

Optimización de la evaluación de pastos mediante la implementación de imágenes multiespectrales y vehículo aéreo no tripulado

Optimization of pasture evaluation through the implementation of multispectral imaging and unmanned aerial vehicle

MSc. Diego Alfonso Peláez Carrillo ¹, PhD. Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero ¹
PhD. Ivaldo Torres Chávez ¹

¹ Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Electrónica Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Correspondencia: diego.pelaez@unipamplona.edu.co

Recibido: 11 noviembre 2023. Aceptado: 4 abril 2024. Publicado: 8 mayo 2024.

Cómo citar: D. A. Pelaez Carrillo, O. E. Gualdrón Guerrero, y I. Torres Chávez, «Optimización de la evaluación de pastos mediante la implementación de imágenes multiespectrales y vehículo aéreo no tripulado», RCTA, vol. 1, n.º 43, pp. 155–162, may 2024.
Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/2850>

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



Resumen: Este artículo desarrolla una forma de optimizar la evaluación de pastos utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV) y el análisis de imágenes multiespectrales. La investigación se llevó a cabo en el Municipio de Pamplona, Colombia, con el objetivo de comprender y documentar el crecimiento y evolución del pasto en áreas agrícolas. La metodología utilizada en la investigación incluyó la zonificación del terreno para identificar condiciones favorables para el estudio, de tal manera que se pudiera garantizar que existieran áreas adecuadas para observar el desarrollo del pasto y facilitar el acceso a los instrumentos experimentales. Se destacan aspectos importantes como la obtención de puntos GPS en tierra con el fin de crear polígonos que se disponen como el área de estudio y que permitirán la planificación de vuelos de vehículos aéreos no tripulados (UAV), que dan paso al uso de software de gestión de vuelos autónomos. La adquisición de imágenes multiespectrales se da gracias al uso de cámaras multiespectral incorporadas en el UAV, capaces de registrar información en múltiples bandas espectrales dentro y fuera del espectro visible, como el infrarrojo cercano y el borde de rojo. El análisis estadístico proporcionó una visión detallada de las condiciones agrícolas al revelar correlaciones significativas entre el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y varios parámetros del suelo como el potasio (K) y el fósforo (P). Este método innovador proporciona datos y visualizaciones precisos que ayudan a tomar decisiones sobre la gestión sostenible de pastos en la región.

Palabras clave: Imágenes multiespectrales, vehículo aéreo no tripulado, Análisis de reflectancia, Sensores remotos, Índices de vegetación, NDVI, agricultura de precisión.

Abstract: This article develops a way to optimize pasture evaluation using unmanned aerial vehicles (UAVs) and multispectral image analysis. The research was carried out in the Municipality of Pamplona, Colombia, with the aim of understanding and documenting the growth and evolution of pasture in agricultural areas. The methodology used in the research

included zoning the terrain to identify favorable conditions for the study, ensuring that suitable areas existed to observe pasture development and facilitate access to experimental instruments. Important aspects such as obtaining GPS points on the ground to create polygons that are arranged as the study area are highlighted, allowing for the planning of UAV flight missions, which in turn lead to the use of autonomous flight management software. The acquisition of multispectral images is made possible through the use of multispectral cameras integrated into the UAV, capable of recording information in multiple spectral bands within and outside the visible spectrum, such as near-infrared and red edge. Statistical analysis provided a detailed insight into agricultural conditions by revealing significant correlations between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and various soil parameters such as potassium (K) and phosphorus (P). This innovative method provides accurate data and visualizations that assist in making decisions regarding sustainable pasture management in the region.

Keywords: Multispectral images, unmanned aerial vehicle, Reflectance analysis, Remote sensors, Vegetation indices, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), precision agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

El actual artículo de investigación se ha escrito teniendo en cuenta los resultados obtenidos dentro del marco del proyecto de investigación titulado “Identificación de plagas y enfermedades de mayor incidencia en pasturas a través de imágenes multiespectrales para la producción bovina en departamento de Norte de Santander” ejecutado por la Universidad de Pamplona y la Gobernación de Norte de Santander. Dicha investigación se desarrolló en los diferentes climas (bajo, medio y alto) del Departamento recolectando información mediante imágenes espectrales. Se tuvo la intención de recolectar muestras de diez terrenos por municipio en cada una de las áreas térmicas mencionadas anteriormente.

El 70% del territorio colombiano está siendo utilizado de manera ineficiente, mientras que el 30% restante está siendo subutilizado o sobreutilizado, principalmente por la ganadería. Colombia tiene una superficie de 114 millones de hectáreas, de las cuales 67 millones son bosques, 2 millones son cuerpos de agua y 332 mil forman parte de la zona urbana. Además, existen 26 millones de hectáreas que ofrecen oportunidades para la producción agrícola, aunque esta solo se produce en 6,3 millones de hectáreas, lo que representa el 24,2% del total. Los territorios que se dedican principalmente a la agricultura abarcan 11,3 millones de hectáreas, de las cuales se utiliza el 35%. Esto indica que el campo colombiano tiene un gran potencial para ser utilizado en la producción de alimentos [1].

En los últimos siglos se ha venido aumentando la cantidad de humanos en la tierra gracias en gran medida a los avances tecnológicos presentados y en simultaneidad, la gran problemática del hambre a nivel mundial también crece llevando a los productores agrícolas a buscar la forma de mantener y mejorar sus cultivos por medio de la implementación de nuevas tecnologías y pesticidas principalmente [2][3].

El concepto de agricultura de precisión nace de la iniciativa de diseñar e implementar ideas que posibiliten el aprovechamiento de los recursos y el desarrollo de una agricultura sostenible sin desmeritar el comportamiento de la producción [4][5]. Estas ideas se desenvuelven en torno a una plataforma de movilidad basada en vehículos aéreos no tripulados, que garantizan el monitoreo no invasivo y la teledetección de las características más generales de los cultivos analizados permitiendo visualizar lo que a simple vista parece imperceptible [6].

La utilización de cámaras multiespectrales se presenta como una solución a la implementación de la agricultura de precisión, permitiendo trabajar con longitudes de ondas no visibles. Pero entre los mayores inconvenientes con los que se encuentra dicha tecnología, es el poder detectar la firma espectral que se relacione con las características de la vegetación que se quiere analizar [7]. Para ello se hace uso de la reflectividad, que es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie, es decir, se tiene que calibrar la cámara para empezar a reconocer o captar la información que nos indique la los patrones importantes que se pueden asociar a

problemas como enfermedades o plagas en las plantas [8]. Este tipo de tecnología puede llegar a tener un alto costo en el mercado, así que es de vital importancia considerar la implementación de cámaras multiespectrales comerciales que permitan realizar el monitoreo en un rango espectral de 400 a 1000 nm [9]. Por otra parte, se hace necesario integrar algoritmos de pre-procesamiento a las imágenes multiespectrales, dado que se puede analizar un alto número de datos almacenados por captura y con éstos, eliminar información no relevante [10].

Las cámaras multiespectrales permiten el reconocimiento de diferentes plantas y objetos dependiendo de la firma espectral que éstos generen, todo esto gracias a la fácil detección de cinco bandas espectrales e imágenes RGB, estas bandas hacen parte del espectro no visible, es decir, que es imperceptible a nuestros ojos; por ende, en proyectos como el de reconocimiento de plantas de algodón en grupos o individualmente con el objetivo de detectar posibles ubicaciones que puedan proporcionar un hábitat para los gorgojos del algodonero [11] y en la discriminación de variedades de plantas de té utilizando el mismo tipo de sistema de imágenes y análisis de múltiples características [12], se puede apreciar la capacidad y el alcance que tiene esta tecnología no invasiva. La utilización de redes neuronales convolucional ha traído consigo avances en la investigación de reconstrucción de imágenes multiespectrales [13]. Centrado en gran medida en la reconstrucción de MSI utilizando los canales R-G-B del MSI como entradas del modelo para la posterior de recopilación de información y análisis [14].

El índice de vegetación de diferencia normalizada permite extraer datos exactos sobre la cantidad de material vegetal y la cantidad de suelo desnudo, permitiendo caracterizar por medio de los porcentajes de cobertura, diferentes niveles de presencia de plantas con follaje variables, además de posible presencia de huella hídrica y la cantidad de suelo desnudo que se encuentre presente en el área muestreada [15]. Con este índice se puede realizar un proceso comparativo que permita realizar un seguimiento apropiado de las posibles necesidades nutricionales y tomar decisiones estratégicas [16].

Es importante conocer a fondo la temática respecto a la herramienta implementada en este proyecto desde el concepto básico del comportamiento de las ondas electromagnética y como estas inciden sobre los objetos, que para el caso particular de este proyecto, se refiere a la incidencia de dichas ondas

en las hojas de las plantas y como son reflectadas o absorbidas, desde allí parte el concepto de la adquisición de imágenes multiespectrales y como pueden aplicarse como una tecnología útil que permita identificar las características fenológicas de los cultivos o suelos productivos [17].

El sistema multiespectral común cuenta con sensor óptico sensible a bandas dentro del espectro de luz visibles y no visibles, dicho sistema es integrado en un modelo de vehículo aéreo no tripulado (UAV) como plataforma muy utilizada en el sector comercial y productivo para la recolección de datos de alto rendimiento [18], las imágenes multiespectrales fueron tomadas de los predios a través de sobrevuelos que permitieron la adquisición de imágenes de alta resolución alturas de 100 a 200 metros, presentando un solapamiento entre ellas superior al 70%. Dichas imágenes fueron procesadas con el fin de proporcionar una información adecuada y oportuna del estado de los terrenos y de forma más precisa la salud de la vegetación presente y el estado de las área sin cobertura vegetal esto a través de la determinación de un índice específico determinado índice normalizado de vegetación (NDVI) que permiten precisar la cantidad de vegetación presente en una totalidad de terreno establecida [15], dicha relación permite ver si las tierras analizadas tienen la capacidad de albergar plantas de calidad e indirectamente observar si las tierras son fértiles o si se hace necesario la intervención de ellas para aumentar su capacidad productiva.

Es importante que las imágenes multiespectrales sean proporcionadas de lo posible etiquetada por municipio con las coordenadas geográficas y fecha de adquisición de estas, además que las imágenes sean condensadas en un ortomosaico con la mejor resolución posible y que se asocie a ella la tabla de las agrupaciones de los índices de vegetación de diferencia normalizada y el porcentaje de área de la cobertura de este. Los formatos en el que se puede proporcionar los documentos son: .pdf, .tif y .jpg ya que se puede compartir con mayor facilidad y los informes pueden quedar con menor necesidad de capacidad de almacenamiento digital.

Gracias a esta tecnología se estudia los mejores métodos para optimizar los procesos y poder ayudar al desarrollo de estrategias agrícolas, generar mapas de biomasa presente, el poder detectar cambios importantes haciendo seguimientos para realizar una óptima aplicación de nutrientes y descubrir posibles enfermedades antes de que los síntomas

sean más abrasivos y se presenta la introducción de una nueva herramienta de percepción remota [19].

Hay múltiples metodologías que permiten implementar de la mejor forma este tipo de tecnologías de monitoreo en los que no solo se pueden adquirir imágenes en diferentes espectros de luz si no también imágenes RGB con las cuales se pueden obtener curvas de nivel e imágenes de alta calidad con metadatos respecto al posicionamiento global en el momento que fueron adquiridas [20]. En el mercado internacional se encuentran diferentes tipos de sensores que se destacan por la calidad de imágenes que adquieren además que también se puede contar con el monitoreo por medio de satélites de observación terrestre que son de gran utilidad en el sector agrícola.

2. METODOLOGÍA

El primer paso para la ejecución del proyecto de investigación se estipula la zonificación de los predios en esta parte del proyecto se establece las características de cumplimiento por parte de las áreas de estudio para ser consideradas con las condiciones propicias para ser objeto de estudio. Dentro de las características más importante se encuentra el poder contar con una zona en la que se puede realizar el seguimiento del crecimiento y evolución del pasto, esto con el fin de adquirir información desde el inicio de la actividad agrícola y poder documentar hasta el más mínimo detalle posible del proceso, otra característica esencial es la ubicación y fácil acceso de las herramientas a experimentar en su uso, es primordial que el proceso de estudio se lleve con frecuencia y el fácil acercamiento a la zona es necesario y por ultimo contar con el consentimiento del propietario para la ejecución del proyecto dentro de su predio. Una vez logrado el proceso de selección se puede dar inicio a la investigación, con una exploración terrestre del predio, en el que además se aprovecha para realizar el respectivo levantamiento geográfico, en este proceso se adquieren coordenadas geográficas precisas que más adelante podrán dar lugar a información importante para la adquisición de las imágenes.

Gracias a los puntos GPS adquiridos en tierra, se pueden crear planes de vuelo que se convertirán en la misión de adquisición de imágenes del vehículo aéreo, para la realización de esta actividad es necesaria una conexión a internet estable es por esto que no es necesario estar en las inmediaciones del predio, por medio de Software de gestión de

georeferencias es posible crear el polígono que encierra el área del predio, dicha nube de puntos se guarda como un archivo .kml que posteriormente es cargada a la aplicación para la creación del registro visual automatizado.

Por medio de una app de gestión de vuelos autónomos que se permita recibir archivos de lenguaje marcado basado en XML que proporciona de la totalidad de datos geográficos necesarios para establecer la información respecto al vuelo del UAV proyectado, en él se establece los puntos de seguimiento y cambio de trayectoria, velocidad de vuelo y altitud a la que realizara la adquisición de información además de establecer el punto de inicio de misión y la zona de aterrizaje seguro todo esto es almacenado en el dispositivo móvil que se conecta al mando del dron que realizara en sobrevuelo, dichas plataformas empresariales, provee de múltiples ventajas que no se encuentran fácilmente en un dron comercial, como la altitud máxima, estabilidad de vuelo y alcance máximo.

El vehículo aéreo tiene incorporado un sensor capaz de percibir radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda diferentes, destacándose específicamente cinco bandas espectrales: roja, verde, azul, infrarrojo cercano y borde de rojo. El sensor se seleccionó teniendo en cuenta la cantidad de bandas disponibles, además del peso y la capacidad de almacenar la información en una memoria SD de alta velocidad de escritura, que descarta la posibilidad de pérdida de imágenes. La resolución de la cámara es de 8 cm por píxel a 120 m de altura con velocidades de captura de hasta 1 captura por segundo.

El proceso de adquisición de imágenes se inició realizando una inspección visual definiendo las propiedades físicas del terreno e identificando los posibles obstáculos a los que puede verse enfrentado el vehículo aéreo no tripulado con el fin de evitar accidentes. La obtención de los puntos de sistema global de posicionamiento se realiza por medio de equipos navegación satelital en tiempo real obteniendo una alta exactitud del posicionamiento adquirido. En los planes de vuelo se configura entre otras cosas, la altitud a la cual se realizara la adquisición de imagen estableciendo el parámetro entre 100 y 120 m y la velocidad de vuelo. El plan de vuelo es ejecutado por el vehículo bajo la supervisión del piloto a cargo de la aeronave por si es necesario la intervención en alguna maniobra. Para el procesamiento de las imágenes se precisa el uso de un software de fotometría que permita la manipulación de imágenes RGB e imágenes

multiespectrales. El software Pix4D fue el utilizado en esta ocasión, el cual permite: capturar imágenes con cualquier cámara, transformar imágenes en modelos digitales, gestionar los informes de calidad y detalles de calibración, medir distancias áreas y volúmenes y extraer datos de perfil de elevación.

La toma y análisis de datos consiste en la adquisición seis imágenes multiespectrales por cada uno de los levantamientos multiespectrales, en la pradera a analizar correspondiente a una hectárea en cada uno de los predios seleccionados para la ejecución del proyecto en el municipio de San Cayetano, se identificaron los porcentajes de área de las coberturas presentes, la evolución del material vegetal en la ventana de tiempo estipulado entre cada levantamiento, se determina una tasa de cambio diaria de cada una de las coberturas analizadas con el fin que generar un posible escenario que permita la visualización de las coberturas en un futuro cercano y se generaron valores para desarrollar estimaciones lineales donde el valor de x son los días a proyectar.

Es necesario mencionar que al momento de proyectar el área de cada una de las coberturas a un tiempo determinado, se recomienda calcular el porcentaje de error de la sumatoria de las coberturas, si el error porcentual no es muy alto se puede tomar como válido, si fuese el caso contrario indica que una o varias coberturas sufrieron un cambio drástico en poco tiempo de mejora o pérdida de la cantidad del material vegetal, el o las circunstancias presentadas deben ser analizadas y tomas las medidas necesarias. Otra manera de interpretación de un valor alto de errores sea que entre la ventana de tiempo se desarrollaron aprovechamiento de la pradera y por eso el cambio repentino en los valores de las coberturas.

3. RESULTADOS

En el artículo, se presenta un análisis exhaustivo basado en los datos recopilados durante un período de diez meses, desde octubre de 2022 hasta julio de 2023. Se ha llevado a cabo una evaluación detallada de los resultados, centrándose en los beneficios y cambios específicos experimentados por cada uno de los beneficiarios involucrados en este proyecto. Esto ha permitido obtener una visión más completa de las dinámicas de la vegetación en estas áreas geográficas, así como su impacto en las comunidades locales y en los recursos naturales circundantes.

Por medio de un análisis estadístico de los datos obtenidos en los 10 predios del municipio de Pamplona donde tuvo incidencia el proyecto se logró obtener información importante para comprender las características del suelo, su calidad y su idoneidad para diferentes usos dentro de la agricultura, la ganadería y la conservación del material biológico. Para realizar un análisis estadístico se debe recopilar, organizar, analizar e interpretar datos para obtener conclusiones significativas con el objetivo principal de describir y comprender los datos, detectar patrones y tendencias, y sacar inferencias basadas en la información disponible.

3.1. Análisis estadístico municipio de Pamplona

Antes de abordar el análisis estadístico de la correlación entre las variables NDVI y los datos provenientes de las pruebas bromatológicas llevadas a cabo en los terrenos beneficiarios del municipio de Pamplona, es crucial realizar un análisis exploratorio. Este proyecto implicó 7 muestreos mensuales durante 12 meses, lo que determinó la frecuencia de muestreo para el manejo de la información.

El enfoque utilizado generó un total de 7 ortomosaicos multiespectrales, ejemplificados en la figura 1. Estos ortomosaicos combina diversas imágenes individuales, proporcionando una panorámica integral y detallada del predio beneficiario objeto de análisis. La aplicación del cálculo del NDVI a cada píxel en las imágenes individuales que conforman el ortomosaico multiespectral resulta en la obtención de valores NDVI para cada ubicación espacial. Estos valores se visualizan mediante una escala de colores que, en el caso de la figura 1, transcurre desde tonalidades moradas hasta rojas. Cada color está asociado a un valor de índice específico y al porcentaje del área cubierto por dicho índice, brindando así una representación visual rica en información.

Además, es evidente que la imagen se encuentra georreferenciada, permitiendo que la información proporcionada sea validada por expertos en campo. Este aspecto garantiza la precisión y confiabilidad de los datos recopilados, ya que la georreferenciación establece una conexión directa entre los elementos visibles en la imagen y sus ubicaciones geográficas reales en el terreno. Este enfoque asegura que los resultados sean aplicables y útiles en contextos prácticos, respaldando la interpretación y toma de decisiones basada en la

información derivada de los ortomosaicos multiespectrales.

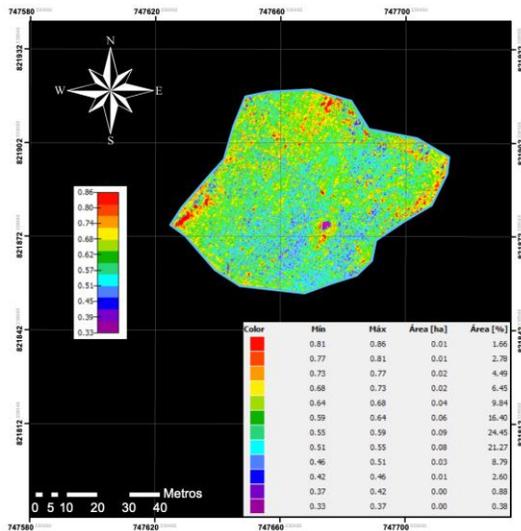


Fig. 1. Ortomosaico multiespectral beneficiario del proyecto.

En la fase inicial de la investigación, se destacó una observación significativa: a pesar de realizar un considerable número de adquisiciones de imágenes en un mismo mes, la tendencia de cambio no resulta muy notable. Este fenómeno se atribuye a la limitada ventana temporal, la cual no brinda el tiempo necesario para que la vegetación exhiba variaciones sustanciales. En respuesta a esta consideración, se tomó la decisión de llevar a cabo una reducción de información con el propósito de obtener una representación mensual de índices. Este enfoque permitirá capturar de manera más efectiva las transformaciones vegetativas a lo largo del tiempo, proporcionando así una visión más clara y representativa de las dinámicas de la vegetación.

El análisis exploratorio inicial se enmarca en el objetivo de generar una caracterización detallada del suelo basada en la información recopilada de las imágenes multiespectrales utilizando el NDVI. En este proceso de caracterización, se realiza una evaluación minuciosa de la salud y vitalidad de la vegetación presente en las áreas muestreadas. De esta manera, al sintetizar la información adquirida durante los vuelos efectuados con el Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV), se logra obtener una representación visual detallada que ilustra la condición y distribución de la vegetación en las hectáreas seleccionadas. Se destaca que los índices de vegetación pueden agruparse por categorías de la siguiente forma.

Tabla 1: Intervalos y clasificación de los índices NDVI

RANGO DE NDVI	CATEGORÍA
0.75 - 1	Cobertura Alta
0.5 - 0.75	Cobertura Media
0.25 - 0.5	Cobertura Baja
0 - 0.25	Cobertura cero

En la tabla 1, es evidente en primer lugar que los valores de NDVI obtenidos durante el monitoreo se sitúan en el rango de 0 a 1. Los valores más próximos a 1 indican una presencia abundante y saludable de vegetación, mientras que aquellos cercanos a cero reflejan lo contrario. Al categorizar estos valores en intervalos, transformamos una variable cuantitativa en una cualitativa, permitiéndonos analizar porcentajes de área asociados con coberturas vegetales muy bajas o altas. Esta agrupación facilita la observación de cómo estos porcentajes evolucionan a lo largo del tiempo, revelando posibles cambios o relaciones con otras variables en etapas posteriores del análisis.

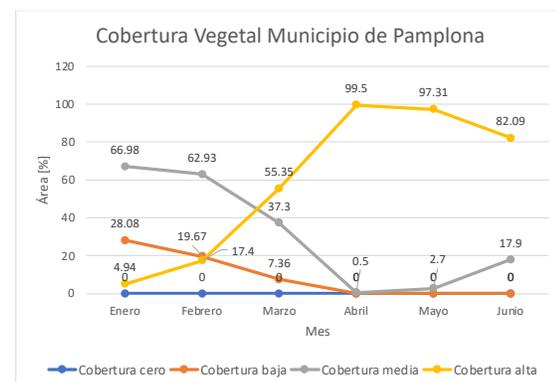


Fig. 2. Distribución de la cobertura vegetal en el Municipio de Pamplona.

En la figura 2 se puede observar cómo ha cambiado el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los terrenos del municipio de Pamplona. Es notable que, en los primeros meses, los índices que indican una alta cobertura se encontraron por debajo del 40% en los predios muestreados. Sin embargo, la cobertura media cubre el 67% de las hectáreas muestreadas, mientras que la cobertura baja cubre el 28%.

La cobertura alta aumentó significativamente en los meses siguientes, pasando del 0% al impresionante 99,5%. Este aumento es el resultado de una ampliación significativa del pasto con una densidad de hojas elevada y biomaterial de alta calidad. Este fenómeno indica una notable mejora en la salud y calidad del suelo.

3.2. Coeficiente de correlación de Pearson

Se implementó el coeficiente de correlación de Pearson con el fin de poder evaluar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables continuas es decir entre el NDVI y las diferentes variables adquiridas en los análisis bromatológicos. Los valores del coeficiente de correlación de Pearson pueden variar entre -1 y 1. Es importante tener en cuenta que la correlación no implica causalidad. Incluso si hay una fuerte correlación entre dos variables, no significa necesariamente que una cause la otra. Es necesario realizar análisis más profundos para establecer relaciones causales.

Tabla 2: Coeficientes de correlación de Pearson.

VARIABLE	COEFICIENTE
NDVI vs Humedad	0.8494
NDVI vs N	0.4184
NDVI vs P	0.7116
NDVI vs K	0.7264
NDVI vs Ca	0.1502
NDVI vs mg	0.5554
NDVI vs FEPpm	-0.8019
NDVI vs MnPpm	-0.3767
NDVI vs CuPpm	-0.1102
NDVI vs ZnPmm	0.5132
NDVI vs BoPmm	-0.2834
NDVI vs NaPmm	-0.1535
NDVI vs S	-0.2893
NDVI vs Cenizas	0.7031

El fósforo (P), el potasio (K), las cenizas, el fósforo presente en el pasto (FEPpm) y la humedad están todos relacionados significativamente con el NDVI, según los coeficientes mostrados en la Tabla 2. Estos valores de coeficientes respaldan la existencia de una fuerte relación y enfatizando la importancia de estas variables en la explicación de las variaciones observadas en el NDVI.

3.3. Análisis de Regresión Múltiple

El análisis de regresión múltiple permitió por medio de la estadística, generar la relación entre una variable dependiente (o respuesta) y dos o más variables independientes (o predictoras). El modelo desarrollado se muestra en la ecuación (1).

$$NDVI = \beta_0 + \beta_1 Humedad + \beta_2 P + \beta_3 K + \beta_4 FEPpm + \beta_5 Ceniza \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 0.05387 \\ \beta_1 &= 0.00382 \\ \beta_2 &= -0.52386 \\ \beta_3 &= 0.25745 \\ \beta_4 &= -0.000195 \\ \beta_5 &= 0.01645 \end{aligned}$$

Esta regresión nos permitió desarrollar un modelo complejo que captura las interacciones entre la variable dependiente, en este caso, el NDVI, y varias variables independientes, tales como la humedad, el fósforo, el potasio, el fósforo extraíble o presente en el pasto, y la ceniza, que representa la cantidad de material inorgánico que permanece tras incinerar una muestra de forraje. De tal manera que se puede interpretar que por medio de variaciones en el NDVI indirectamente podemos identificar parte de la composición química de los componentes del pasto.

4. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el uso de tecnologías avanzadas, como la adquisición de imágenes multispectrales a través de UAV, es una herramienta útil para el monitoreo detallado del pasto. Para la toma de decisiones agrícolas, es útil poder analizar la vegetación, encontrar anomalías y evaluar la productividad del terreno a lo largo del tiempo. Este método no solo mejora la capacidad de detectar problemas potenciales, como plagas o deficiencias nutricionales, sino que también ayuda a optimizar la gestión de recursos al permitir intervenciones más específicas y concentradas.

Para comprender las características de la cobertura vegetal muestreada en términos de calidad y aptitud para usos agrícolas, ganaderos y de conservación del material biológico, se ha realizado un análisis estadístico minucioso en los 10 predios del municipio de Pamplona. La relación entre el NDVI y las características bromatológicas de la vegetación se ha logrado gracias a este análisis estadístico, que implica la recopilación, organización, análisis e interpretación de datos. El objetivo principal de este proceso ha sido la descripción y comprensión de los datos, la identificación de patrones y tendencias y la derivación de inferencias basadas en la información disponible.

REFERENCIAS

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Scaling up Climate Ambition on Land Use and Agriculture through Nationally Determined Contributions and National Adaptation Plans (SCALA)," Rome, Italy, 2024.
- [2] R. Cueto Morelo, J. Atencio Flórez, and J. E. Gómez Gómez, "Sistema de identificación enfermedades y plagas en el cultivo de sandía," *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 2, no. 42, pp. 96–107, Dec. 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i42.2674.

- [3] A. Cilluffo and N. Ruiz, “World’s population is projected to nearly stop growing by the end of the century,” Pew Research Center.
- [4] J. D. Herrera Galviz and J. C. Hernández Criado, “Análisis de sanidad vegetal de cultivos próximos al distrito de riego asudra del municipio de ábrego – norte de santander, a partir de imágenes de drone,” *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 1, no. 35, pp. 16–25, Jul. 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i35.37.
- [5] L. Deng, Z. Mao, X. Li, Z. Hu, F. Duan, and Y. Yan, “UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 146, pp. 124–136, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>.
- [6] N. Bagheri and J. Kafashan, “UAV-based remote sensing in orcha-forest environment; diversity of research, used platforms and sensors,” *Remote Sens Appl*, vol. 32, p. 101068, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101068>.
- [7] L. D. Gualdrón Guerrero, O. E. Gualdrón Guerrero, and M. Maestre Delgado, “Evolución y recuperación de pasturas para optimizar los rendimientos nutricionales de los semovientes interpretando los índices de vegetación normalizada usando levantamientos multiespectrales,” *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 2, no. 42, pp. 105–114, Dec. 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i42.2701.
- [8] A. D. Boursianis *et al.*, “Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review,” *Internet of Things*, vol. 18, p. 100187, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>.
- [9] S. Liu *et al.*, “UAV multispectral images for accurate estimation of the maize LAI considering the effect of soil background,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 121, p. 103383, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103383>.
- [10] G. Dhanush, N. Khatri, S. Kumar, and P. K. Shukla, “A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for the detection and harvesting of agricultural produce,” *Sci Afr*, vol. 21, p. e01798, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01798>.
- [11] P. H. A. Martins *et al.*, “Estimating spray application rates in cotton using multispectral vegetation indices obtained using an unmanned aerial vehicle,” *Crop Protection*, vol. 140, p. 105407, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105407>.
- [12] Q. Cao *et al.*, “Discrimination of tea plant variety using in-situ multispectral imaging system and multi-feature analysis,” *Comput Electron Agric*, vol. 202, p. 107360, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107360>.
- [13] E. Cordero, L. Longchamps, R. Khosla, and D. Sacco, “Joint measurements of NDVI and crop production data-set related to combination of management zones delineation and nitrogen fertilisation levels,” *Data Brief*, vol. 28, p. 104968, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104968>.
- [14] Y. Zhang *et al.*, “Two-step ResUp&Down generative adversarial network to reconstruct multispectral image from aerial RGB image,” *Comput Electron Agric*, vol. 192, p. 106617, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2021.106617.
- [15] D. A. Pelaez Carrillo, O. E. Gualdrón Guerrero, and A. E. Capacho Mogollon, *Soluciones tecnológicas para el desarrollo de la agricultura de precisión a través de imágenes multiespectrales*, 1st ed. Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona, 2023.
- [16] C. Davidson, V. Jaganathan, A. N. Sivakumar, J. M. P. Czarnecki, and G. Chowdhary, “NDVI/NDRE prediction from standard RGB aerial imagery using deep learning,” *Comput Electron Agric*, vol. 203, p. 107396, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.COMPAG.2022.107396.
- [17] T. Duan, S. C. Chapman, Y. Guo, and B. Zheng, “Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle,” *Field Crops Res*, vol. 210, pp. 71–80, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>.
- [18] M. A. Kaljahi *et al.*, “An automatic zone detection system for safe landing of UAVs,” *Expert Syst Appl*, vol. 122, pp. 319–333, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.024>.
- [19] S. V. Gaikwad, A. D. Vibhute, K. V. Kale, and S. C. Mehrotra, “An innovative IoT based system for precision farming,” *Comput Electron Agric*, vol. 187, p. 106291, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106291>.
- [20] H. Li, G. Li, Y. Ye, and L. Lin, “A high-efficiency acquisition method of LED-multispectral images based on frequency-division modulation and RGB camera,” *Opt Commun*, vol. 480, p. 126492, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126492>.