impulsado la búsqueda de métodos alternativos no invasivos y eficientes para estimar el IAF en estos genotipos de pastos tropicales.

En este sentido, las imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos representan una herramienta valiosa y prometedora. Estas imágenes proporcionan información detallada sobre las propiedades biofísicas de la vegetación, incluido el IAF, a partir de la reflectancia de la luz en diferentes longitudes de onda. Sin embargo, la aplicación de técnicas de teledetección para estimar el IAF en *Brachiaria* y *Megathyrsus* enfrenta desafíos significativos relacionados con la variabilidad genética, la influencia de factores ambientales y la necesidad de validación precisa en campo.

Por lo tanto, el problema principal que aborda esta investigación radica en la necesidad de desarrollar y validar un método robusto basado en imágenes espectrales de sensores remotos para estimar el IAF en genotipos específicos de pastos tropicales, como *Brachiaria* y *Megathyrsus*. Este enfoque busca superar las limitaciones de las técnicas tradicionales, proporcionando una herramienta eficaz y no invasiva para evaluar la salud y productividad de estos pastos en entornos agrícolas tropicales.

Diagnóstico

El diagnóstico revela que la medición precisa del índice de área foliar (IAF) en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* representa un desafío significativo en la producción agrícola y ganadera en regiones tropicales. Las técnicas tradicionales para medir

el IAF son costosas, laboriosas y destructivas para las plantas, lo que limita su aplicabilidad en entornos agrícolas a gran escala. Esta situación crea una brecha en la capacidad de monitorear y optimizar la salud y productividad de estos pastos de manera eficiente y precisa.

Pronóstico

El desarrollo y validación de un método basado en imágenes espectrales de sensores remotos para estimar el IAF en *Brachiaria* y *Megathyrsus* ofrecerá una solución efectiva y no invasiva a este problema. Se espera que este enfoque permita una evaluación más precisa y rápida del estado de salud y productividad de los pastos tropicales, lo que a su vez facilitará la toma de decisiones informadas en la gestión agrícola y ganadera. Además, se anticipa que este método contribuirá a la optimización de los recursos y la mejora de la sostenibilidad en la producción de forraje en entornos tropicales, beneficiando tanto a los agricultores como al medio ambiente.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el índice de área foliar (IAF) en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* bajo imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos?

1.1.3. Sistematización del problema

¿Cuál es el contenido de clorofila en pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus*?

¿Cuál es la dinámica de la radiación fotosintéticamente activa de diferentes pastos tropicales en estudio?

¿Qué relación existe entre el índice de área foliar y el índice del cultivo en los pastos en estudio?

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo general*

Estimar el índice de área foliar (IAF) en genotipos de pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus* bajo imágenes espectrales obtenidas de sensores remotos.

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Determinar el contenido de clorofila en pastos tropicales *Brachiaria* y *Megathyrsus*.
- Identificar la dinámica de la radiación fotosintéticamente activa de diferentes pastos tropicales en estudio.
- Establecer la correlación existente entre el índice de área foliar y el índice del cultivo en los pastos en estudio.

1.3. Justificación

La presente investigación tiene una relevancia fundamental en el contexto agronómico y ganadero de regiones tropicales. En primer lugar, la necesidad de contar con métodos precisos y no invasivos para medir el IAF en estos genotipos de pastos tropicales surge como respuesta a las limitaciones de las técnicas tradicionales, las cuales son costosas, laboriosas y destructivas para las plantas. Esta situación crea una demanda urgente por parte de los productores e investigadores agrícolas para encontrar alternativas eficientes que permitan monitorear de manera efectiva la salud y productividad de los pastos sin comprometer su integridad.

Por otro lado, la utilización de imágenes espectrales de sensores remotos en la estimación del IAF ofrece ventajas significativas en términos de escalabilidad, rapidez y precisión. Estas imágenes permiten capturar datos a gran escala y de manera no destructiva, lo que facilita la evaluación de grandes áreas de pastoreo y proporciona información detallada sobre la estructura y salud de la vegetación, lo que se traduce en una herramienta poderosa para la toma de decisiones en la gestión agrícola y ganadera.

Además, el desarrollo de un método robusto y validado para estimar el IAF en *Brachiaria* y *Megathyrus* mediante imágenes espectrales de sensores remotos contribuirá significativamente a la mejora de la sostenibilidad en la producción de forraje en entornos tropicales. Al proporcionar información precisa sobre la cantidad de biomasa foliar, este método permitirá optimizar el uso de recursos como agua y fertilizantes, reduciendo así el impacto ambiental y los costos asociados a la producción ganadera.

La implementación exitosa de este método tendrá repercusiones positivas en la economía agrícola de las regiones tropicales, al mejorar la eficiencia productiva de los pastos y aumentar la calidad del forraje disponible para el ganado. Esto, a su vez, se traducirá en beneficios económicos tangibles para los agricultores y ganaderos, fortaleciendo la viabilidad y competitividad de sus operaciones en el mercado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Imágenes espectrales

Son representaciones visuales de objetos que se basan en la longitud de onda de la radiación que reflejan o emiten, mostrando la figura de un objeto en función de las diferentes longitudes de onda presentes en el espectro electromagnético (Vite, Vargas, y Vargas, 2018).

2.1.2. Índice de clorofila

El Índice de Clorofila es una medida utilizada en agricultura para calcular la cantidad total de clorofila presente en las plantas. Este índice se compone de dos bandas separadas: el Índice de Clorofila Verde (GCI) y el Índice de Clorofila del Borde Rojo (RCI). Estas bandas responden a variaciones en el contenido de clorofila y son consistentes en la mayoría de los tipos de plantas (Yáñez, Silvestre, y Chamorro, 2023).

2.1.3. Índice del cultivo

Un índice de cultivo es una medida cuantitativa que se utiliza para evaluar la salud, el vigor y el crecimiento de un cultivo. Estos índices se calculan a partir de datos obtenidos mediante sensores remotos, como satélites o aviones, o mediante mediciones en campo (Ontiveros-Capurata *et al.*, 2022).

2.1.4. Índice de área foliar

El Índice de Área Foliar (IAF) es una medida adimensional que caracteriza la cantidad de área foliar por unidad de área de superficie de tierra. Se utiliza para estimar la capacidad fotosintética de las plantas, entender la relación entre acumulación de biomasa y rendimiento, evaluar el desarrollo y crecimiento de los cultivos, y determinar el daño producido por plagas y enfermedades en el follaje (Loayza *et al.*, 2022).

2.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un índice utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación a partir de la medición de la

intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Perea, Leal, y Oviedo, 2021).

2.2. Marco referencial

2.2.1. Genotipos de pastos tropicales

Los pastos tropicales son plantas forrajeras cultivadas en regiones tropicales que se utilizan como alimento para el ganado. Estas plantas, como las gramíneas del género *Brachiaria*, son fundamentales en la alimentación bovina en climas cálidos y fríos, contribuyendo significativamente a la economía y la producción de alimentos en áreas rurales (Rupay *et al.*, 2023).

Los genotipos de pastos se refieren a las diferentes variedades o tipos de pastos que presentan características genéticas distintas. En el contexto de la producción forrajera, los genotipos de pastos son evaluados en términos de su producción, características morfológicas y adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas (Collazos-Paucar *et al.*, 2018).

Estos genotipos juegan un papel crucial en la ganadería, ya que su selección adecuada puede influir en la productividad del pastoreo, la calidad nutricional del forraje y la persistencia de la planta. La variabilidad genética entre los genotipos de pastos permite a los productores seleccionar aquellos que se adapten mejor a sus necesidades y al entorno en el que se cultivan, contribuyendo así a una ganadería más eficiente y sostenible (Carbo y Cedeño, 2023).

2.2.1.1. *Megathyrsus mombasa*.

M. mombasa es una variedad de pasto tropical perenne que se ha destacado por su excelente desempeño en la producción ganadera. Originaria de Tanzania, en África, esta gramínea fue liberada por la Empresa Brasileña de Investigación Agronomía (EMBRAPA) en 1993, después de un proceso de selección y mejoramiento iniciado en 1982 (Ventura-Ríos *et al.*, 2021). Este pasto se caracteriza por su alta producción de materia verde y heno, con un mayor contenido de proteína cruda en comparación con otras variedades tradicionales como el Pasto Castilla o Guinea. Uno de los rasgos más destacados de esta gramínea es la relación

hoja/tallo, que alcanza un porcentaje de 82% hojas y 18% tallos, lo que la convierte en una planta altamente aprovechable por el ganado (Joaquín-Torres *et al.*, 2020).

Otra ventaja de *M. mombasa* es su porte bajo y la ausencia de leñosidades, lo que facilita su manejo y permite suministrarlo fresco sin necesidad de picarlo. Esto mejora la palatabilidad y el consumo por parte de los animales, optimizando así la eficiencia en la utilización del forraje (Derichs *et al.*, 2021).

Esta variedad de pasto se adapta bien a las condiciones tropicales, con requerimientos de precipitación entre 800 y 3500 mm anuales, distribuidos a lo largo del año, y temperaturas que oscilan entre 18 y 32°C. En cuanto a la altitud, *M. mombasa* se desarrolla adecuadamente en rangos de 0 a 1200 metros sobre el nivel del mar (Vélez-Mora, 2021).

Los suelos más apropiados para el cultivo de esta gramínea son los francos, con un alto contenido de materia orgánica y un pH ligeramente ácido, entre 4.5 y 5.5. Estas características edáficas, junto con las condiciones climáticas mencionadas, permiten un óptimo crecimiento y desarrollo de *M. mombasa* (Ventura-Ríos *et al.*, 2021).

Uno de los principales atributos de este pasto es su alta ganancia de peso por animal y por hectárea/año, lo que lo convierte en una excelente alternativa forrajera para la alimentación del ganado. Estudios realizados han demostrado que esta variedad supera en productividad a otras gramíneas comúnmente utilizadas, como el Pasto Castilla y el Guinea (Joaquín-Torres *et al.*, 2020).

Además de su elevada producción, *M. mombasa* se destaca por su calidad nutricional. Presenta un mayor contenido de proteína cruda en comparación con otras opciones forrajeras, lo que lo convierte en un alimento de alto valor nutritivo para el ganado. Esta característica es especialmente relevante en la alimentación de animales de alto rendimiento, como caballos de carrera, ganado lechero y de lidia (Ventura-Ríos *et al.*, 2021).

Dadas sus cualidades agronómicas y nutricionales, *M. mombasa* se considera una excelente alternativa para reemplazar pasturas tradicionales en la alimentación del ganado. Su versatilidad permite su uso en diferentes sistemas de producción, desde la ganadería de carne y leche hasta la cría de caballos de alto rendimiento (Derichs *et al.*, 2021).

Además, este pasto puede ser utilizado en programas de recuperación de áreas degradadas, contribuyendo a la restauración de ecosistemas y a la mejora de la productividad de los suelos. Su adaptación a condiciones climáticas y edáficas diversas lo convierte en una opción viable para su implementación en diferentes regiones tropicales (Vélez-Mora, 2021).

2.2.1.2. *Megathyrsus saboya*.

M. saboya es una variedad de pasto tropical perenne que destaca por su excelente comportamiento agronómico y su alto valor nutricional en la producción forrajera. Esta variedad, al igual que *M. mombasa*, ha demostrado ser una opción atractiva para sistemas de pastoreo en diversas regiones, gracias a su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y edáficas (Ventura-Ríos *et al.*, 2021).

En términos de rendimiento, el Saboya se distingue por su alta producción de materia seca, lo que lo convierte en una fuente abundante de forraje para el ganado. Esta característica es fundamental para garantizar un suministro constante de alimento de calidad a lo largo del año, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas de producción animal (Gómez *et al.*, 2021).

Además de su rendimiento, *M. saboya* presenta un valor nutricional destacado. Su contenido de nutrientes esencialmente beneficioso para el ganado lo posiciona como una opción valiosa en la alimentación animal. Con un equilibrio adecuado de proteínas, carbohidratos y otros nutrientes esenciales, este pasto contribuye a la salud y el rendimiento óptimo de los animales que se alimentan de él (Patiño, Gómez, y Navarro, 2018).

El manejo adecuado de *M. saboya* es clave para maximizar su potencial en la mejora de la productividad ganadera. Su adaptabilidad a diferentes sistemas de pastoreo y su capacidad para responder favorablemente a prácticas de manejo adecuadas lo convierten en una herramienta versátil para los productores pecuarios que buscan optimizar la alimentación de su ganado (Gómez *et al.*, 2021).

En términos de aplicaciones, *M. saboya* se puede utilizar en una variedad de sistemas de producción animal, desde la ganadería de carne hasta la producción lechera. Su versatilidad y su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales lo convierten en una

opción a considerar para productores que buscan mejorar la calidad y la cantidad de forraje disponible para sus animales (Ventura-Ríos *et al.*, 2021).

2.2.1.3. *Brachiaria xaraes*.

B. xaraes es una variedad de gramínea forrajera que destaca por su excelente calidad nutricional y su notable adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales. Esta variedad ha ganado reconocimiento en la producción ganadera por su rendimiento, su valor nutricional y su versatilidad en diversos sistemas de pastoreo. Con respecto a su comportamiento agronómico, el *B. xaraes* se distingue por su alta producción de forraje, lo que lo convierte en una fuente abundante de alimento para el ganado. Su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas lo hace atractivo para productores que buscan una opción confiable y productiva en la alimentación animal (Lucero-Pita *et al.*, 2023).

En términos de calidad nutricional, el *B. xaraes* presenta un perfil nutricional equilibrado y beneficioso para el ganado. Con un contenido adecuado de proteínas, carbohidratos y otros nutrientes esenciales, este pasto contribuye a la salud, el crecimiento y el rendimiento óptimo de los animales que se alimentan de él. Su capacidad para proporcionar una dieta balanceada y de alta calidad lo convierte en una opción valiosa en la alimentación animal (Reyes-Pérez *et al.*, 2020).

La adaptabilidad del *B. xaraes* a diferentes sistemas de pastoreo lo convierte en una herramienta versátil para los productores pecuarios. Su capacidad para responder favorablemente a prácticas de manejo adecuadas y su resistencia a condiciones adversas lo hacen ideal para su uso en una variedad de entornos ganaderos. Esta versatilidad permite a los productores maximizar la productividad de sus sistemas de producción animal (Laiton, Hurtado, y Granados, 2021).

En cuanto a sus aplicaciones, el *B. xaraes* se puede utilizar en una amplia gama de sistemas de producción animal, desde la ganadería de carne hasta la producción lechera. Su versatilidad y su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales lo convierten en una opción a considerar para productores que buscan mejorar la calidad y la cantidad de forraje disponible para sus animales (Valbuena, Tejos, y Terán, 2016).

2.2.1.4. *Brachiaria basilisk*.

B. basilisk es una variedad de gramínea forrajera reconocida por su versatilidad y alto rendimiento en la producción ganadera. Esta variedad ha demostrado ser una opción atractiva para los productores debido a sus características agronómicas sobresalientes y su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales (Conrado *et al.*, 2021).

Esta especie se destaca por su alta producción de forraje, lo que lo convierte en una fuente confiable de alimento para el ganado. Su capacidad para crecer vigorosamente y mantener una producción constante a lo largo del tiempo lo hace ideal para sistemas de pastoreo que requieren un suministro continuo de forraje de calidad (Valles, Castillo, y Bernal, 2016).

En cuanto a su adaptabilidad, el *B. basilisk* muestra una notable capacidad para crecer en una variedad de suelos y condiciones climáticas. Esta versatilidad lo convierte en una opción atractiva para productores que buscan una gramínea forrajera resistente y adaptable a diferentes entornos de producción ganadera (Balseca *et al.*, 2015).

En lo que respecta a la calidad nutricional, el *B. basilisk* presenta un perfil nutricional equilibrado y beneficioso para el ganado. Con un contenido adecuado de proteínas, carbohidratos y otros nutrientes esenciales, este pasto contribuye a la salud y el rendimiento óptimo de los animales que se alimentan de él. Su capacidad para proporcionar una dieta balanceada y de alta calidad lo convierte en una opción valiosa en la alimentación animal (Lara-Calderón *et al.*, 2024). La versatilidad del *B. basilisk* en diferentes sistemas de pastoreo lo convierte en una herramienta valiosa para los productores pecuarios. Su capacidad para adaptarse a prácticas de manejo variadas y su resistencia a condiciones adversas lo hacen ideal para su uso en una variedad de entornos ganaderos. Esta versatilidad permite a los productores maximizar la productividad de sus sistemas de producción animal (Uvidia-Cabadiana *et al.*, 2024).

En términos de aplicaciones, el *B. basilisk* se puede utilizar en una amplia gama de sistemas de producción animal, desde la ganadería de carne hasta la producción lechera. Su versatilidad y su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales lo convierten en una opción a considerar para productores que buscan mejorar la calidad y la cantidad de forraje disponible para sus animales (Conrado *et al.*, 2021).

2.2.2. Aplicabilidad e importancia de las imágenes espectrales en la agricultura

Las imágenes multiespectrales tienen un papel crucial en la agricultura contemporánea, brindando una gama de aplicaciones y beneficios significativos para el sector agrícola. Su aplicabilidad e importancia abarcan varios aspectos clave (Estrada-Zúñiga *et al.*, 2022). En primer lugar, permiten el monitoreo y análisis de la salud de los cultivos al detectar variaciones sutiles que indican estrés vegetal, deficiencias nutricionales o enfermedades incipientes. Esto posibilita a los agricultores tomar medidas preventivas y corregir problemas antes de que sean visibles, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible de los cultivos (Zhu *et al.*, 2018).

Además, estas imágenes son fundamentales para el mapeo de campos agrícolas, ya que los drones equipados con cámaras multiespectrales pueden generar imágenes detalladas de alta resolución. Esto revela patrones de crecimiento, zonas problemáticas y variaciones en la calidad del suelo, lo que ayuda a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus cultivos y a optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas (Sharma *et al.*, 2022). En el ámbito de la ganadería, las imágenes multiespectrales también desempeñan un papel esencial al permitir la evaluación de la salud y bienestar de los animales (Tkemaladze y Makhashvili, 2016). Estas imágenes pueden detectar variaciones en la temperatura corporal de los animales, lo que facilita la identificación y tratamiento rápido de problemas de salud, como infecciones o lesiones (Sripradit, 2022).

Por último, estas imágenes posibilitan la generación de índices agronómicos relevantes, como el NDVI (Normalized Digital Vegetation Index), que evidencia la condición real de biomasa en los cultivos. Esto facilita la evaluación de la homogeneidad o heterogeneidad del cultivo y su impacto en la producción, proporcionando así información valiosa para la toma de decisiones en la agricultura moderna (Baker *et al.*, 2019).

Para ayudar en este procedimiento, con el avance de la agricultura, se ha incurrido en el uso de sensores remotos. Los sensores remotos son instrumentos que permiten obtener información de objetos, áreas o fenómenos sin estar físicamente presentes. Pueden ser pasivos, detectando radiación electromagnética natural, o activos, generando su propia fuente de radiación. Estos sensores son fundamentales para la observación y monitoreo de la Tierra desde una perspectiva a distancia, con aplicaciones en campos como la

meteorología, oceanografía, agricultura y medio ambiente (Vásquez, Morales, y Achkar, 2021). La resolución espectral, es decir, la capacidad de discriminar diferentes objetivos según la longitud de onda, es un factor clave en sus usos. Los sensores remotos permiten recolectar datos detallados sobre la superficie terrestre, la cubierta vegetal y otros elementos, lo que resulta crucial para diversas disciplinas científicas y aplicadas (Álvarez *et al.*, 2022).

2.2.3. Dron DJI Mavic 3 Multispectral

Un dron, también conocido como vehículo aéreo no tripulado (VANT) o UAV por sus siglas en inglés (*Unmanned Aerial Vehicle*), es una aeronave que opera sin la presencia de un piloto a bordo y es controlada de forma remota o autónoma. Estos dispositivos han ganado popularidad en diversos campos debido a su versatilidad y capacidades tecnológicas. Los drones pueden ser de diferentes tipos, como los de ala fija, los multirrotor o los de ala rotatoria, cada uno con características específicas para distintas aplicaciones (Flores-Cesareo *et al.*, 2020). Su uso se extiende desde aplicaciones militares hasta civiles, como la agricultura, la vigilancia, la fotografía aérea, el mapeo y la entrega de paquetes, entre otros. La tecnología de los drones ha evolucionado rápidamente, mejorando en autonomía, sensores y capacidad de carga útil, lo que los convierte en herramientas eficientes y versátiles en diversas industrias (Pino, 2019).

El Dron DJI Mavic 3 Multispectral es una herramienta avanzada diseñada para aplicaciones agrícolas y topográficas que ofrece capacidades revolucionarias en un formato compacto y portátil. Este dron se destaca por su capacidad para escanear y analizar el crecimiento de los cultivos mediante una combinación de una cámara RGB de 20 MP y cuatro cámaras multispectrales de 5 MP, que abarcan los espectros verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano (Varas-Alava, 2022). Esta combinación de cámaras permite al Mavic 3 Multispectral realizar una topografía aérea eficiente y precisa, generando mapas detallados de los cultivos y facilitando la identificación de problemas antes de que afecten los resultados (Fajardo y Moreno, 2022).

Además, el dron cuenta con un módulo RTK para un posicionamiento de nivel centimétrico, lo que garantiza una alta precisión en los levantamientos topográficos aéreos sin la necesidad de puntos de control adicionales. Con una duración de batería ultralarga, ráfagas rápidas y una transmisión de imagen estable, el DJI Mavic 3 Multispectral se posiciona como una

herramienta indispensable para aumentar la eficiencia, maximizar los rendimientos y proteger el medio ambiente en el sector agrícola y topográfico (Bendezu-Ledesma, 2022).

Una de los software de mayor uso para el procesamiento de imágenes obtenidas por drones en la agricultura es Pix4D, puesto que es un programa informático fotogramétrico y de imágenes aéreas utilizado para la creación de mapas, modelos 3D y otros productos cartográficos a partir de imágenes capturadas por drones o cámaras aéreas (Gutiérrez-Barrientos *et al.*, 2022). Es una herramienta de fotogrametría digital que permite generar ortomosaicos, modelos digitales de elevación y nubes de puntos 3D a partir de imágenes aéreas. Tiene aplicaciones en diversos campos como la agricultura, la construcción, la minería, la topografía y el monitoreo ambiental (White *et al.*, 2018).

Un ortomosaico es un mapa compuesto por varias ortofotos unidas entre sí, como si fueran un rompecabezas, que brinda una gran cantidad de información sobre un área de interés. Este concepto simple se traduce en una herramienta valiosa para diversos sectores como ingeniería, topografía, energía, minería y agricultura (León, Montalvo, y Alarcón, 2016). Para crear un ortomosaico, se realizan levantamientos fotogramétricos con drones y se procesan las imágenes para corregir distorsiones y garantizar la máxima precisión en mediciones de áreas, distancias y coordenadas de puntos específicos. Es una herramienta esencial para acelerar la productividad, permitir la gestión remota y mejorar la precisión y calidad de los proyectos en diferentes campos (Flores, Gielen, y Lucero, 2023).

2.2.4. Interacción entre la luz y las plantas

La interacción entre la luz y las plantas es un aspecto fundamental en la fisiología vegetal y en el desarrollo de las plantas. La luz es un factor ambiental clave que influye en una amplia gama de procesos fisiológicos y evolutivos en las plantas (Montero-Torres, 2022). La radiación lumínica disponible afecta directamente la fotosíntesis, el crecimiento, la floración, la orientación del crecimiento y la respuesta al estrés de las plantas (Mendoza-Paredes *et al.*, 2022).

Las plantas perciben la luz a través de fotorreceptores especializados, como los fitocromos, criptocromos y fototropinas, que les permiten detectar la cantidad, calidad, dirección y duración de la luz. Estos fotorreceptores son sensibles a diferentes longitudes de onda de luz,

lo que les permite a las plantas ajustar su fisiología y su desarrollo en función de las señales lumínicas recibidas (Verma *et al.*, 2018).

La luz roja y la luz azul son especialmente importantes en la regulación de procesos como la germinación, la elongación del tallo, la floración y la respuesta al sombreado. Por otro lado, la luz verde, aunque menos absorbida por las plantas, también desempeña un papel en la penetración de la luz a través de dosel vegetales densos y en la regulación de la respuesta de sombreado de las plantas (Zazueta-Torres *et al.*, 2023). Además, la luz ultravioleta puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales en las plantas, estimulando la producción de compuestos antioxidantes, pero también pudiendo causar daños en el ADN y las proteínas vegetales en caso de exposición prolongada o intensa (Gantiva, Díez, y Moreno, 2020).

2.2.5. Interacción de la radiación electromagnética (REM) con la vegetación

La interacción de la radiación electromagnética (REM) con la vegetación es un aspecto crucial en la fisiología de las plantas y en la comprensión de su crecimiento y desarrollo. La REM, que incluye la luz visible y otras formas de radiación, es esencial para la fotosíntesis y otros procesos metabólicos en las plantas (Benavides y Francisco, 2022). La vegetación responde de manera específica a diferentes longitudes de onda de la luz, lo que influye en su crecimiento, floración y adaptación al entorno (Maurice y Valdez, 2022).

La luz visible es absorbida por los pigmentos fotosintéticos de las plantas, como la clorofila, desencadenando la fotosíntesis y la producción de energía. Los fitocromos y otros fotorreceptores vegetales son sensibles a diferentes longitudes de onda de la luz, lo que les permite a las plantas percibir la cantidad, calidad y dirección de la luz (Robb *et al.*, 2020). Esta percepción lumínica regula una variedad de respuestas fisiológicas en las plantas, como la elongación del tallo, la germinación de semillas y la floración (Librán *et al.*, 2020).

La interacción de la REM con la vegetación también se refleja en la competencia por la luz entre las plantas, ya que aquellas que reciben una mayor cantidad de luz pueden crecer más vigorosamente y competir de manera más efectiva por los recursos. Además, la disponibilidad de luz influye en la distribución de nutrientes y agua en las plantas, afectando su desarrollo y fenotipo (Ishida *et al.*, 2017). En entornos naturales, la interacción de la REM con la vegetación es crucial para la supervivencia y el éxito reproductivo de las plantas. La

luz solar, al ser absorbida y utilizada por las plantas, impulsa su crecimiento y les permite adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno (Kharuf *et al.*, 2018). Además, la calidad y cantidad de luz disponible influyen en la diversidad y estructura de las comunidades vegetales, así como en las interacciones planta-planta y planta-animal (Pilho *et al.*, 2019).

2.2.6. Importancia de la radiación fotosintéticamente activa

La Radiación Fotónicamente Activa, también conocida como PAR por sus siglas en inglés (Photosynthetically Active Radiation), se refiere a la parte del espectro electromagnético que abarca la luz visible utilizada por las plantas en el proceso de fotosíntesis (Thomas *et al.*, 2023). Esta radiación comprende longitudes de onda entre aproximadamente 400 y 700 nanómetros, que coinciden con los colores azul, verde y rojo. La PAR es fundamental para la fotosíntesis, ya que es la energía lumínica absorbida por las plantas para convertir dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno, generando así la materia orgánica necesaria para su crecimiento y desarrollo (Akpootu *et al.*, 2023).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que es la fuente de energía utilizada por ellas para producir biomasa a través del proceso de fotosíntesis. La importancia de la PAR en pastos radica en que es la parte del espectro solar que las plantas pueden utilizar para la fotosíntesis (Zárate-Martínez *et al.*, 2021). La PAR es la que proporciona la energía necesaria para que las plantas produzcan biomasa a través del proceso de fotosíntesis. La PAR es especialmente importante en pastos, ya que es la que permite a las plantas producir la biomasa necesaria para su crecimiento y desarrollo (Parada-Molin *et al.*, 2022).

Además, la PAR es también importante en pastos porque es la que permite a las plantas adaptarse a las condiciones medioambientales. La PAR es la que permite a las plantas responder a las variaciones en la cantidad y calidad de la luz solar, lo que es fundamental para su supervivencia y crecimiento (Nicolau-Follmann *et al.*, 2021). La PAR es especialmente importante en pastos, ya que es la que permite a las plantas adaptarse a las condiciones ambientales y responder a las variaciones en la cantidad y calidad de la luz solar, y de esta manera se obtengan niveles de producción sostenibles y adecuados para la alimentación de las diferentes especies utilizadas dentro de los sistemas de producción agropecuaria (Rondaninia *et al.*, 2017).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La investigación se desarrolló en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ubicada el km 5.5 de la vía Quevedo – El Empalme, provincia de Los Ríos. La ubicación geográfica del sitio experimental es 1°04'36.8" latitud Sur y 79°29'18.9" longitud Oeste, a una altitud de 75 m.s.n.m. En la Tabla 1 se presentan las características climáticas del sitio experimental:

Tabla 1
Características climáticas del sitio experimental

Parámetros	Descripción
Clima	Tropical húmedo
Temperatura media anual	24.9 °C
Precipitación media anual	2295.1 mm
Humedad relativa media	84.0 %
Horas sol por año	894.0

Fuente: Estación Meteorológica “Pichilingue” INAMHI. Serie multianual 2000 – 2021

Elaborado: Autor

3.2. Tipo de investigación

Se llevó a cabo una investigación de tipo experimental y exploratoria. Fue de tipo experimental porque se manejaron diferentes tratamientos y se midió su efecto sobre las variables de respuesta a través de su respectiva evaluación. Por otra parte, se considera de tipo exploratoria, puesto que, a la fecha no existen precedentes de investigaciones similares en dicho campo de estudio en el área de influencia de la investigación.

3.3. Métodos de investigación

En el desarrollo de la presente la investigación se aplicaron varios métodos de investigación:

3.3.1. Método deductivo

Una vez que se definieron las variables de estudio, se aplicó el método deductivo para identificar las particularidades de los tratamientos sobre las variables de respuesta. Además, con este método se procuró establecer relaciones causa-efecto entre los tratamientos y las respuestas observadas.

3.3.2. Método analítico

Se empleó el método analítico para el análisis e interpretación de los datos, mediante el uso de herramientas estadísticas y técnicas de análisis de datos para examinar la relación entre las variables de estudio, identificar tendencias significativas y generar resultados.

3.3.3. Método sintético

Se aplicó este método para la integración de resultados del estudio, para la posterior generación de conclusiones alineadas a los objetivos de la investigación.

3.4. Fuentes de recopilación de la información

Se extrajo información tanto de fuentes primarias como secundarias. Las fuentes de información fueron primarias: aquella información obtenida en la evaluación de las variables a través de la observación directa, y de fuentes secundarias: toda información extraída de libros, revistas, manuales divulgativos, guías técnicas y demás material bibliográfico.

3.5. Diseño experimental de la investigación

3.5.1. Factores en estudio

Se consideraron dos factores en la presente investigación, el primero correspondiente a dos pendientes de suelo, y el segundo factor fueron las especies de pasto:

Factor A: Pendientes

A1: Pendiente cero (0%)

A2: Pendiente fuerte (65%)

Factor B: Especies de pastos

B1: *Megathyrus mombasa*

B2: *Megathyrus saboya*

B3: *Brachiaria xaraes*

B4: *Brachiaria basilik*

3.5.2. Tratamientos estudiados

Se evaluaron ocho tratamientos, representados por las interacciones de los niveles de los dos factores en estudio, mismos que se describen en la Tabla 2:

Tabla 2

Descripción de los tratamientos evaluados en la investigación

Tratamientos	Pendientes	Especies de pastos
T1: A1B1	Pendiente cero (0%)	<i>M. mombasa</i>
T2: A1B2		<i>M. saboya</i>
T3: A1B3		<i>B. xaraes</i>
T4: A1B4		<i>B. basilik</i>
T5: A2B1	Pendiente fuerte (65%)	<i>M. mombasa</i>
T6: A2B2		<i>M. saboya</i>
T7: A2B3		<i>B. xaraes</i>
T8: A2B4		<i>B. basilik</i>

Elaborado: Autor

3.5.3. Diseño experimental

El ensayo se realizó bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA), con arreglo factorial de 2x4 en cuatro repeticiones, considerándose como primer factor a las pendientes y como segundo factor a las especies de pastos. En la Tabla 3, se presenta el esquema del análisis de varianza (ANOVA) utilizado en la investigación:

Tabla 3

Esquema del análisis de varianza utilizado en el estudio

Fuentes de variación	Fórmula	Grados de libertad
Bloques	$r - 1$	3
Factor a (Pendientes)	$a - 1$	1
Factor b (Especies)	$b - 1$	3
Interacciones (a * b)	$(a - 1)(b - 1)$	3
Error	$GLT - GLr - GLa - GLb$	21
Total	$r*a*b - 1$	31

Elaborado: Autor

3.5.4. Delineamiento experimental

Se delimitaron unidades experimentales (parcelas) de 8 m de ancho por 3 m de largo. Además, entre las dos pendientes existió un distanciamiento de 4 m (Anexo K). En la Tabla 4, se presenta el delineamiento experimental seguido en el desarrollo de la presente investigación:

Tabla 4

Descripción del delineamiento experimental

Características	Descripción
Número de tratamientos	8
Número de repeticiones	4
Unidades experimentales	32
Ancho de las parcelas	8 m
Largo de las parcelas	3 m
Área de las parcelas	24 m ²
Distancia entre parcelas	2 m
Distancia entre repeticiones	2 m
Distancia entre pendientes	4 m
Ancho del sitio experimental	38 m
Largo del sitio experimental	40 m
Área del experimento	1520 m ²
Área útil del experimento	768 m ²

Elaborado: Autor

3.6. Instrumentos de investigación

3.6.1. Manejo específico el experimento.

3.6.1.1. Limpieza y preparación del terreno.

Previo al establecimiento del cultivo de los diferentes pastos, se realizó la limpieza del terreno, eliminando todo resto de cultivo anterior y malezas presentes, utilizando machetes y rastrillos. Posteriormente, se hizo la preparación del terreno, el cual consistió en un pase de arado y dos pases de rastra, a fin de dejar el terreno suelto y facilitar el desarrollo radicular de los pastos tropicales en estudio.

3.6.1.2. Delimitación del terreno.

Para la delimitación del terreno se utilizaron balizas o latillas de caña de 0.7 m, las cuales sirvieron para diferenciar los límites de cada unidad experimental. Se establecieron parcelas de 8 m ancho por 3 m de largo, mismas que se separaron entre sí 2 m. Entre las dos pendientes se terreno, se estableció una distancia de 4 m.

3.6.1.3. Siembra.

La siembra se realizó de forma manual, siguiendo las especificaciones del experimento. Se colocaron las semillas de manera directa a chorro continuo con una distancia entre líneas de 30 cm, con una profundidad promedio de 5 cm para cada material.

3.6.1.4. Fertilización.

Se realizaron 3 fertilizaciones edáficas, distribuidas a los 20, 40 y 60 días, fraccionando la dosis total en proporciones de 25-25-50. Se aplicó una dosis de 180 kg/ha de N, 120 kg/ha de P y 100 kg/ha de K. Para ello, se utilizaron como fuentes de fertilización 305 kg/ha de urea, 400 kg/ha de fertilizante 10-30-10 y 100 kg /ha de muriato de potasio. Éstos fertilizantes se homogenizaron en una mezcla física, y, luego se aplicó siguiendo las dosis descritas.

3.6.1.5. Control de malezas.

Previo a la siembra del pasto, se hizo una aplicación de 500 cc/ha de Aminapac® 720 (2,4-Dimethylamine: 600 g/L) + 2 L/ha de Gramoxone® NF (Paraquat: 200 g/L) + 1.5 kg/ha de Gesacor® (Atrazina: 900 g/kg). Posteriormente, a los 12 días después de la siembra, se hizo una aplicación de Forza® (Metsulfuron methyl: 600 g/kg).

3.6.1.6. Riego.

Hasta los 10 días de edad del cultivo, se aplicó un riego utilizando regadera de mano, considerando una lámina de riego de 1 mm/m². Posteriormente, se aplicó riego a los pastos, utilizando un aspersor tipo gran cañón marca Sime® modelo Duplex circolare 25° de 2

pulgadas, boquilla 16, con un caudal de 24 m³/h, y diámetro de cobertura de 62.5 m, considerando una lámina de riego de 20 mm/ha cada 10 días.

3.6.1.7. Controles fitosanitarios.

No se realizaron aplicaciones de fungicidas. Para el control de insectos, se realizaron aplicaciones alternadas de 150 cc/ha de Ampligo (Lambdacihalotrina: 50 g/L + Clorantianiliprol: 100 g/L) y 250 g/ha Neopid (Acetamiprid: 200 g/kg), cada 15 días, a partir de los 10 días de edad de la plantación.

3.6.1.8. Corte de los pastos.

El corte de los pastos se llevó a cabo a los 90 días después de la siembra, utilizando una hoz. Para la realización del corte, se consideró una altura de 10 cm sobre el nivel del suelo. El pasto cortado se clasificó de acuerdo a cada una de las unidades experimentales, para de esta manera facilitar la toma de datos.

3.6.2. Variables evaluadas

3.6.2.1. Contenido de clorofila (SPAD).

Para la evaluación de esta variable, se utilizó un medidor de clorofila SPAD-502 plus, seleccionando aleatoriamente 5 plantas, de las cuales se escogieron cinco hojas fisiológicamente maduras y se realizó la respectiva medición en el centro de la hoja, entre las 10:00 a 12:00 horas. Posteriormente, se determinó el promedio de acuerdo a cada una de las unidades experimentales, y se expresó la magnitud en SPAD.

3.6.2.2. Radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Se utilizó un ceptómetro ACCUPARLP-80 por cada una de las pendientes en estudio. Para ello, previo a su colocación se calibraron fuera de las parcelas a 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. En cada una de las unidades experimentales, se colocó un ceptómetro por cinco minutos para realizar la respectiva toma de datos. Posteriormente, se determinó el promedio de acuerdo a cada una de las unidades experimentales, y se expresó el promedio en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

3.6.2.3. Índice de área foliar.

Se realizó la planificación del vuelo del dron DJI Mavic utilizando software especializado DJI GO. Se establecieron parámetros clave como la altitud de vuelo, la superposición de imágenes (entre un 70% y un 80%), y el solape entre rutas de vuelo para garantizar una cobertura completa y una alta resolución de las imágenes. Posteriormente, se llevó a cabo la captura de imágenes aéreas siguiendo la misión planificada, asegurando una distancia constante y una orientación adecuada para evitar distorsiones. Se cubrió todo el área de interés con múltiples tomas desde diferentes ángulos para obtener una representación detallada.

Las imágenes capturadas fueron procesadas utilizando Pix4D. En este proceso, se importaron todas las imágenes al software y se realizó la alineación y calibración automáticas, lo que permitió la creación de un modelo tridimensional preciso del área fotografiada. Se aplicaron herramientas de segmentación en Pix4D para identificar y separar las áreas verdes (vegetación) del suelo y otros elementos presentes en las imágenes. Luego, se utilizó el software para calcular el Índice de Área Foliar (IAF):

$$IAF = \frac{\text{Área foliar}}{\text{Área sembrada}}$$

3.6.2.4. Relación entre el IAF y PAR.

La relación entre el IAF y la PAR, se estableció mediante un análisis de correlación lineal de Pearson, utilizando como variable independiente el IAF y como variable dependiente la PAR. Este procedimiento se lo hizo tanto con la IAF pre corte, como post corte, puesto que el corte de los pastos se lo hizo a los 90 días después de su siembra.

3.6.2.5. Relación entre el IAF y el índice del cultivo.

Para el establecimiento de la relación entre el IAF y el índice del cultivo, se procedió a realizar un análisis de correlación de Pearson entre estos dos parámetros. Utilizando IAF tanto pre corte como post corte como variable predictora. Se consideró como índice del cultivo al rendimiento de los pastos, expresados en t/ha.

3.6.2.6. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Se siguió la metodología descrita por Bautista-Zurita (2018), aplicando la fórmula diferencial para cuantificar la densidad de crecimiento de las plantas en la tierra que consiste en el infrarrojo cercano, menos el espectro visible dividido por el infrarrojo cercano más el espectro visible:

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$$

Dónde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Infrarrojo cercano

VIS: Espectro visible

Según describen Olivares y López (2019), los valores de NDVI, se interpretan de la siguiente manera: Menos de 0: Planta muerta u objeto inanimado; 0 – 0.33: Planta enferma; 0.34 – 0.66: Planta medianamente sana; 0.67 – 1.00: Planta muy sana

3.7. Tratamiento de los datos

Los datos obtenidos de la evaluación de las variables de respuesta se sometieron al test de normalidad de Shapiro-Wilk, y una vez comprobada la distribución normal, se realizó un análisis paramétrico. Las variables de respuesta se sometieron al análisis de varianza (ANOVA), y posteriormente se aplicó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación de las medias de los tratamientos. Para la tabulación de los datos se utilizó Excel 2019, desarrollado por Microsoft Corporation®. El análisis estadístico se lo ejecutó en Infostat versión 2020.1.2 desarrollado por Di Rienzo *et al.* (2020).

3.8. Recursos humanos y materiales

3.8.1. Recursos humanos

- Estudiante responsable de la investigación (Bryan Nery Vélez Tipan)
- Director del Proyecto de Investigación (Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.)
- Personal técnico de la EET Pichilingue del INIAP

3.8.2. Recursos materiales

3.8.2.1. Equipos/materiales de oficina.

- Calculadora
- Computador
- Esferos
- Hojas de papel bond de 75 g
- Impresora
- Paquete Office 2019 Profesional Plus
- Software Infostat
- Software PIX4D

3.8.2.2. Equipos/materiales de campo.

- Ceptómetro ACCUPARLP-80
- Dron Dron DJI Mavic
- Libreta de campo
- Material vegetativo de *B. basilik*
- Material vegetativo de *B. xaraes*
- Material vegetativo de *M. mombasa*
- Material vegetativo de *M. saboya*
- Medidor de clorofila SPAD-502plus

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

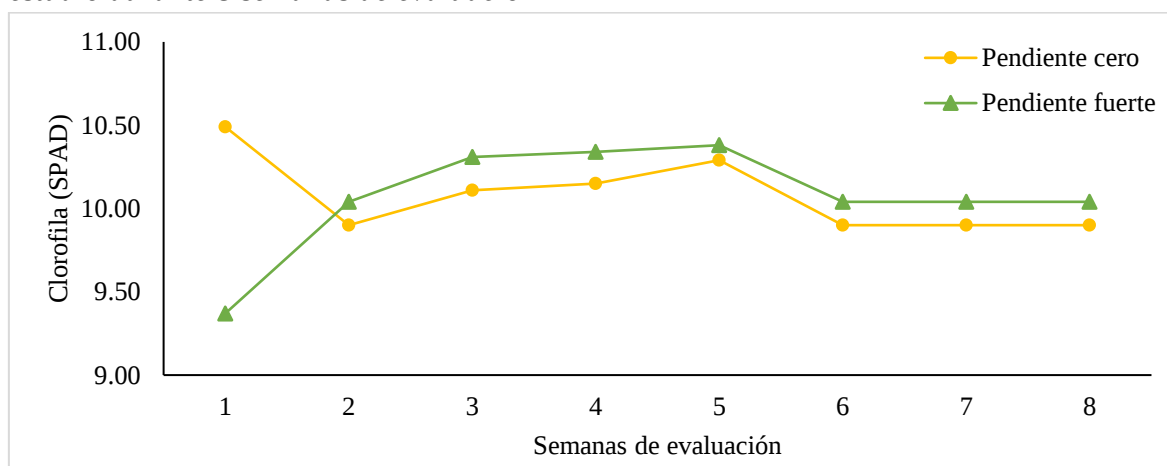
4.1. Resultados

4.1.1. Contenido de clorofila (SPAD)

En la Figura 1 se presentan el contenido de clorofila de los pastos en estudio en respuesta a las diferentes pendientes en estudio durante 8 semanas de evaluación. No se observaron diferencias significativas entre las pendientes de suelo para ninguna de las evaluaciones realizadas. En la pendiente cero, los valores iniciales de clorofila fueron en promedio de 10.49 unidades SPAD, con fluctuaciones semanales entre 9.90 y 10.49 unidades SPAD. En la pendiente fuerte, se tuvo una variación más marcada en los valores de clorofila a lo largo del tiempo. Los valores iniciales fueron en promedio de 9.37 unidades SPAD, con fluctuaciones semanales que oscilaron entre 9.37 y 10.38 SPAD, indicando mayor sensibilidad del contenido de clorofila en esta pendiente, posiblemente debido a la mayor exposición a factores ambientales como inclinación del terreno y distribución de la luz solar.

Figura 1

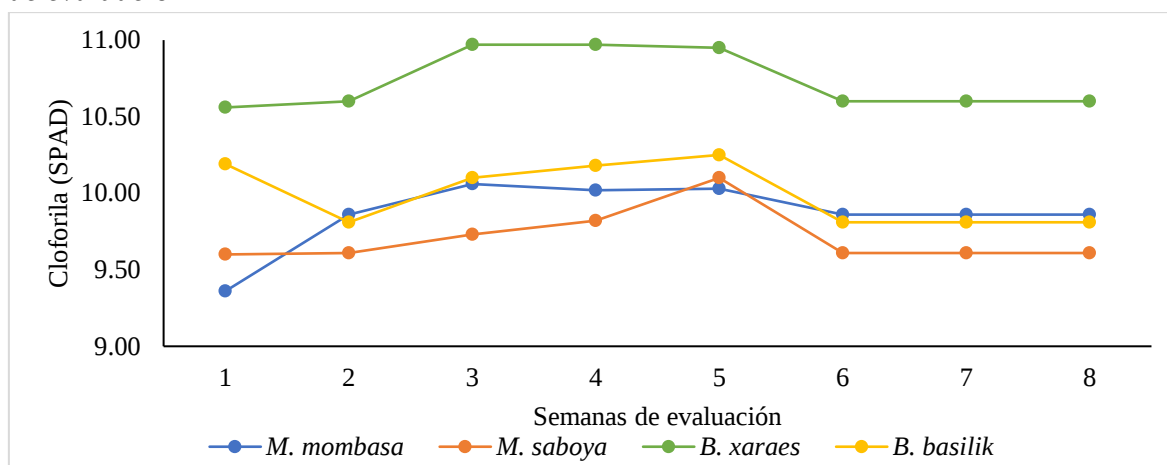
Contenido de clorofila de los pastos en estudio en respuesta a las diferentes pendientes en estudio durante 8 semanas de evaluación



La Figura 2 representa el contenido de clorofila de cuatro especies de pastos tropicales a lo largo de 8 semanas de evaluación. La especie *M. mombasa* mostró valores que oscilaron entre 9.36 y 10.06 unidades SPAD, con una media de 9.86 unidades SPAD. *M. saboya* presentó un rango de 9.60 a 10.10 unidades SPAD, con una media de 9.71 unidades SPAD. Por su parte, *B. xaraes* exhibió un rango más amplio de 10.56 a 10.97 unidades SPAD, con una media de 10.73 unidades SPAD. Finalmente, *B. basilik* tuvo valores que variaron de 9.81 a 10.25 unidades SPAD, con una media de 10.00 unidades SPAD. Se pudo apreciar que *B. xaraes* mantuvo valores de clorofila más altos en comparación con las otras especies.

Figura 2

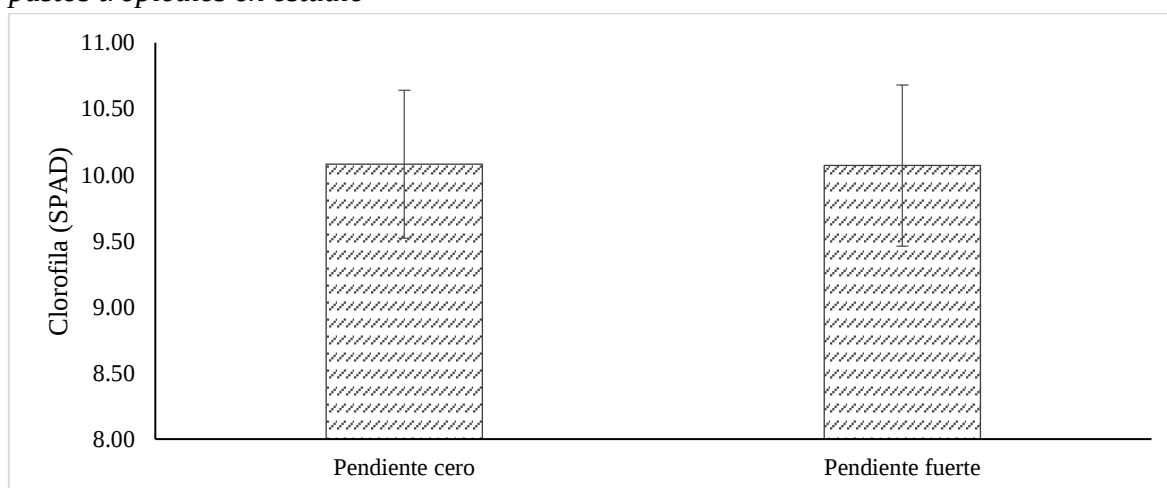
Contenido de clorofila de cuatro especies de pastos tropicales en estudio durante 8 semanas de evaluación



Los promedios presentados en la Figura 3, corresponden al efecto simple de las pendientes del suelo sobre el contenido de clorofila de las especies de pasto en estudio. El análisis de varianza determinó que las pendientes no presentaron diferencias significativas, con un coeficiente de variación de 8.77%. Las pendientes de suelo, no presentaron diferencias significativas entre sí, con contenidos de clorofila que oscilaron entre 10.07 y 10.08 SPAD.

Figura 3

Efecto de las pendientes de suelo sobre el contenido de clorofila de las cuatro especies de pastos tropicales en estudio

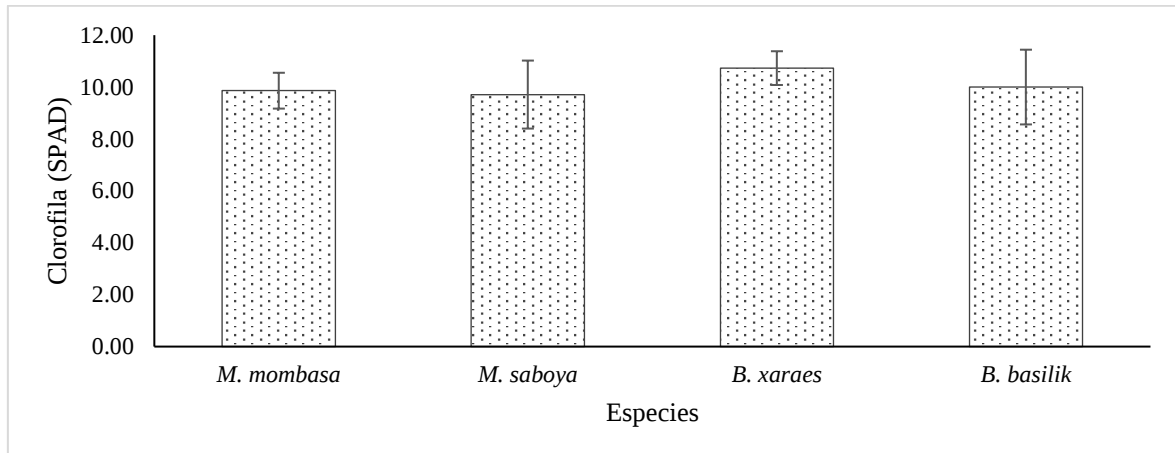


Nota: Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Barras de error representan la desviación estándar de cada grupo de medias.

En la Figura 4, se presenta el promedio de contenido de clorofila de las cuatro especies de pastos tropicales en estudio. Las especies en estudio no se diferenciaron significativamente una de otra, con niveles de clorofila que oscilaron entre 9.71 y 10.73 SPAD.

Figura 4

Promedio de contenido de clorofila de las cuatro especies de pastos tropicales en estudio



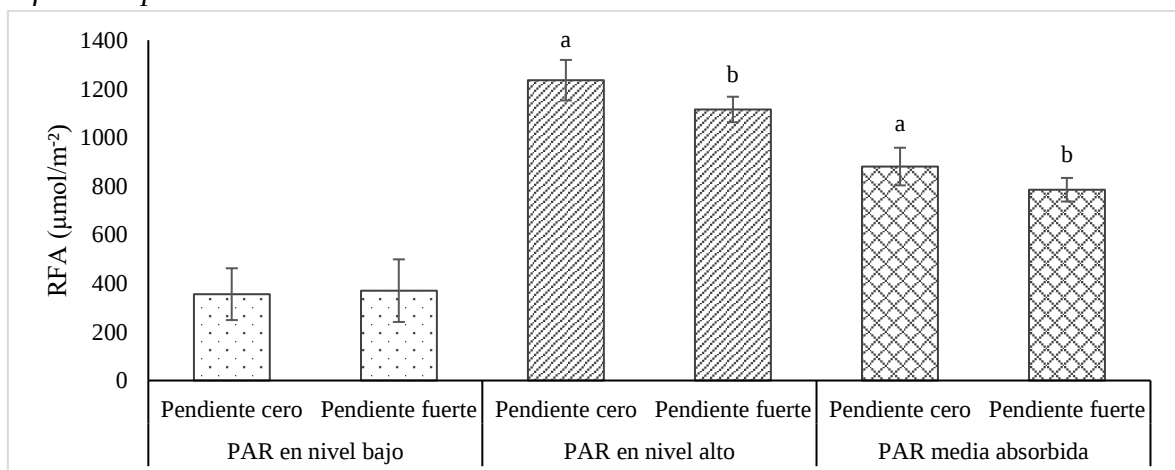
Nota: Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Barras de error representan la desviación estándar de cada grupo de medias.

4.1.2. Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

Los promedios de la Figura 5, corresponden a la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en los pastos evaluados en función de las pendientes de suelo en estudio. Para el PAR bajo, las pendientes no difirieron significativamente entre sí, con promedios que oscilaron entre 355.21 y 369.94 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Por su parte, para el PAR alto y APAR, en la pendiente cero se obtuvieron los valores más altos de PAR, con 1235.36 y 880.15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, respetivamente, mostrando diferencia significativas por encima de los valores registrados en la pendiente fuerte, cuyos promedios fueron de 1114.98 y 784.79 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, respectivamente.

Figura 5

Radiación fotosintéticamente activa (PAR) en los pastos estudiados en respuesta a las diferentes pendientes de suelo establecidas

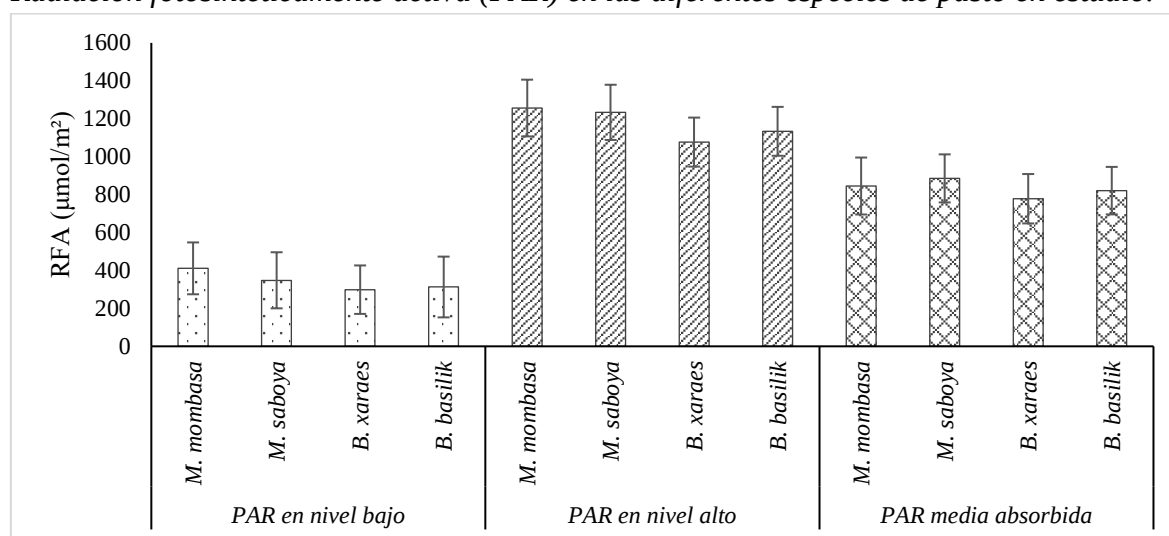


Nota: Promedios con la misma letra en cada grupo de medias, no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Barras de error representan la desviación estándar de cada grupo de medias.

En la Figura 6, se presentan los valores de PAR en las diferentes alturas de las diferentes especies de pastos estudiadas. En ninguno de los tres niveles evaluados, las especies de pastos no alcanzaron significancia estadística, por lo que se pudo apreciar la ausencia de diferencias significativas entre los pastos para dichas evaluaciones. Para el PAR en el nivel bajo, los promedios oscilaron entre 298.66 y 411.14 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, mientras que, para el nivel alto, los valores variaron entre 1076.85 y 1256.44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Finalmente, para el nivel medio (APAR), los promedios fluctuaron entre 778.19 y 885.58 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

Figura 6

Radiación fotosintéticamente activa (PAR) en las diferentes especies de pasto en estudio.



Nota: Promedios con la misma letra en cada grupo de medias, no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Barras de error representan la desviación estándar de cada grupo de medias.

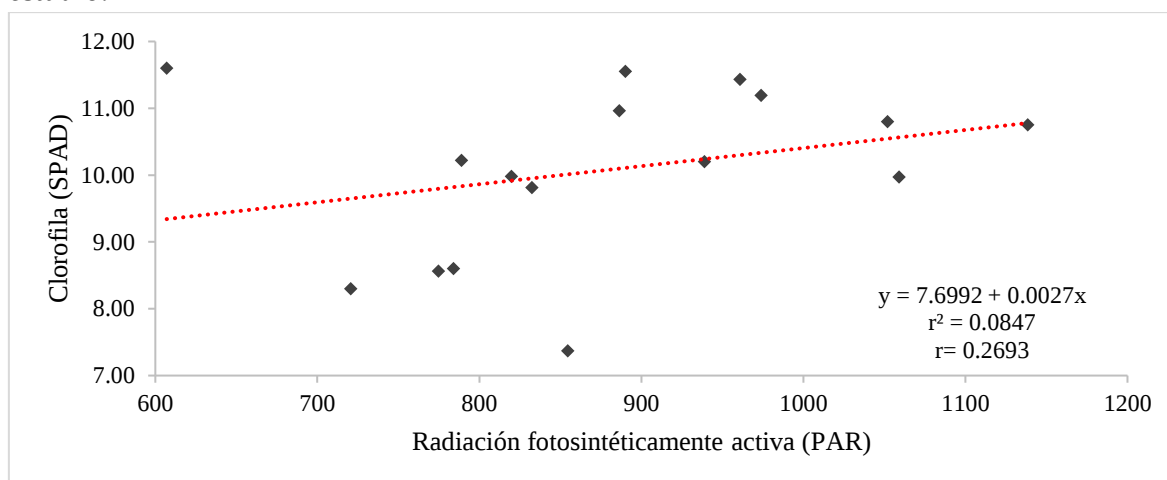
4.1.3. Relación entre el IAF y PAR

La correlación entre la PAR (Radiación Fotónicamente Activa) y el contenido de clorofila en las cuatro especies de pasto en estudio se representa en la Figura 7. El coeficiente de determinación r^2 es 0.0847, lo que indica que aproximadamente el 8.47% de la variabilidad en el contenido de clorofila puede explicarse por la variabilidad en la RAF. Esto sugiere que la relación entre la RAF y el contenido de clorofila no es muy fuerte y que otros factores pueden estar influyendo en la cantidad de clorofila en las especies de pasto estudiadas.

El coeficiente de correlación r es 0.2693, lo que indica una correlación positiva débil entre la PAR y el contenido de clorofila. Esto significa que a medida que la PAR aumenta, tiende a aumentar ligeramente el contenido de clorofila en las especies de pasto, pero la relación no es muy significativa.

Figura 7

Correlación entre la PAR y el contenido de clorofila en las cuatro especies de pasto en estudio.

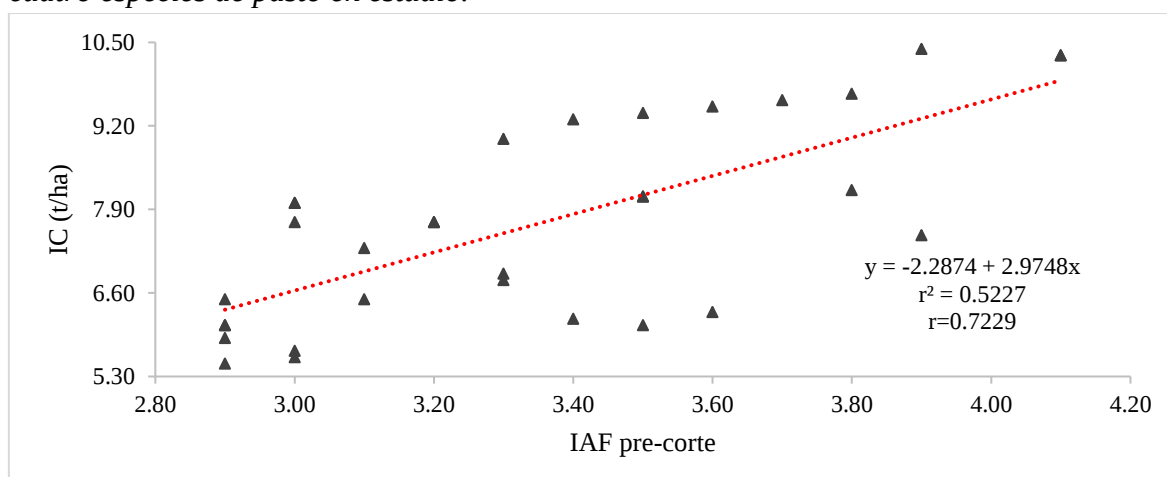


4.1.4. Relación entre el IAF y el índice del cultivo

En la Figura 8, se presenta la correlación entre el índice de área foliar (IAF) pre-corte y el índice del cultivo (IC) en las cuatro especies de pasto en estudio. El coeficiente de determinación r^2 es 0.5227, lo que indica que aproximadamente el 52.27% de la variabilidad en el índice del cultivo (IC) puede explicarse por la variabilidad en el índice de área foliar (IAF) pre-corte, lo que significa que el IAF pre-corte es un predictor significativo del IC. El coeficiente de correlación $r=0.7229$, indica una correlación positiva fuerte entre IAF pre-corte y el IC. Esto significa que a medida que el IAF pre-corte aumenta, el IC también tiende a aumentar significativamente en las especies de pasto estudiadas.

Figura 8

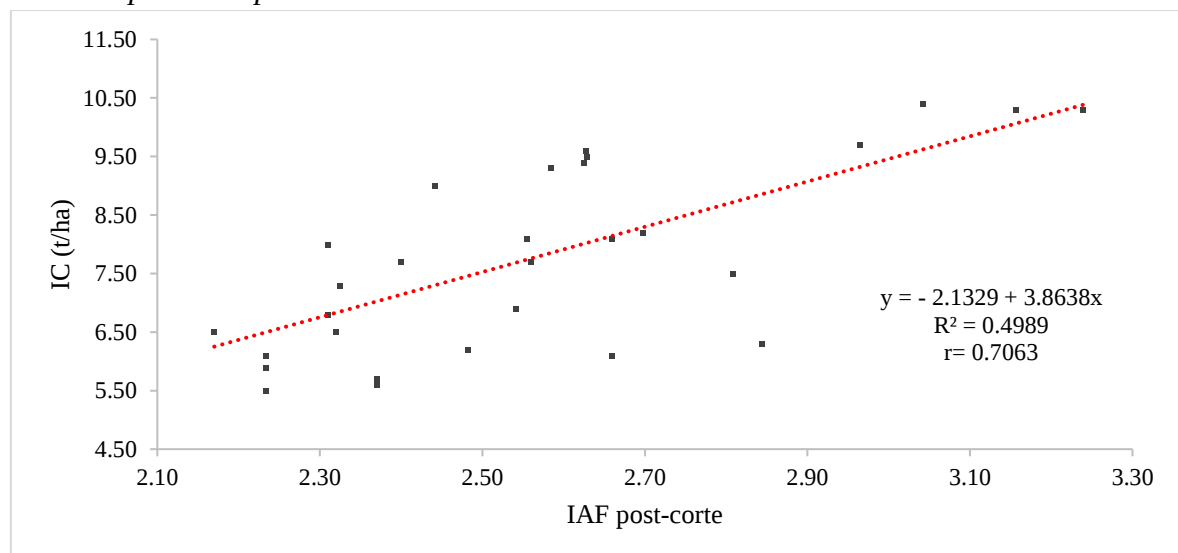
Correlación entre el índice de área foliar (IAF) pre-corte y el índice del cultivo (IC) en las cuatro especies de pasto en estudio.



La correlación entre el índice de área foliar (IAF) post-corte y el índice del cultivo (IC) en las cuatro especies de pasto en estudio se presenta en la Figura 9. El coeficiente de determinación r^2 es 0.4989, lo que indica que aproximadamente el 49.89% de la variabilidad en el índice del cultivo (IC) puede explicarse por la variabilidad en el índice de área foliar (IAF) post-corte, lo que significa que el IAF post-corte es un predictor significativo del IC. El coeficiente de correlación $r=0.7063$, indica una correlación positiva fuerte entre IAF pre-corte y el IC. Esto significa que a medida que el IAF pre-corte aumenta, el IC también tiende a aumentar significativamente en las especies de pasto estudiadas.

Figura 9

Correlación entre el índice de área foliar (IAF) post-corte y el índice del cultivo (IC) en las cuatro especies de pasto en estudio.



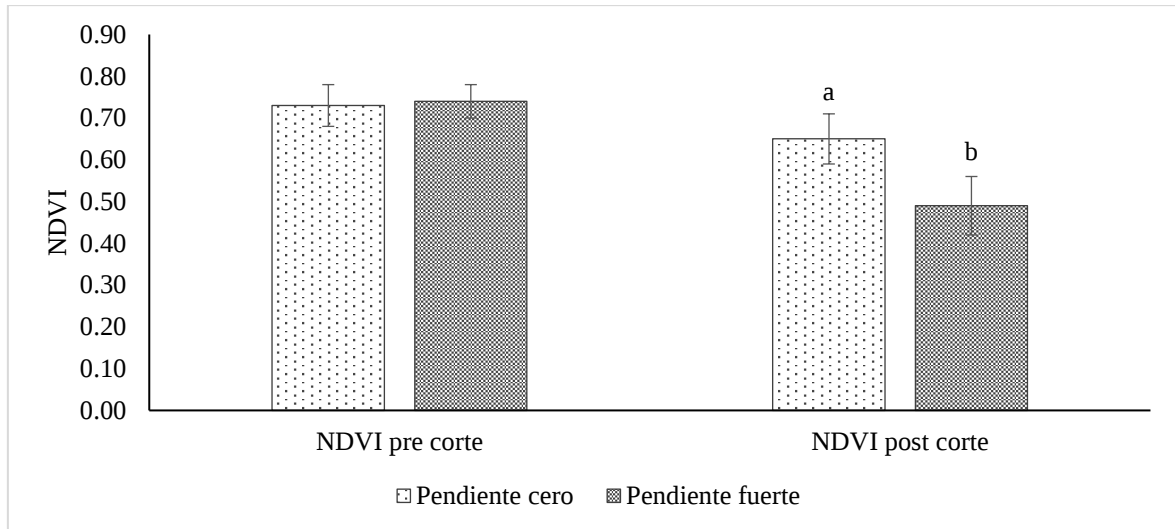
4.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la Figura 9, se presenta al efecto de las pendientes de suelo en estudio sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de los pastos en estudio en pre y post corte. De acuerdo al análisis de varianza, las pendientes no alcanzaron significancia estadística en pre corte, mientras que, para post corte, alcanzaron alta significancia estadística. Los coeficientes de variación fueron de 5.53 y 18.76 %, respectivamente.

En pre corte, las pendientes no presentaron diferencias significativas entre sí, con promedios de NDVI que oscilaron entre 0.73 y 0.74, mientras que, para post corte, se registró mayor NDVI, con 0.65, en la pendiente cero, mostrando una diferencia significativa por encima del NDVI de 0.49 registrado en la pendiente fuerte.

Figura 10

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) pre y post corte de los pastos en respuesta a las pendientes de suelo evaluadas

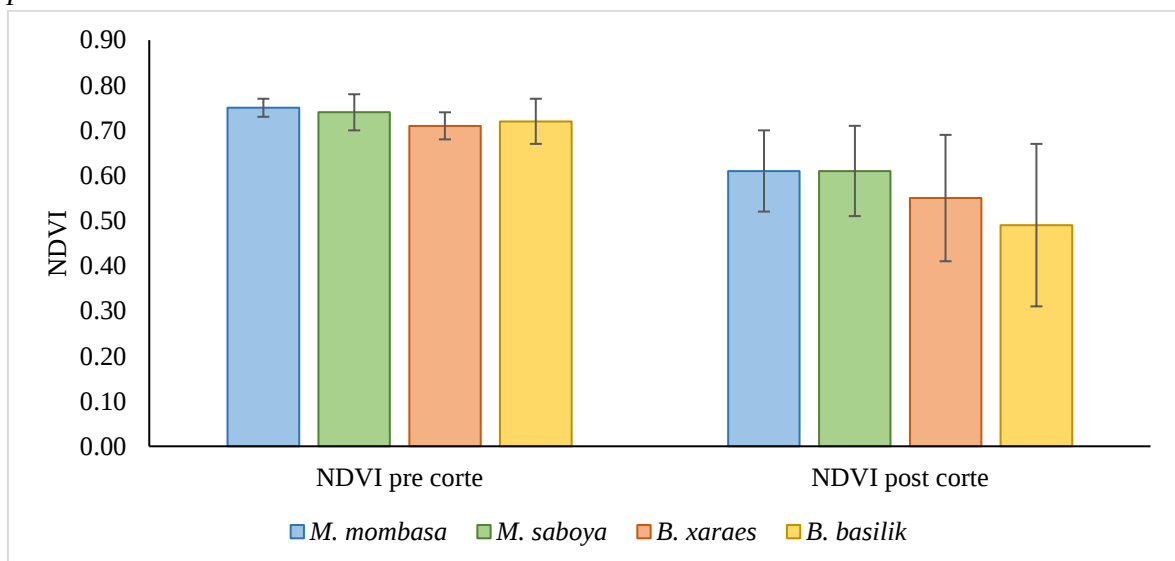


Nota: Promedios con la misma letra en cada grupo de datos no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Barras de error representan la desviación estándar de cada grupo de medias.

En la Figura 9, se presentan los promedios del NDVI de las cuatro especies de pasto en estudio en pre y post corte, de manera que, de acuerdo al análisis de varianza, éstos no alcanzaron significancia estadística para ninguno de los dos momentos de evaluación. En las dos evaluaciones realizadas, los pastos no mostraron diferencias significativas entre sí, con promedios que oscilaron entre 0.71 y 0.75 en pre corte, y de 0.49 a 0.61 en post corte.

Figura 11

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) pre y post corte de las especies de pastos evaluadas



Nota: Promedios con la misma letra en cada grupo de datos no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Barras de error representan la desviación estándar de cada grupo de medias.

4.2. Discusión

Los resultados del estudio muestran que no hubo diferencias significativas en el contenido de clorofila entre las pendientes de suelo ni entre las especies de pastos tropicales estudiadas. Esto sugiere que, a pesar de las diferencias en la topografía del terreno y las características genéticas de las especies, no se observaron variaciones significativas en los niveles de clorofila (Loayza *et al.*, 2022). Es posible que las condiciones ambientales durante el período de estudio no hayan sido lo suficientemente extremas como para generar diferencias significativas en la producción de clorofila entre las pendientes y especies (Reyes-Pérez *et al.*, 2020).

Por otra parte, los resultados obtenidos en relación con la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y su impacto en el contenido de clorofila en pastos tropicales pusieron en evidencia una conexión directa entre la exposición solar y la producción de clorofila. En la investigación se identificó que la pendiente cero, caracterizada por una mayor exposición a la PAR, presentó valores más elevados de contenido de clorofila en comparación con la pendiente fuerte (Kawaguchi-Akitsu *et al.*, 2022). Esta diferencia exhibida entre las mencionadas pendientes, se puede atribuir a la mayor disponibilidad de luz solar directa en la pendiente cero, lo que favorece un incremento en la fotosíntesis y, por ende, en la producción de clorofila en los pastos.

Por otro lado, al analizar la relación entre los valores de PAR en distintas alturas y especies de pastos, se encontró una uniformidad en la captación de radiación solar entre las especies, sin importar la altura evaluada (Librán *et al.*, 2020). Este hallazgo sugiere que las especies de pastos estudiadas comparten una capacidad similar para aprovechar la radiación solar disponible en diferentes niveles de la vegetación, indicando una adaptación efectiva a las condiciones lumínicas del entorno (Parada-Molin *et al.*, 2022). Estos resultados tienen implicaciones significativas en la gestión y manejo de pastos tropicales. La influencia directa de la exposición solar en los niveles de clorofila resalta la importancia de considerar la topografía del terreno al implementar sistemas de pastoreo o cultivo (Zárate-Martínez *et al.*, 2021). Se sugiere que áreas con una mayor exposición solar pueden ser más adecuadas para la producción de pastos con niveles óptimos de clorofila, lo cual impactaría positivamente en la calidad y productividad de los sistemas agrícolas o ganaderos (Nicolau-Follmann *et al.*, 2021).

La uniformidad en la captación de PAR entre las especies de pastos estudiadas indica una capacidad adaptativa similar en términos de respuesta a la radiación solar (Kawaguchi-Akitsu *et al.*, 2022). Esta información puede ser útil para seleccionar las especies más adecuadas en función de las condiciones lumínicas disponibles en distintos entornos, lo que contribuiría a mejorar la eficiencia en el uso de la radiación solar en sistemas de producción de forraje (Ma-Lu *et al.*, 2024).

En cuanto a la relación entre la PAR y el contenido de clorofila, se observó una correlación débil, indicando que otros factores también influyen en la cantidad de clorofila presente en las especies de pasto estudiadas (Montero-Torres, 2022). Por otro lado, se examinó la correlación entre el índice de área foliar (IAF) y el índice del cultivo (IC), revelando una relación significativa. Se encontró una correlación positiva fuerte entre el IAF pre-corte y el IC, así como entre el IAF post-corte y el IC (Mendoza-Paredes *et al.*, 2022). Estos hallazgos sugieren que tanto el IAF pre-corte como post-corte son indicadores importantes del estado y productividad de los pastos, influyendo de manera significativa en el IC, el cual refleja la calidad y crecimiento de los pastos (Verma *et al.*, 2018).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El contenido de clorofila no fue influenciado por las pendientes de suelo estudiadas, y a su vez, no varió entre las diferentes especies de pastos en estudio.
- La radiación fotosintéticamente activa en el estrato bajo no varió en función de las pendientes de suelo en estudio, sin embargo, para el estrato alto y medio, ésta fue mayor en la pendiente cero, mientras que, entre las especies de pastos, no se evidenciaron diferencias significativas.
- No se detectó una correlación significativa entre la PAR y el índice de clorofila ($r=0.2693$), mientras que entre IAF pre corte y el índice del cultivo ($r=0.7229$), así como para la relación entre IAF post corte y el índice del cultivo ($r=0.7063$), se evidenciaron correlaciones fuertes entre las variables descritas.

5.2. Recomendaciones

- Considerar la topografía del terreno al realizar mediciones de contenido de clorofila en pastos tropicales, ya que puede influir significativamente en los resultados y ayudar a entender mejor la variabilidad de esta variable en diferentes condiciones.
- Tener en cuenta las características específicas de las especies de pasto al evaluar la dinámica de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), ya que estas pueden tener un impacto más significativo en los niveles de clorofila que la topografía del terreno.
- Utilizar el índice de área foliar (IAF) como un indicador confiable para predecir el índice del cultivo (IC) en pastos tropicales, aunque se debe complementar con otros factores para obtener una evaluación integral de la salud y el rendimiento de los pastizales.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

6.1. Bibliografía

- Akpootu, D., Isah, A., Abdulsalam, M., Aliyu, M., Kola, T., Yusuf, A., . . . Bello, G. (2023). Estimation and Investigation of Photosynthetically Active Radiation Using Meteorological Parameters over Ikeja, Nigeria. *Journal of Energy Research and Reviews* 15(4): 51–62.
- Álvarez, E., Scavuzzo, C., Campero, M., Scavuzzo, C., y Defagó, M. (2022). Explorando el uso de herramientas de sensores remotos y tecnologías geoespaciales aplicadas al problema multidimensional de la seguridad alimentaria. *Uniciencia* 36(1): 746-760.
- Baker, K., Koplitz, S., Foley, K., Avey, L., y Hawkins, A. (2019). Characterizing grassland fire activity in the flint hills region and air quality using satellite and routine surface monitor data. *Science of the Total Environment* 659: 1555-1566.
- Balseca, D., Cienfuegos, E., López, H., Guevara, H., y Martínez, J. (2015). Nutritional value of *Brachiarias* and forage legumes in the humid tropics of Ecuador. *Ciencia e Investigación Agraria* 42(1): 57-63.
- Bautista-Zurita, R. (2018). Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba - Ecuador. 103 p.
- Benavides, A., y Francisco, N. (2022). Recientes aplicaciones de la fluorescencia de la clorofila en los cultivos vegetales. *Epistemos (Sonora)* 16(33): 106-114.
- Bendezu-Ledesma, J. (2022). Diseño de un prototipo de dron teleoperado para el servicio de delivery de productos farmacéuticos en entornos infecciosos. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima - Perú. 115 p.
- Bonnaire, L., Montoya, B., y Obando, F. (2021). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria* 22(1): e578.
- Carbo, G., y Cedeño, A. (2023). Tasa de crecimiento y rendimiento de genotipos de pasto guinea sometidos a estrés hídrico. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Calceta - Ecuador. 47 p.
- Collazos-Paucar, L., Maldonado-Vásquez, H., Silva, J. C.-D., De Amaral-Gravina, D. S., y De França-Padilha, T. (2018). Producción y características morfológicas de genotipos de pasto elefante enano (*Pennisetum purpureum*, Schum) sobre pastoreo. *Anales Científicos* 79 (2): 449-452.
- Conrado, J., Lopes, M., Cândido, M., Santos, C., Morais, L., Torres, A., . . . Carneiro, M. (2021). Characterization of *Brachiaria decumbens* 'B. basilisk' pasture subjected to flexible grazing by sheep. *Chilean Journal of Agricultural Research* 81(3): 338-350.

- Derichs, K., Mosquera, J., Ron-Garrido, L., Puga-Torres, B., y De la Cueva, F. (2021). Intervalos de corte de pasto Saboya (*Panicum maximum* Jacq.), sobre rendimiento de materia seca y composición química de su ensilaje. *Siembra* 8(2): e2506.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. (2020). InfoStat versión 2020. Universidad de Córdoba. Córdoba-Argentina. Url: <http://www.infostat.com.ar>.
- Estrada-Zúñiga, A., Cárdenas-Rodríguez, J., Bejar-Saya, J., y Ñaupari-Vásquez, J. (2022). Estimación de la biomasa de una comunidad vegetal altoandina utilizando imágenes multiespectrales adquiridas con sensores remotos UAV y modelos de Regresión Lineal Múltiple, Máquina de Vectores Soporte y Bosques Aleatorios. *Scientia Agropecuaria* 13(3): 301-310.
- Fajardo, X., y Moreno, W. (2022). Propuesta metodológica para enlazar drones con app móvil de seguridad ciudadana. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá - Colombia. 36 p.
- Flores, E., Gielen, E., y Lucero, V. (2023). Aproximación espacial para la identificación de áreas de huertos familiares en zonas rurales: El caso de Sinincay – Cuenca – Ecuador. *Novasinergia* 6(1): 136-149.
- Flores-Cesareo, J., Bustamante-González, A., Vargas-López, S., Cajuste, L., Escobedo, F., y Valadez-Ramírez, M. (2020). Cartografía del uso del suelo en la subcuenca Huaquechula, Puebla, México, con un índice combinado de imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas* (101): e59914.
- Gantiva, E., Díez, M., y Moreno, F. (2020). Efecto de la interacción luz-agua sobre la fotosíntesis de la *Vanilla planifolia* (Orchidaceae). *Revista de Biología Tropical* 68(4): 1250-1261.
- Gómez, J., Vásconez, G., Torres-Pérez, J., y Morán-Salazar, C. (2021). Rendimiento de biomasa del pasto Saboya (*Megathyrsus maximus*) con relación a dos frecuencias de corte. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación* 6(2): 55–63.
- Gutiérrez-Barrientos, M., Marín-Solís, J., Alanís-Rodríguez, E., y Buendía-Rodríguez, E. (2022). Evaluación de una restauración mediante dron en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica* (54): 71-85.
- Ishida, T., Kurihara, J., Viray, F., y Takashi, J. (2017). A novel approach for vegetation classification using UAV-based hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* 144: 80-85.
- Joaquín-Torres, B., Gómez-Vázquez, A., Ramos-Juárez, J., Aranda-Ibañez, E., Pérez-Amaro, J., y Joaquín-Cancino, S. (2020). Rendimiento y calidad de semilla de pasto guinea cv. Mombaza a diferentes fechas de precorte. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11(spe24): 201-210.

- Kawaguchi-Akitsu, T., Nishida-Nasahara, K., Ijima, O., Hirose, Y., Ide, R., Takagi, K., y Kume, A. (2022). The variability and seasonality in the ratio of photosynthetically active radiation to solar radiation: A simple empirical model of the ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 108: e102724.
- Kharuf, S., Hernandez, L., Orosco, R., y Delgado, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* 39(2): 79-91.
- Kharuf-Gutiérrez, S., Orozco-Morales, R., Aday-Díaz, O., y Pineda-Ruíz, E. (2018). Sistema de procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas para agricultura de precisión. *Sistemas y Telemática* 16(47): 45-58.
- Laiton, J., Hurtado, V., y Granados, J. (2021). Evaluación de tres especies de *Brachiaria* spp con pastoreo rotacional para cebs bovina. *Orinoquia* 25(1): 15-22.
- Lara-Calderón, M., Cedeño-Boada, Á., Macas-Giler, G., y Chávez-Cedeño, V. (2024). Efecto de la inoculación con tres especies de hongos micorrízicos vesículo arbusculares, en la producción primaria de pasturas del género *Brachiaria*. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 7(1): 751–763.
- León, J., Montalvo, N., y Alarcón, P. (2016). Determinación del coeficiente del cultivo y parámetros biométricos basados en imágenes captadas con dron, lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa (*Solanum* spp.). *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO)* 19(37): 177-188.
- Librán, F., Klaus, F., Tschardtke, T., y Grass, I. (2020). Unmanned aerial Vehicles for biodiversity friendly agricultural landscape a systematic review. *Science of the total environment* 732: e139204.
- Loayza, H., Calderó, A., Gutiérrez, R., Céspedes, E., y Quiroz, R. (2022). Estimación de las concentraciones relativas de clorofila en folíolos de papa (*Solanum tuberosum* L.) Utilizando técnicas de reflectancia de la vegetación. *Ecología Aplicada* 21(2): 91-101.
- Lucero-Pita, J., Gómez-Mendoza, G., Guamán-Guamán, R., Villavicencio-Abril, Á., Ulloa-Cortázar, S., y Romero-Salguero, E. (2023). Tiempos de descanso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* mediante tres tipos de corte. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 34(5): e24237.
- Ma-Lu, S., Yang, D., Anderson, M., Zainali, S., Stridh, B., Avelin, A., y Campana, P. (2024). Photosynthetically active radiation separation model for high-latitude regions in agrivoltaic systems modeling. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 16: e013503.
- Maurice, J., y Valdez, J. (2022). Rayos X y resonancia magnética en la entomología: principios y aplicaciones. *Ciencia Ergo Sum* 29(1): e152.

- Mendoza-Paredes, J., Castillo-González, A., Valdéz-Aguilar, L., Avitia-García, E., y García-Mateos, M. (2022). Efecto de diferentes relaciones de luz azul:roja en el crecimiento de plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Biotecnia* 24(1): 87-96.
- Montero-Torres, J. (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: Agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 9(1): 48-62.
- Nicolau-Follmann, D., Henrique-Nied, A., Rocha, L., Colet, F., Tascheto-Bolzan, F., Wartha, C., . . . Newton Martin, T. (2021). Efficiency of photosynthetically active radiation interception associated with morphological traits in canola cultivars. *Idesia (Arica)* 39(2): 101-110.
- Olivares, B., y López, M. (2019). Índice de vegetación de diferencia normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED* 11(2): 112-121.
- Ontiveros-Capurata, R., Juárez-López, P., Mendoza-Tafolla, R., Alia-Tejacal, I., Villegas-Torres, O., Guillén-Sánchez, D., y Cartmill, A. (2022). Relación entre concentraciones de clorofila y nitrógeno, y producción de materia fresca en albahaca ‘Nufar’ (*Ocimum basilicum*), con lecturas de tres medidores manuales de clorofila: SPAD, atLEAF y MC-100. *Serie horticultura* 28(3): 189-202.
- Parada-Molin, P., Pérez-Silva, A., Cerdán-Cabrera, C., y Soto-Enrique, A. (2022). Condiciones climáticas y microclimáticas en sistemas de producción de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) en México. *Agronomía Mesoamericana* 33(2): e48682.
- Patiño, R., Gómez, R., y Navarro, O. (2018). Calidad nutricional de Mombasa y Tanzania (*Megathyrsus maximus*, Jacq.) manejados a diferentes frecuencias y alturas de corte en Sucre, Colombia. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia* 13(1): 17-30.
- Perea, M., Leal, J., y Oviedo, F. (2021). Caracterización espectral y monitoreo de bosques de manglar con teledetección en el litoral pacífico colombiano: Bajo Baudó, Chocó. *La Granja, Revista de Ciencias de la Vida* 34(2): 27-44.
- Pilho, F., Heldens, W., Kong, Z., y Lange, E. (2019). Drones: Innovate technology for use in precision pest management. *Journal of Economic Entomology* 113(1): 1-25.
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: Un futuro de alta tecnología. *Idesia (Arica)* 37(1): 75-84.
- Reyes-Pérez, J., Méndez-Martínez, Y., Luna-Murillo, R., Verdecía, D., Espinoza-Coronel, A., Pincay-Ronquillo, W., . . . Macías-Pettao, H. (2020). Rendimiento y composición bromatológica de tres variedades de *Brachiaria* en dos zonas de Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas* 54: 413-424.

- Robb, C., Harday, A., Doonan, J., y Brook, J. (2020). Semi automated field plot segmentation from UAS imagery for experimental agriculture. *Frontiers in plant Science* 11: e591886.
- Rondaninia, D., Menendez, Y., Gomeza, N., Mirallesa, D., y Bottoa, J. (2017). Vegetative plasticity and floral branching compensate low plant density in modern spring rapeseed. *Field Crops Research* 210: 104-113.
- Rupay, K., Ampuero, G., Vela, C., Angulo, C., Mathios, M., y Torres, R. (2023). Evaluación agronómica y nutricional de pastos tropicales de corte sometidos a diferentes frecuencias de corte en Yurimaguas, Amazonia peruana. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 34(5): e24461.
- Sharma, P., Leigh, L., Chang, J., Maimaitijiang, M., Caffé, M., y Above, M. (2022). Ground biomass estimation in OATS Using UAV remote sensing and machine learning. *Sensors* 22: e601.
- Solano-Reynoso, W., Palomino-Villanoy, A., Soca-Flores, R., Torres-Huaripaucar, N., y Dávalos-Prado, J. (2023). Índices de reflectancia espectral de pigmentos en hojas de cultivos andinos. *Acta Agronómica* 72(1): 78-87.
- Solís-Silvan, R., Sanchez-Gutiérrez, F., Islas-Jesús, R., Gerónimo-Torres, J., Pozo-Santiago, C., y Sanchez-Díaz, B. (2022). Estimación del índice de área foliar a partir de imágenes Sentinel en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W.Hill. *Revista Tecnología en Marcha* 35(2): 39-47.
- Sripradit, A. (2022). Estimation of photosynthetically active radiation by artificial intelligence from sky view and zenith angle. *KKU Science Journal* 49(3): 283–291.
- Thomas, C., Wandji, W., Arola, A., Pfeifroth, U., Trentmann, J., Dorling, S., . . . Aculinin, A. (2023). Smart approaches for evaluating photosynthetically active radiation at various stations based on MSG prime satellite imagery. *Atmosphere* 14(8): e1259.
- Tkemaladze, G., y Makhashvili, K. (2016). Climate changes and photosynthesis. *Annals of Agrarian Science* 14(2): 119-126.
- Uvidia-Cabadiana, H., Reyes-Silva, F., Chicaiza-Reisancho, E., Uvidia-Armijo, J., y Casigña Guamán, N. (2024). Crecimiento de la *Brachiaria decumbens*, influenciado por los macroinvertebrados del suelo en la amazonía ecuatoriana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 8(1): 8263-8280.
- Valbuena, N., Tejos, R., y Terán, Y. (2016). Efecto de fertilización nitrogenada e intervalo entre cortes sobre contenido de proteína y fibra en *Brachiaria brizantha* cv. Toledo en portuguesa. *Revista Unellez Ciencia y Tecnología* 34(1): 25-32.
- Valles, B., Castillo, E., y Bernal, H. (2016). Rendimiento y degradabilidad ruminal de materia seca y energía de diez pastos tropicales cosechados a cuatro edades. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 7(2): 141-158.

- Varas-Alava, J. (2022). Diagnóstico Visual-térmico en sistemas eléctricos de subtransmisión y distribución con el uso de drones para efectuar mantenimientos. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil. Guayaquil - Ecuador. 129 p.
- Vásquez, E., Morales, E., y Achkar, M. (2021). Evaluación del uso de sensores remotos para identificar manchas de crudo en áreas costa afuera del Uruguay. Boletín de Geología 43(2): 185-202.
- Vélez-Mora, R. (2021). Eficacia de alternativas fisionutricionales sobre la capacidad de rebrote y rendimiento del pasto Guinea (*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K.Simon y S.W.L.Jacobs.) en secano. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta - Ecuador. 45 p.
- Ventura-Ríos, J., Santiago-Ortega, M., Barrera-Martínez, I., Álvarez-Vázquez, P., Carrillo-López, P., y Honorato-Salazar, J. (2021). Caracterización del pasto mombaza como materia prima para producir bioetanol. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 12(2): 235-246.
- Verma, S., Gantait, S., Jeong, B., y Hwang, S. (2018). Enhanced growth and cardenolides production in *Digitalis purpurea* under the influence of different LED exposures in the plant factory. Nature Scientific Reports 8: e18009.
- Vite, H., Vargas, L., y Vargas, J. (2018). Uso de índices espectrales en la agricultura de precisión: Caso de estudio campus de la Facultad Técnica de Machala. Revista Alternativas 19(1): 71-79.
- White, R., Bomber, M., Hupy, J., y Shortridge, A. (2018). UAS-GEOBIA approach to sapling identification in jack pine barrens after fire. Drones 2(4): 1-15.
- Yáñez, S., Silvestre, L., y Chamorro, I. (2023). Contenido de clorofila en hojas de papas de altura para estimar la calidad de los tubérculos. La Granja, Revista de Ciencias de la Vida 38(2): 46-58.
- Yue, X. (2019). Evaluation of both SPAD reading and SPAD index on estimating the plant nitrogen status of winter wheat. International Journal of Plant Production 14: 67-75.
- Zárate-Martínez, W., Arellano-García, M., Ramírez-Godina, F., Moreno-León, K., y González-Sandoval, D. (2021). Evaluación de diferentes niveles de radiación sobre la densidad estomática de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 8(3): e3009.
- Zazueta-Torres, N., Yáñez-Juárez, M., Ayala-Tafoya, F., Velázquez-Alcaraz, T., López-Orona, C., y Díaz-Valdés, T. (2023). Calidad de luz de lámparas fluorescentes en el crecimiento de pepino y severidad de *Oidium* sp. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 13(6): 977-989.
- Zhu, F., Jiewei, L., Honghui, X., y Goodman, E. (2018). Automatic Tobacco plant detection in UAV images via deep Neural Networks. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 11(3): 876-887.

CAPÍTULO VII

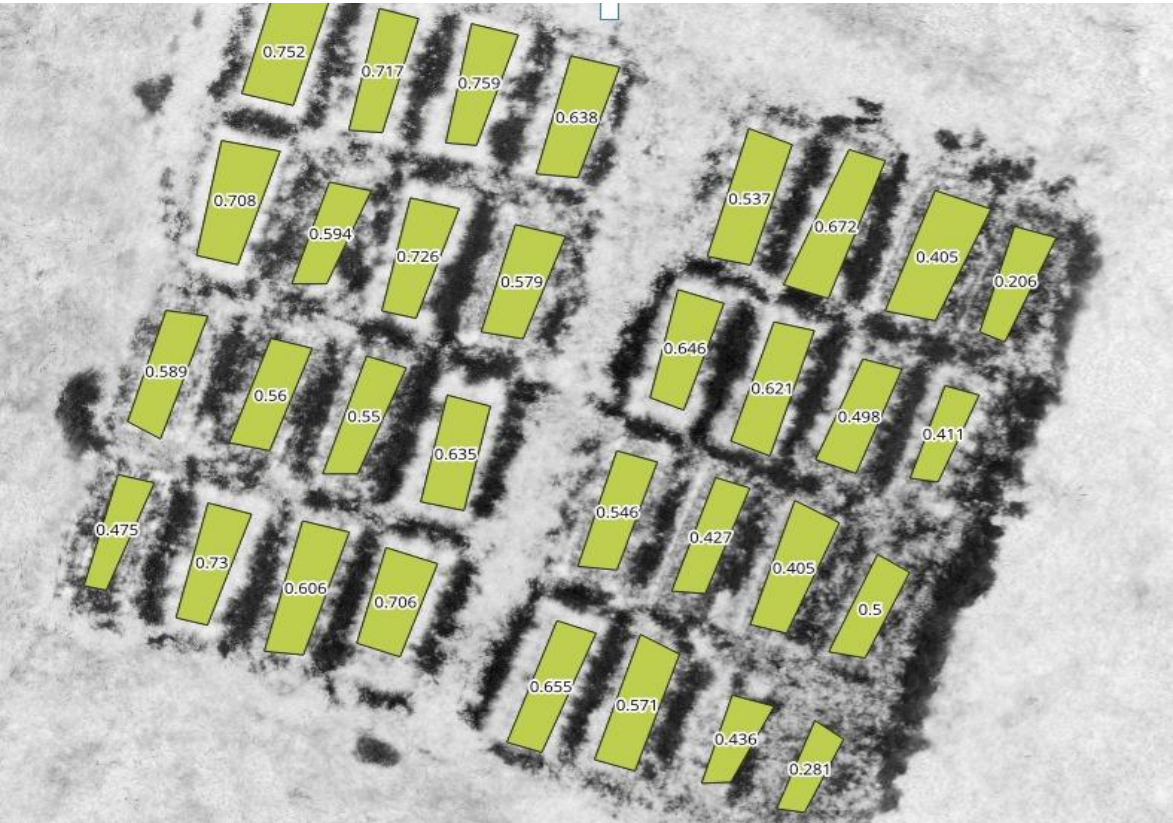
ANEXOS

7.1. Anexos

Anexo A. Datos obtenidos de la evaluación de NDVI pre corte en los pastos evaluados



Anexo B. Datos obtenidos de la evaluación de NDVI post corte en los pastos evaluados



Anexo C. Procesamiento de imágenes tomadas del sitio experimental en el vuelo realizado en pre corte de los pastos



Anexo D. Procesamiento de imágenes tomadas del sitio experimental en el vuelo realizado en post corte de los pastos



Anexo E. Resultados del test de normalidad de Shapiro-Wilk aplicado a los datos

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Área foliar	32	2.24	0.19	0.96	0.5448
IAF- pre corte	32	3.35	0.37	0.89	0.1050
IAF-post corte	32	2.54	0.28	0.90	0.0739
IC (t/ha)	32	7.69	1.53	0.90	0.0518
NDVI pre corte	32	0.73	0.04	0.92	0.0548
NDVI post corte	32	0.57	0.14	0.93	0.1663
PAR bajo	32	342.70	185.99	0.93	0.1110
PAR alto	32	1175.17	185.06	0.96	0.5497
APAR	32	832.47	148.52	0.96	0.5869

Anexo F. Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: contenido de clorofila y área foliar

Clorofila

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Clorofila	32	0.51	0.27	9.33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	19.22	10	1.92	2.17	0.0644
Repeticiones	14.15	3	4.72	5.33	0.0069
Pendientes	9.0E-04	1	9.0E-04	1.0E-03	0.9748
Especies	4.89	3	1.63	1.84	0.1703
Pendientes*Especies	0.18	3	0.06	0.07	0.9770
Error	18.57	21	0.88		
Total	37.79	31			

Área foliar

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Área foliar	32	0.74	0.62	5.25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.83	10	0.08	5.97	0.0003
Repeticiones	0.16	3	0.05	3.94	0.0225
Pendientes	1.2E-03	1	1.2E-03	0.09	0.7670
Especies	0.63	3	0.21	15.17	<0.0001
Pendientes*Especies	0.03	3	0.01	0.75	0.5339
Error	0.29	21	0.01		
Total	1.12	31			

Anexo G. Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: índice de área foliar (IAF) pre y post corte

IAF- pre corte

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
IAF- pre corte	32	0.71	0.57	7.28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.03	10	0.30	5.08	0.0008
Repeticiones	0.16	3	0.05	0.90	0.4577
Pendientes	3.1E-04	1	3.1E-04	0.01	0.9430
Especies	2.19	3	0.73	12.27	0.0001
Pendientes*Especies	0.67	3	0.22	3.77	0.0262
Error	1.25	21	0.06		
Total	4.28	31			

IAF-post corte

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
IAF-post corte	32	0.75	0.63	6.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.83	10	0.18	6.38	0.0002
Repeticiones	0.04	3	0.01	0.47	0.7059
Pendientes	0.03	1	0.03	0.98	0.3323
Especies	1.25	3	0.42	14.51	<0.0001
Pendientes*Especies	0.51	3	0.17	5.95	0.0042
Error	0.60	21	0.03		
Total	2.43	31			

Anexo H. Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: índice del cultivo y NDVI pre corte

IC (t/ha)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
IC (t/ha)	32	0.91	0.87	7.17

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	66.07	10	6.61	21.74	<0.0001
Repeticiones	0.32	3	0.11	0.35	0.7908
Pendientes	0.10	1	0.10	0.33	0.5700
Especies	64.01	3	21.34	70.20	<0.0001
Pendientes*Especies	1.64	3	0.55	1.80	0.1776
Error	6.38	21	0.30		
Total	72.46	31			

NDVI pre corte

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI pre corte	32	0.34	0.02	5.46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	10	1.7E-03	1.06	0.4302
Repeticiones	4.1E-04	3	1.4E-04	0.09	0.9669
Pendientes	1.3E-03	1	1.3E-03	0.81	0.3791
Especies	0.01	3	3.1E-03	1.96	0.1508
Pendientes*Especies	0.01	3	2.0E-03	1.23	0.3247
Error	0.03	21	1.6E-03		
Total	0.05	31			

Anexo I. Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: NDVI post corte y PAR bajo

NDVI post corte

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI post corte	32	0.68	0.52	16.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.39	10	0.04	4.38	0.0021
Repeticiones	0.02	3	0.01	0.92	0.4480
Pendientes	0.20	1	0.20	22.34	0.0001
Especies	0.08	3	0.03	2.96	0.0558
Pendientes*Especies	0.09	3	0.03	3.29	0.0406
Error	0.18	21	0.01		
Total	0.57	31			

PAR bajo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PAR bajo	32	0.60	0.40	41.88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	639753.16	10	63975.32	3.11	0.0138
Repeticiones	426074.15	3	142024.72	6.89	0.0021
Pendientes	5006.25	1	5006.25	0.24	0.6271
Especies	60359.11	3	20119.70	0.98	0.4225
Pendientes*Especies	148313.66	3	49437.89	2.40	0.0965
Error	432587.10	21	20599.39		
Total	1072340.27	31			

Anexo J. Resultados del análisis de varianza realizado en las variables: PAR alto y APAR

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PAR alto	32	0.59	0.39	12.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	624742.66	10	62474.27	3.00	0.0162
Repeticiones	160059.10	3	53353.03	2.56	0.0820
Pendientes	115922.33	1	115922.33	5.57	0.0280
Especies	171390.78	3	57130.26	2.75	0.0686
Pendientes*Especies	177370.44	3	59123.48	2.84	0.0625
Error	436954.90	21	20807.38		
Total	1061697.56	31			

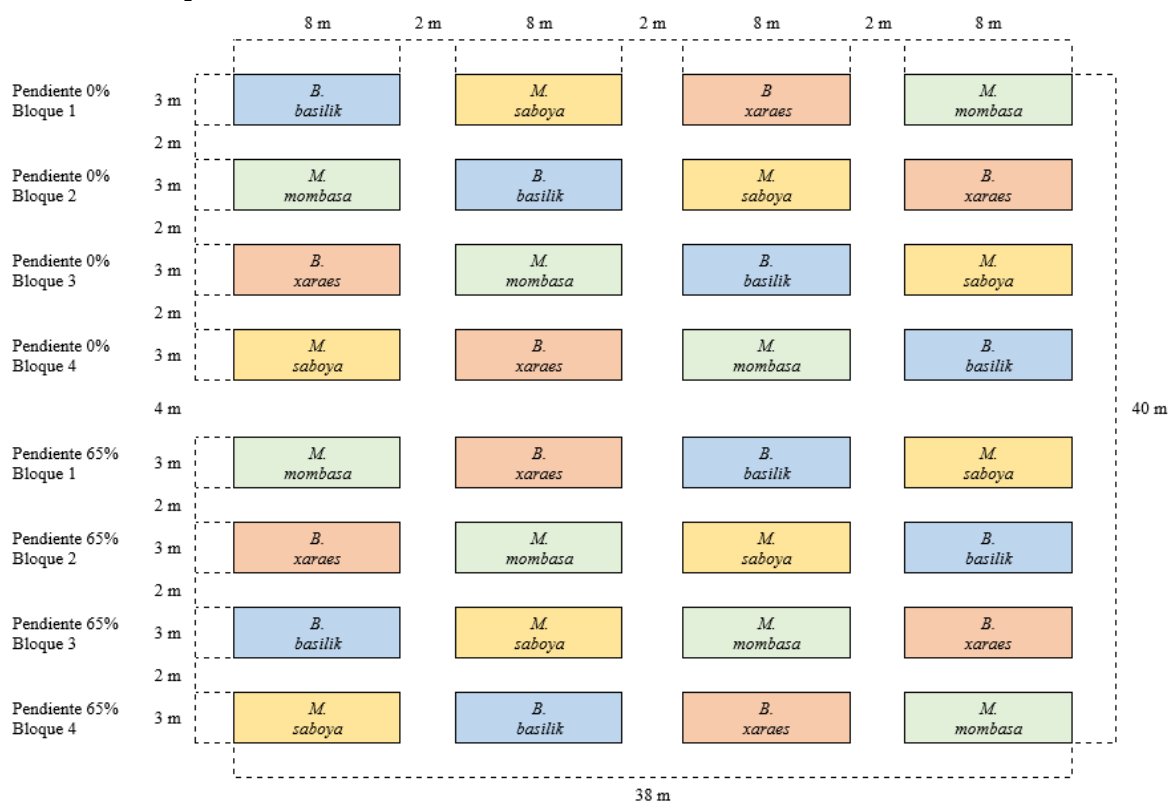
APAR

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
APAR	32	0.51	0.27	15.24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	345785.95	10	34578.60	2.15	0.0672
Repeticiones	197566.18	3	65855.39	4.09	0.0196
Pendientes	72746.33	1	72746.33	4.52	0.0455
Especies	48539.02	3	16179.67	1.01	0.4100
Pendientes*Especies	26934.43	3	8978.14	0.56	0.6487
Error	338001.64	21	16095.32		
Total	683787.59	31			

Anexo K. Croquis del experimento y distribución de las subparcelas en el sitio experimental.



Anexo L. Siembra de los pastos en el sitio experimental



Anexo M. Aplicación de riego en las unidades experimentales



Anexo N. Instalación del ceptómetro para la evaluación de la PAR

