

Monitoreo multitemporal del vigor vegetativo y la productividad forrajera mediante imágenes UAV multispectrales y NDVI en un sistema de pastoreo rotacional altoandino

Multitemporal monitoring of vegetation vigor and forage productivity using multispectral UAV imagery and NDVI in a high-andean rotational grazing system

Wanda Maribel Champutiz Castro*
Universidad Politécnica Estatal del Carchi
Tulcán - Ecuador
wanda.champutiz@upec.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-3899-9808>

Jeysonn Marcelo Palma Mera
Universidad Politécnica Estatal del Carchi
Tulcán - Ecuador
jeysonn.palma@upec.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0009-3750-5030>

*Correspondencia:
wanda.champutiz@upec.edu.ec

Cómo citar este artículo:
Champutiz, W., & Palma, J. (2026). Monitoreo multitemporal del vigor vegetativo y la productividad forrajera mediante imágenes UAV multispectrales y NDVI en un sistema de pastoreo rotacional altoandino. *Esprint Investigación*, 5(1), 1054-1065. <https://doi.org/10.61347/ei.v5i1.331>

Recibido: 19 de mayo de 2026
Aceptado: 22 de junio de 2026
Publicado: 29 de junio de 2026

Copyright: Derechos de autor 2026 Wanda Maribel Champutiz Castro, Jeysonn Marcelo Palma Mera.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0.

Resumen: El monitoreo de pasturas mediante tecnologías de teledetección constituye una herramienta eficiente para evaluar la productividad y la variabilidad espacial de sistemas forrajeros bajo manejo rotacional. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la productividad forrajera y la variabilidad espacial del vigor vegetativo mediante el análisis multitemporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) derivado de imágenes multispectrales obtenidas con vehículos aéreos no tripulados (UAV) en un sistema de pastoreo rotacional del Centro Experimental San Francisco de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC), Ecuador. La investigación se desarrolló en un potrero de 5000 m² con mezcla forrajera destinada a la alimentación de ganado lechero, donde durante marzo, abril y mayo de 2026 se registraron variables productivas como tasa de crecimiento, oferta de forraje, oferta real de forraje y cobertura de malezas, mediante aforos semanales con Rising Plate Meter y procesamiento con el software 3R. Las imágenes multispectrales fueron adquiridas con un UAV DJI Mavic 3 Multispectral y procesadas para la generación de ortomosaicos y mapas NDVI, cuyos valores oscilaron entre -0,81 y 0,64, evidenciando heterogeneidad espacial del vigor vegetativo. Los resultados mostraron que abril presentó el mayor desempeño productivo, con una tasa de crecimiento de 630,2 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ y una oferta real de forraje de 4.151,4 kg MS ha⁻¹, además de una alta variabilidad temporal en la tasa de crecimiento (CV = 71,6 %) y variabilidad moderada en la oferta real de forraje (CV = 33,8 %). En conjunto, se concluye que la integración de imágenes multispectrales UAV y análisis NDVI constituye una herramienta no destructiva, de alta resolución espacial y utilidad operativa para caracterizar la productividad forrajera y apoyar la gestión de sistemas de pastoreo rotacional.

Palabras clave: Agricultura de precisión, imágenes multispectrales, NDVI, productividad forrajera, pastoreo rotacional, UAV.

Abstract: The monitoring of pastures using remote sensing technologies represents an efficient tool for assessing productivity and spatial variability in forage systems under rotational grazing management. The aim of this study was to evaluate forage productivity and spatial variability of vegetation vigor through the multitemporal analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from multispectral images acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs) in a rotational grazing system at the San Francisco Experimental Center of the State Polytechnic University of Carchi (UPEC), Ecuador. The study was conducted in a 5,000 m² pasture area with mixed forage species for dairy cattle production. During March, April, and May 2026, productive variables such as growth rate, forage availability, real forage offer, and weed coverage were recorded using weekly measurements with a Rising Plate Meter and processed using 3R software. Multispectral images were acquired using a DJI Mavic 3 Multispectral UAV and processed to generate orthomosaics and NDVI maps, with values ranging from -0.81 to 0.64, indicating high spatial heterogeneity in vegetation vigor. Results showed that April presented the highest productivity, with a growth rate of 630.2 kg DM ha⁻¹ day⁻¹ and a real forage availability of 4,151.4 kg DM ha⁻¹, as well as high temporal variability in growth rate (CV = 71.6%) and moderate variability in real forage availability (CV = 33.8%). Overall, the integration of UAV multispectral imagery and NDVI analysis proved to be a non-destructive, high-resolution, and operationally useful approach for characterizing forage productivity and supporting decision-making in rotational grazing systems.

Keywords: Forage productivity, multispectral imagery, NDVI, precision agriculture, rotational grazing, UAV.

1. Introducción

Los pastos constituyen ecosistemas terrestres fundamentales por su elevada capacidad de producción de biomasa, su contribución a la conservación del suelo y su participación en el ciclo de nutrientes, desempeñando un papel esencial en la seguridad alimentaria y en la sostenibilidad de la producción ganadera (Zhao et al., 2020). Su crecimiento, disponibilidad y calidad nutricional están condicionados por factores ambientales, como el déficit hídrico y las altas temperaturas, los cuales afectan la productividad y la eficiencia de los sistemas de pastoreo (Xue & Su, 2017).

Asimismo, las decisiones relacionadas con el manejo del pastoreo y la carga animal influyen directamente en el aprovechamiento del forraje y en la sostenibilidad de los sistemas ganaderos, por lo que requieren información precisa y oportuna para optimizar su gestión (Rouquette et al., 2023). Los métodos tradicionales para evaluar la calidad de los pastos se fundamentan en muestreos de campo y análisis de laboratorio; sin embargo, estos procedimientos son destructivos, demandan elevados costos, requieren tiempos prolongados de procesamiento y necesitan un gran número de muestras para representar adecuadamente la variabilidad espacial del terreno.

Además, el tiempo transcurrido entre el muestreo y la obtención de resultados limita su aplicación en el monitoreo rutinario de los potreros (Ali & Kaul, 2025). En este contexto, la caracterización de la variabilidad espacial constituye un componente esencial de la agricultura de precisión, ya que permite implementar estrategias de manejo diferenciadas (Villalobos & Fereres, 2017).

Frente a estas limitaciones, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han consolidado como una herramienta eficiente para el monitoreo continuo, preciso y no destructivo de las pasturas, al proporcionar información espacial y temporal de alta resolución que facilita la evaluación del estado de la vegetación y la gestión sostenible de los sistemas ganaderos (Ali & Kaul, 2025).

En particular, estos sistemas permiten estimar índices de vegetación como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ampliamente utilizado para evaluar el vigor vegetativo, la recuperación posterior al pastoreo y la heterogeneidad espacial del forraje (Matese & Di Gennaro, 2021; Serrano et al., 2024). Asimismo, el uso de UAV ha demostrado su utilidad para el monitoreo de la salud de la vegetación en diversos ecosistemas mediante imágenes multiespectrales de alta resolución (Malenovský et al., 2019).

El monitoreo multitemporal permite evaluar la evolución de una variable en diferentes momentos, facilitando la identificación de cambios y tendencias en los sistemas pastoriles. En este contexto, el vigor vegetativo expresa la capacidad fisiológica de la vegetación para crecer y desarrollarse, mientras que la productividad forrajera representa la cantidad de biomasa producida en un área y período determinados, constituyendo uno de los principales indicadores del desempeño de los sistemas de pastoreo.

Las imágenes multiespectrales obtenidas mediante UAV permiten capturar la respuesta espectral de la vegetación en diferentes bandas del espectro electromagnético, proporcionando información detallada sobre la condición fisiológica y la variabilidad espacial de las pasturas (Zhang & Kovacs, 2012; von Bueren & Yule, 2013). Esta capacidad resulta especialmente relevante en los sistemas de pastoreo rotacional, donde la alternancia entre períodos de ocupación y descanso favorece la recuperación de la vegetación, optimiza el aprovechamiento del forraje y contribuye a la sostenibilidad productiva y ambiental (Allen et al., 2011; Rouquette et al., 2023).

El NDVI se calcula a partir de la reflectancia registrada en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano (NIR), constituyéndose en uno de los indicadores más utilizados para evaluar el estado fisiológico de

la vegetación. Este índice presenta una estrecha relación con el contenido de clorofila, la biomasa y la actividad fotosintética, ya que las hojas absorben la radiación en la región roja del espectro y reflejan intensamente el infrarrojo cercano (Tucker, 1979; Zhang & Kovacs, 2012).

Diversos estudios han demostrado que valores elevados de NDVI reflejan un mayor vigor vegetativo y una mayor capacidad fotosintética, mientras que valores reducidos evidencian condiciones de estrés vegetal asociadas con disminuciones en el contenido de clorofila y la productividad del forraje (Serrano et al., 2024). En consecuencia, las imágenes multiespectrales constituyen una alternativa eficiente, rentable y no destructiva para estimar la calidad y productividad de las pasturas en amplias superficies (Ali & Kaul, 2025; Serrano et al., 2024).

Con base en estos antecedentes, el objetivo del presente estudio fue evaluar la dinámica temporal del vigor vegetativo de las pasturas sometidas a diferentes períodos de descanso post-pastoreo mediante el análisis multitemporal del NDVI obtenido a partir de imágenes multiespectrales adquiridas con UAV. Asimismo, se buscó caracterizar la variabilidad espacial del vigor vegetativo en función de los días de descanso del pasto, con el propósito de generar información que contribuya a la toma de decisiones en sistemas de pastoreo rotacional y fortalecer el manejo sostenible de los recursos forrajeros.

En concordancia con este objetivo, se plantea como hipótesis que las imágenes multiespectrales obtenidas mediante UAV y el análisis del NDVI permiten identificar diferencias espaciales y temporales del vigor vegetativo asociadas a los distintos períodos de descanso de las pasturas, constituyéndose en una herramienta eficaz para el monitoreo de la productividad forrajera y el apoyo a la gestión sostenible de los sistemas ganaderos.

2. Metodología

Área de estudio y diseño experimental

El estudio se llevó a cabo en un potrero perteneciente a la plataforma lechera del Centro Experimental San Francisco de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC), bajo condiciones de producción de pasturas caracterizadas por una distribución heterogénea de la vegetación y la presencia localizada de infraestructura antropogénica. El área experimental, delimitada en 5000 m², presentó variabilidad espacial en la cobertura vegetal, la composición de la mezcla forrajera, la acumulación de biomasa y la respuesta espectral, lo que permitió evaluar la dinámica de las pasturas bajo condiciones ambientales heterogéneas.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y se fundamentó en la obtención y análisis de variables numéricas relacionadas con el vigor vegetativo y la productividad forrajera. Se empleó un diseño observacional no experimental, debido a que no se aplicaron tratamientos ni se manipularon deliberadamente las condiciones del sistema de pastoreo, limitándose al registro y análisis de las variables bajo condiciones reales de manejo.

El estudio presentó un carácter longitudinal y multitemporal, puesto que las mediciones productivas y espectrales se realizaron de forma repetida durante los meses de marzo, abril y mayo de 2026. Este procedimiento permitió evaluar la variabilidad espacial del vigor vegetativo mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) derivado de imágenes multiespectrales adquiridas con UAV, así como describir los cambios temporales en la productividad forrajera dentro de un sistema de pastoreo rotacional altoandino.

Adquisición de imágenes multiespectrales mediante UAV

Para las campañas de adquisición de imágenes se empleó un vehículo aéreo no tripulado (UAV), cuyas especificaciones técnicas se presentan en la tabla 1. Los vuelos se realizaron a una altura de 40 m sobre el nivel del terreno (AGL), bajo condiciones atmosféricas y de iluminación estables, con el propósito de minimizar las variaciones radiométricas entre fechas de monitoreo y garantizar la consistencia de la información espectral obtenida. El sensor de irradiancia incorporado en la plataforma permitió compensar las variaciones en las condiciones de iluminación durante la adquisición de las imágenes.

Tabla 1

Especificaciones técnicas del UAV DJI Mavic 3 Multispectral empleado en la adquisición de imágenes

Componente	Especificación técnica
Plataforma UAV	DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M Enterprise)
Cámara RGB	Sensor CMOS 4/3 de 20 MP con obturador mecánico
Sistema multiespectral	Cuatro sensores CMOS de 1/2.8" con resolución de 5 MP por banda
Bandas espectrales	Verde (560 nm), Roja (650 nm), Borde rojo (730 nm) e Infrarrojo cercano (860 nm)
Sensor adicional	Sensor de irradiancia solar para calibración radiométrica en tiempo real
Resolución RGB	20 megapíxeles
Resolución multiespectral	5 megapíxeles por banda
Altitud máxima de operación	6000 m s.n.m.
Índices de vegetación generados	NDVI, NDRE y otros índices derivados de las bandas espectrales disponibles

Las imágenes multiespectrales fueron adquiridas mediante un UAV DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M Enterprise), equipado con una cámara RGB CMOS 4/3 de 20 MP con obturador mecánico y un sistema multiespectral integrado compuesto por cuatro sensores CMOS de 1/2.8" y 5 MP de resolución, capaces de registrar información en las bandas verde (560 nm), roja (650 nm), borde rojo (730 nm) e infrarrojo cercano (860 nm).

Adicionalmente, el equipo estuvo equipado con un sensor de irradiancia solar para la corrección radiométrica y la compensación de las condiciones de iluminación durante el vuelo. Las misiones de adquisición se realizaron a una altura de 40 m sobre el nivel del terreno (AGL), lo que permitió obtener imágenes de alta resolución espacial para la generación de ortomosaicos y el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), utilizado para evaluar la variabilidad espacial del vigor vegetativo en el área de estudio.

Previo al análisis espectral, todas las imágenes obtenidas mediante UAV fueron sometidas a procesos de generación de ortomosaicos, corrección radiométrica y georreferenciación. Los ortomosaicos resultantes permitieron realizar análisis espaciales de alta resolución del vigor vegetativo y de la heterogeneidad de las pasturas.

Las imágenes multiespectrales fueron procesadas mediante el software ArcGIS Pro (Esri Inc., Redlands, California, EE. UU.), con el cual se realizaron la georreferenciación, la generación de

ortomosaicos, el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la elaboración de los mapas temáticos empleados para el análisis espacial del vigor vegetativo. El vigor vegetativo fue evaluado mediante el NDVI, calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

donde NIR correspondió a la reflectancia registrada en la banda del infrarrojo cercano y Red representó la reflectancia registrada en la banda espectral roja.

Con base en los valores obtenidos del NDVI, el área de estudio fue clasificada en tres categorías de vigor vegetativo: bajo (NDVI < 0,20), moderado (NDVI entre 0,20 y 0,50) y alto (NDVI > 0,50), lo que permitió identificar espacialmente diferencias en la actividad fotosintética. Los valores elevados de NDVI se asociaron con áreas de mayor vigor vegetativo, mientras que los valores bajos correspondieron a sectores con menor actividad fotosintética (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979; Xue & Su, 2017). Los tonos verdes representaron una mayor actividad fotosintética y acumulación de biomasa, mientras que los tonos amarillos y rojos indicaron vegetación de bajo vigor, suelo desnudo o superficies antropogénicas.

En cada campaña de vuelo se adquirió un conjunto de imágenes multiespectrales que posteriormente fueron procesadas para generar un ortomosaico representativo del área de estudio destinado al análisis multitemporal del NDVI. Paralelamente, se realizaron aforos de pastura con frecuencia semanal mediante un Rising Plate Meter, instrumento que estimó indirectamente la biomasa a partir de la altura comprimida de la pastura, lo que permitió registrar la dinámica de crecimiento y la disponibilidad de biomasa durante los tres meses de evaluación.

En total, se obtuvieron 12 observaciones productivas (cuatro por cada mes), las cuales fueron procesadas mediante el software 3R (Rotation, Residual and Recovery) para estimar variables como la tasa de crecimiento, la oferta de forraje y la oferta real de forraje. Posteriormente, estos registros fueron utilizados para comparar temporalmente su comportamiento con la información espacial derivada de las imágenes multiespectrales.

Variables productivas y monitoreo de pasturas

Las variables productivas fueron monitoreadas semanalmente durante los meses de marzo, abril y mayo, y posteriormente fueron agregadas para el análisis temporal mensual, con el fin de evaluar los cambios en la disponibilidad de forraje y la producción de biomasa. Los aforos se efectuaron una vez por semana mediante un plato medidor de forraje (Rising Plate Meter), técnica ampliamente utilizada para la estimación indirecta de biomasa en sistemas pastoriles.

Las mediciones obtenidas en campo fueron registradas y procesadas mediante el software 3R (Rotation, Residual and Recovery), el cual permitió estimar variables como crecimiento de la pastura (kg MS ha⁻¹ día⁻¹), oferta de forraje (kg MS ha⁻¹) y oferta real de forraje (kg MS ha⁻¹). La frecuencia semanal de evaluación permitió generar una serie temporal de observaciones sobre la dinámica de crecimiento y disponibilidad de biomasa durante el período de estudio, facilitando el análisis temporal de la productividad forrajera bajo condiciones de pastoreo rotacional. Las variables evaluadas se presentan en la tabla 2.

Tabla 2

Variables evaluadas durante el monitoreo multitemporal de las pasturas

Variable	Unidad	Descripción
NDVI	Adimensional	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada empleado para evaluar el vigor vegetativo y la variabilidad espacial de las pasturas mediante imágenes multiespectrales obtenidas con UAV.
Crecimiento de la pastura	kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹	Tasa diaria de acumulación de materia seca producida por la pastura durante el período de evaluación.
Oferta de forraje	kg MS ha ⁻¹	Cantidad total de materia seca disponible por unidad de superficie antes del aprovechamiento por los animales.
Oferta real de forraje	kg MS ha ⁻¹	Cantidad efectiva de materia seca disponible para el consumo animal, estimada considerando las condiciones de manejo del sistema de pastoreo.
Cobertura de malezas	%	Proporción de la superficie del potrero ocupada por especies vegetales no deseadas respecto al área total evaluada.

Análisis Estadístico

Debido al carácter exploratorio del estudio y al tamaño de la muestra disponible, el análisis estadístico se limitó al cálculo de estadísticos descriptivos, empleándose medias, desviaciones estándar y coeficientes de variación para caracterizar la dinámica temporal de las variables evaluadas. Las comparaciones entre los meses de marzo, abril y mayo permitieron identificar variaciones temporales en el vigor vegetativo, la acumulación de biomasa y la disponibilidad de forraje durante el período de monitoreo. Asimismo, el coeficiente de variación se utilizó para cuantificar la magnitud relativa de la variabilidad observada en las variables productivas evaluadas.

3. Resultados

Dinámica temporal de la productividad forrajera y variabilidad del vigor vegetativo

La figura 1 presenta el mapa del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del potrero experimental del Centro Experimental San Francisco UPEC, obtenido a partir de imágenes multiespectrales adquiridas mediante UAV. El rango de valores del NDVI varía aproximadamente entre -0,81 y 0,64, lo que evidencia una alta heterogeneidad espacial en la condición de la vegetación dentro del área de estudio.

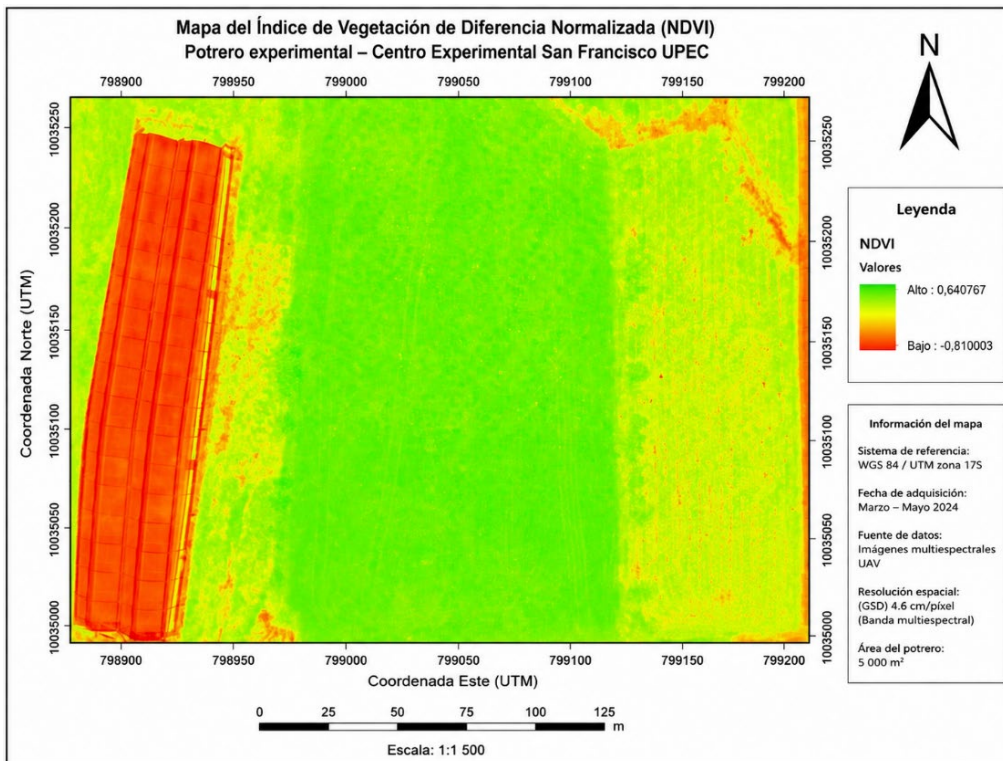
En la distribución espacial, las zonas representadas en tonos verdes corresponden a áreas con mayor vigor vegetativo y mayor actividad fotosintética, asociadas a mayor densidad y acumulación de biomasa. Por el contrario, los tonos amarillos, naranjas y rojos indican sectores con bajo vigor vegetativo o ausencia de cobertura vegetal, posiblemente asociados a suelo desnudo, áreas degradadas o infraestructura interna del potrero. Se observa además una franja lateral con valores muy bajos de NDVI, correspondiente a una estructura lineal que sugiere la presencia de infraestructura o áreas no vegetadas.

La figura incluye información cartográfica complementaria como el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 17S, escala aproximada 1:1 500, resolución espacial de 4,6 cm/píxel, y un área total de estudio de 5 000 m², lo que garantiza alta precisión espacial en la caracterización de la variabilidad del

vigor vegetativo. En conjunto, el mapa permite identificar patrones espaciales claros de heterogeneidad del pasto, fundamentales para el análisis de productividad forrajera y manejo del sistema de pastoreo rotacional.

Figura 1

Distribución espacial del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) obtenido mediante imágenes multiespectrales UAV en el potrero experimental del Centro Experimental San Francisco UPEC



La evaluación multitemporal realizada durante los meses de marzo, abril y mayo evidenció variaciones significativas en la productividad de las pasturas a lo largo del período de monitoreo. Los indicadores productivos mostraron una respuesta temporal diferenciada en el crecimiento del forraje y la acumulación de biomasa, observándose una disminución en mayo en comparación con abril, lo que refleja la variabilidad temporal del sistema estudiado (tabla 3).

La tasa de crecimiento de la pastura aumentó de 220,1 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ en marzo a 630,2 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ en abril, valor que representó el mayor rendimiento productivo del período. Posteriormente, disminuyó a 188,7 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ en mayo. De manera similar, la oferta real de forraje se incrementó de 2.541,0 kg MS ha⁻¹ en marzo a 4.151,4 kg MS ha⁻¹ en abril, para luego descender a 2.321,0 kg MS ha⁻¹ en mayo.

En términos relativos, el crecimiento de la pastura presentó un incremento aproximado del 186,3 % entre marzo y abril, mientras que la oferta real de forraje aumentó en un 63,4 % en el mismo período. En contraste, entre abril y mayo, la tasa de crecimiento disminuyó en aproximadamente un 70,1 %, acompañada de una reducción del 44,1 % en la oferta real de forraje. Estos resultados indican que abril representó el período de mayor acumulación de biomasa y mejor desempeño productivo dentro del ciclo vegetativo evaluado.

La cobertura de malezas se mantuvo constante en 50 % durante todo el período de monitoreo, lo que sugiere que las variaciones observadas en la productividad estuvieron asociadas principalmente

a la dinámica de crecimiento de la pastura y no a cambios en la composición de malezas. Para caracterizar la variabilidad temporal de las variables evaluadas, se calcularon estadísticos descriptivos que se presentan en la tabla 4.

Tabla 3

Variación temporal de los indicadores productivos durante el período de evaluación

Mes	Crecimiento (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	Oferta de forraje (kg MS ha ⁻¹)	Oferta real de forraje (kg MS ha ⁻¹)	Cobertura de malezas (%)
Marzo	220,1	1.541	2.541,0	50
Abril	630,2	3.151	4.151,4	50
Mayo	188,7	1.321	2.321,0	50

Tabla 4

Estadísticos descriptivos de las variables productivas durante el período de monitoreo

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Crecimiento (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	346,3	247,9	71,6
Oferta real de forraje (kg MS ha ⁻¹)	3.004,5	1.015,3	33,8

El análisis descriptivo evidenció que el crecimiento de la pastura fue la variable con mayor variabilidad temporal durante el período de estudio, mientras que la oferta real de forraje presentó una variabilidad moderada. En conjunto, los resultados confirman que el monitoreo multiespectral mediante UAV, integrado con indicadores productivos de campo, permite caracterizar de manera eficiente la dinámica espaciotemporal del vigor vegetativo y la productividad forrajera en sistemas de pastoreo rotacional.

4. Discusión

El monitoreo multitemporal realizado durante los meses de marzo, abril y mayo evidenció una variabilidad temporal significativa en la productividad de las pasturas y en el vigor vegetativo dentro del sistema de pastoreo rotacional evaluado. El incremento del crecimiento de la pastura desde 220,1 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ en marzo hasta 630,2 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ en abril, junto con el aumento de la oferta real de forraje de 2.541,0 a 4.151,4 kg MS ha⁻¹, refleja fluctuaciones marcadas en la acumulación de biomasa durante el ciclo vegetativo analizado. Estos resultados son consistentes con estudios basados en UAV que han demostrado la capacidad de las imágenes multiespectrales para detectar variaciones temporales en la productividad de la vegetación (Tsouros et al., 2019).

Los valores de NDVI obtenidos en el presente estudio (-0,81 a 0,64) revelaron una marcada heterogeneidad espacial en el área experimental. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Rouse et al. (1974), quienes establecieron el NDVI como un indicador del vigor vegetativo basado en el contraste entre las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. Posteriormente, Tucker (1979) demostró que este índice se relaciona estrechamente con la actividad fotosintética, la densidad vegetal y la acumulación de biomasa bajo diversas condiciones ambientales.

La diferenciación espacial observada entre zonas de alto y bajo vigor coincide con Zhang & Kovacs (2012), quienes señalaron que las plataformas UAV permiten identificar con alta resolución espacial la variabilidad de la vegetación y zonas de manejo que no son detectables mediante observación convencional. En este sentido, la teledetección mediante UAV se consolida como una herramienta clave en la agricultura de precisión debido a su capacidad de generar información detallada, flexible y de rápida adquisición.

El mayor desempeño productivo registrado en abril coincidió con el período de máxima acumulación de biomasa dentro del ciclo evaluado. Aunque el estudio no incorporó análisis inferenciales que permitan establecer relaciones estadísticas entre NDVI y biomasa, la literatura evidencia correlaciones consistentes entre variables espectrales y productividad forrajera. En este sentido, Näsi et al. (2018) reportaron asociaciones significativas entre datos UAV, biomasa y estado nutricional en cultivos forrajeros, respaldando su utilidad para la estimación indirecta de productividad.

Un hallazgo relevante fue la persistencia de una cobertura de malezas del 50 % durante todo el período de monitoreo, pese a las variaciones en el crecimiento de la pastura. Este comportamiento sugiere que la dinámica productiva estuvo influenciada principalmente por el crecimiento del forraje y no por cambios en la composición de la cobertura vegetal. Estudios como el de Peña et al. (2015) han demostrado que las imágenes multiespectrales UAV permiten discriminar coberturas vegetales y detectar malezas, lo cual resalta la importancia de considerar la composición florística en la interpretación de índices espectrales.

Las fluctuaciones temporales observadas en la productividad de las pasturas respaldan la utilidad del NDVI derivado de UAV como indicador operativo para el monitoreo de sistemas forrajeros. Hunt et al. (2010) señalaron que las imágenes multiespectrales permiten evaluar el estado de los cultivos con alta precisión espacial, mientras que Berni et al. (2009) destacaron su capacidad para detectar variaciones fisiológicas antes de que estas sean visibles mediante observación directa, lo que representa una ventaja en la toma de decisiones de manejo.

La dinámica temporal observada indicó que abril representó el período de mayor desempeño productivo dentro del ciclo evaluado, evidenciado por las mayores tasas de crecimiento y disponibilidad de forraje. A pesar de que el estudio se desarrolló en una única unidad experimental, la integración de datos multiespectrales UAV con variables productivas permitió caracterizar de forma consistente la dinámica del sistema pastoril. Resultados similares han sido reportados por Tsouros et al. (2019), quienes destacan la utilidad de los UAV como herramientas rápidas, no destructivas y de bajo costo para el monitoreo agrícola.

En conjunto, la integración del NDVI, las imágenes multiespectrales y las variables productivas proporcionó un marco metodológico robusto para analizar la variabilidad espacial y temporal del sistema de pastoreo evaluado. Las fluctuaciones en la acumulación de biomasa, junto con la heterogeneidad espacial detectada en los mapas NDVI, confirman la utilidad de la teledetección mediante UAV para el monitoreo de pasturas y la toma de decisiones en sistemas ganaderos de precisión.

Los resultados deben interpretarse considerando algunas limitaciones. El estudio se desarrolló en una única unidad experimental durante un período de tres meses, lo que limita la generalización de los hallazgos. Asimismo, el análisis se basó principalmente en estadística descriptiva, por lo que no se evaluaron relaciones causales o correlacionales entre NDVI y productividad forrajera. Futuras investigaciones deberían incorporar un mayor número de unidades experimentales, períodos de monitoreo más amplios y análisis inferenciales que permitan fortalecer la comprensión de la relación entre indicadores espectrales y productividad de pasturas.

5. Conclusiones

La integración de imágenes multiespectrales derivadas de UAV y el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permitió caracterizar la variabilidad espacial del vigor vegetativo dentro del sistema de pastoreo rotacional evaluado en el Centro Experimental San Francisco de la UPEC. Los valores de NDVI obtenidos (-0,81 a 0,64) evidenciaron una marcada heterogeneidad espacial, lo que permitió diferenciar zonas con niveles contrastantes de actividad fotosintética y acumulación de biomasa.

La evaluación multitemporal realizada durante los meses de marzo, abril y mayo evidenció variaciones significativas en la productividad de las pasturas a lo largo del período de estudio. El mayor desempeño productivo se registró en abril, cuando el crecimiento de la pastura alcanzó 630,2 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ y la oferta real de forraje 4.151,4 kg MS ha⁻¹, superando los valores observados en marzo y mayo. Estos resultados confirman la existencia de fluctuaciones temporales en la dinámica de crecimiento y acumulación de biomasa en el sistema evaluado.

El uso combinado de indicadores productivos e información multiespectral derivada de UAV permitió describir de manera integral la dinámica espaciotemporal de las pasturas bajo manejo de pastoreo rotacional. La relación entre la variabilidad temporal del crecimiento forrajero y la heterogeneidad espacial del NDVI sugiere la utilidad de la teledetección multiespectral como herramienta no destructiva, eficiente y de alta resolución para el monitoreo de la condición de las pasturas y el apoyo a la toma de decisiones en sistemas de producción ganadera.

Aunque el estudio se desarrolló en una única unidad experimental y en un período de tiempo limitado, los resultados sugieren que el monitoreo multitemporal mediante UAV permite detectar de manera efectiva cambios en el vigor vegetativo y la productividad forrajera. Futuros estudios que incorporen un mayor número de unidades experimentales, series temporales más extensas y análisis inferenciales permitirán fortalecer la generalización de los hallazgos y profundizar la relación entre indicadores espectrales y desempeño productivo en sistemas pastoriles.

Referencias

- Ali, A., & Kaul, H. (2025). Monitoring yield and quality of forages and grassland in the view of precision agriculture applications—A review. *Remote Sensing*, 17(2), 279. <https://doi.org/10.3390/rs17020279>
- Allen, V., Batello, C., Berretta, E., Hodgson, J., Kothmann, M., Li, X., McIvor, J., Milne, J., Morris, C., Peeters, A., & Sanderson, M. (2011). An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*, 66(1), 2–28. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00780.x>
- Berni, J., Zarco-Tejada, P., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>
- Hunt, E., Hively, W., Fujikawa, S., Linden, D., Daughtry, C., & McCarty, G. (2010). Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290–305. <https://doi.org/10.3390/rs2010290>
- Malenovský, Z., Lucieer, A., King, D., Turnbull, J., & Robinson, S. (2019). Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(11), 1842–1857. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12833>

- Matese, A., & Di Gennaro, S. (2021). Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture. *Scientific Reports*, 11(1), 2721. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81652-3>
- Näsi, R., Viljanen, N., Kaivosoja, J., Alhonoja, K., Hakala, T., Markelin, L., & Honkavaara, E. (2018). Estimating biomass and nitrogen amount of barley and grass using UAV and aircraft based spectral and photogrammetric 3D features. *Remote Sensing*, 10(7), 1082. <https://doi.org/10.3390/rs10071082>
- Peña, J., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A., & López-Granados, F. (2015). Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution. *Sensors*, 15(3), 5609–5626. <https://doi.org/10.3390/s150305609>
- Rouquette, F., Sollenberger, L., & Vendramini, J. (2023). Grazing management and stocking strategy decisions for pasture-based beef systems: Experimental confirmation vs. testimonials and perceptions. *Translational Animal Science*, 7(1), txad069. <https://doi.org/10.1093/tas/txad069>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Technical Presentations* (Vol. 1, Section A, Paper A20). National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>
- Serrano, J., Shahidian, S., Paixão, L., Marques da Silva, J., & Paniágua, L. L. (2024). Pasture quality assessment through NDVI obtained by remote sensing: A validation study in the Mediterranean silvo-pastoral ecosystem. *Agriculture*, 14(8), 1350. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081350>
- Tsouros, D., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Tucker, C. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Villalobos, F., & Fereres, E. (2017). *Fitotecnia: Principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Ediciones Mundi-Prensa. <https://n9.cl/rweni>
- von Bueren, S., & Yule, I. (2013). *Multispectral aerial imaging of pasture quality and biomass using unmanned aerial vehicles (UAV)*. En *Proceedings of the FLRC Workshop 2013*. Massey University. <https://n9.cl/s4n7b>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhao, Y., Liu, Z., & Wu, J. (2020). Grassland ecosystem services: A systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecology*, 35(4), 793–814. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00980-3>

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Wanda Maribel Champutiz Castro: Conceptualización, metodología, software, análisis formal, investigación, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Jeysonn Marcelo Palma Mera: Conceptualización, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos, supervisión.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.