

Interpretación de los índices de vegetación normalizada (NDVI) para estimar la densidad de cobertura vegetal presentes en un modelo de policultivo implementado en el municipio de Candelaria Atlántico, utilizando imágenes multiespectrales.

Interpretation of normalized vegetation indices (NDVI) to estimate the density of vegetation cover present in a polyculture model, implemented in the municipality of Candelaria Atlántico, using multispectral images.

Luis Daniel Gualdron G ¹, Oscar E. Gualdrón-Guerrero ^{1,2}, Elkin G. Florez³

¹ Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de investigación GISM, Universidad de Pamplona, Km 1 vía Bucaramanga, 543050, Pamplona, Colombia.

² Grupo de investigación Agroinnova, Fundación Ernesto Schiefelbein, Bogotá, Colombia.

³ Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de investigación GIMUP, Universidad de Pamplona, Km 1 vía Bucaramanga, 543050, Pamplona, Colombia.

oscar.gualdron@unipamplona.edu.co

Cite this article as: L. Gualdron , Oscar E. Gualdrón-Guerrero , Elkin G. Florez “*Interpretación de los índices de vegetación normalizada (NDVI) para estimar la densidad de cobertura vegetal presentes en un modelo de policultivo implementado en el municipio de Candelaria Atlántico, utilizando imágenes multiespectrales.*”, *Prospectiva*, Vol. 23 N° 1 2025.

Recibido: 02/11/2023 / Aceptado: 10/12/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i1.3385>

RESUMEN

Los levantamientos multiespectrales son herramientas que han permitido generar una adquisición de información de suelos productivos por medio de sobrevuelos con vehículos aéreos no tripulados a los cuales se le integra una cámara que tiene la capacidad de adquirir imágenes en rangos muy reducidos de diferentes espectros de luz visibles y no visible. La investigación que se presenta en este artículo se centra en identificar el comportamiento de variables como son la densidad de la cobertura vegetal, el estado fitosanitario de los cultivos, la presencia de huella hídrica, entre otros, con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), por medio de la generación de una estrategia de inspección y seguimiento que permita caracterizar de forma rápida el suelo estudiado y poder tomar acciones dentro de la actividad agrícola. La estrategia se implementó sobre un policultivo de frijol, plátano y yuca, en un predio en particular del municipio de Candelaria Atlántico, realizando un análisis multitemporal de levantamientos multiespectrales en un periodo de tres meses.

Palabras clave: NDVI, imágenes multiespectrales, drones, policultivos, caracterización de suelos.

ABSTRACT

Multispectral surveys are tools that have allowed for the acquisition of information about productive soils through overflights with unmanned aerial vehicles (UAV), that integrate a camera with the capacity to acquire images in very narrow ranges of different visible and non-visible light spectra. The research presented in this article focuses on identifying the behavior of variables such as vegetation cover density, crop phytosanitary status, and water footprint presence, among others, with the normalized difference vegetation index (NDVI) through the generation of an inspection and monitoring strategy that allows for rapid characterization of the studied soil and taking actions within agricultural activity. The strategy was implemented on a polyculture of beans, plantains, and cassava, on a particular property in the municipality of Candelaria Atlántico Colombia, conducting a multi-temporal analysis of multispectral surveys over a period of three months.

Keywords: NDVI, multispectral images, UAV, polycultures, soil characterization.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de nuevas tecnologías en la actividad agrícola (1) es uno de los retos más importantes que ha adquirido el campo colombiano, por medio de la inclusión de herramientas de monitoreo remoto las cuales son una valiosa fuente de información que puede ayudar a motivar el aumento de la producción y la disminución en la inversión de recursos como fertilizantes, pesticidas (2,3) y aún más importante el uso eficiente de los recursos hídricos con los que se cuenta (4). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) 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 en el área muestreada (5). Con este índice se puede realizar un proceso comparativo que permita realizar un seguimiento apropiado de las posibles necesidades nutricionales y tomar decisiones estratégicas (2). La aplicabilidad del índice NDVI no solo se limita a la agricultura, su uso en investigaciones enfocadas a fenómenos naturales como sequías e inundaciones (6,7), evaluación de la biodiversidad, identificación de procesos de conservación y restauración de ecosistemas (8,9), la identificación de cambio de uso del suelo (10,11) y la determinación de efectos por el cambio climático a las coberturas de vegetación (12), han demostrado que es una herramienta versátil y confiable en distintos campos de investigación.

Es importante conocer a fondo la temática respecto a la herramienta implementada desde el concepto básico del comportamiento de las ondas electromagnética y como estas inciden sobre los objetos (13), que para el caso particular de este trabajo, se refiere a la incidencia de dichos 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 (14). El concepto de agricultura de precisión (15) 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 (16). 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 (17).

La tecnología descrita anteriormente fue implementada en seis municipios del departamento del Atlántico en el marco del proyecto “fortalecimiento de procesos de innovación en la producción agrícola que mejoren la sostenibilidad y seguridad alimentaria de familias campesinas en el departamento de Atlántico”. Proyecto en el cual dentro de sus objetivos estaba desarrollar modelos y prácticas agrícolas encaminadas al uso de tecnologías que mejoren los sistemas agrícolas, estableciendo modelos basados en la implementación de agricultura limpia con la utilización de técnicas como la biofertilización y el uso de hidroretenedores (uso eficiente del agua). A cada uno de estos modelos se les realizó un seguimiento y monitoreo de factores bióticos y abióticos, condiciones climáticas, entre otros, que pudieran incidir sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, empleando una serie de análisis entre los que estaba el uso e interpretación de los índices de vegetación normalizada por medio de imágenes multiespectrales. En ellos se

adquirieron imágenes en diferentes espectros de luz, para posteriormente ser procesadas y analizadas, permitiendo proporcionar información oportuna de la densidad de la cobertura vegetal e indirectamente la salud y calidad de esta, mediante la interpretación del índice NDVI. En el presente documento se ha tomado como referencia un predio en particular del municipio de Candelaria donde se implementó un policultivo usando frijol, plátano y yuca, presentando un análisis multitemporal de levantamientos multiespectrales en un periodo de tres meses, dentro de una ventana de observación de un mes entre cada sobrevuelo, garantizando de esta manera un proceso de seguimiento y comparación adecuado de la evolución de las coberturas.

2. METODOLOGÍA

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 (18) con las cuales se pueden obtener curvas de nivel e imágenes de alto calidad con metadatos respecto al posicionamiento global en el momento que fueron adquiridas (17). En el mercado internacional se encuentran diferentes tipos de sensores que se destacan por la calidad de imágenes que adquieren (19) 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 (20,21).

En este trabajo se desarrollaron una serie de actividades que permitieron realizar un levantamiento multiespectral exitoso (22), ya que gracias a la información recolectada se pudo generar ortofotomosaicos en donde se condensan la totalidad de las imágenes adquiridas por predio, siguiendo la misma metodología para la totalidad de los predios. Dentro de las actividades iniciales para el desarrollo del proyecto se destacan la recolección de datos numéricos geográficos de las hectáreas de tierra que son materia de estudio, utilizando el sistema de referencia Magna Bogotá, con el fin de generar planes de vuelos que serán seguidos por el vehículo aéreo no tripulado bajo la modalidad de vuelo autónomo (23). 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 (24). 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 estableciendo los puntos de los polígonos que corresponden a los límites del terreno que será muestreado, 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 de navegación cinética satelital en tiempo real obteniendo una alta exactitud del posicionamiento adquirido. Una vez definidos los polígonos se crean los planes de vuelo en los que 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. Figuras 1 y 2.

Figura 1. Fuente: Propia del autor



Nota. Planificación y configuración del sobrevuelo para la adquisición de imágenes.

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. Por otra parte, permite calcular diferentes índices de vegetación entre ellos el NDVI, que fue el índice seleccionado para el actual trabajo.

Figura 2. Fuente: Propia del autor.



Nota. Vehículo aéreo no tripulado

Una vez se obtienen los ortofotomosaicos multiespectrales para cada una de las locaciones, se presentan las imágenes con su debida georreferenciación, además se agrupan los resultados de los porcentajes de áreas cubiertos, en siete intervalos en los cuales se categorizan los tipos de cobertura presentes en el área de estudio según el índice de vegetación de diferencia normalizada, los cuales son presentados en una tabla en cada uno de los predios. Los rangos de valores usados en la identificación de los distintos tipos de cobertura, se estandarizaron bajo la interpretación de firmas espectrales según las longitudes de ondas reflejadas en las variaciones de radiación de cada tipo de cobertura, esto es posible a la normalización de las bandas rojas e infrarroja en la generación del NDVI, el cual realza la presencia y ausencia de vegetación por la absorción de la luz roja y la reflectancia de la luz infrarroja (25), se procedió a realizar el respectivo análisis de cada imagen, presentando la información de forma desglosada y entendible, permitiendo al agricultor y al personal que lo asesora, la toma de decisiones oportunas respecto a las medidas a implementar dentro de su predio y caracterizando en general los suelos correspondientes. Para tener un mayor éxito en la estrategia implementada se definió una metodología de levantamientos multiespectrales cada cierto tiempo (tres en total) dentro de una ventana de observación de un mes entre cada sobrevuelo para garantizar un proceso de comparación entre un momento y otro, evaluando la evolución y comportamiento de los porcentajes de cobertura, así como, la cantidad de material vegetal.

3. RESULTADOS

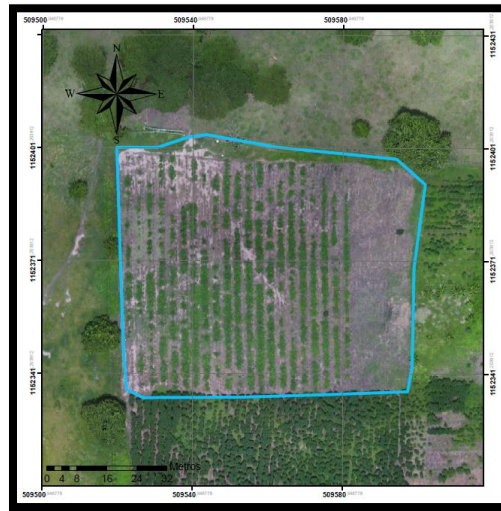
A los resultados obtenidos mediante la interpretación y análisis de las imágenes espectrales, se les aplicara la ecuación de tasa de cambio de las coberturas naturales TCCN, la cual permite identificar los cambios en la cobertura en un intervalo de tiempo y la cual se puede interpretar como la tasa de crecimiento de biomasa de las especies vegetales implementadas en la ventana de tiempo y el tiempo transcurrido entre muestra y muestra (26).

3.1 Levantamiento y análisis primer sobrevuelo

Se realizo el primer levantamiento multiespectral en un predio previamente seleccionado del municipio de Candelaria del departamento del Atlántico con el objetivo de identificar los tipos de cobertura presentes en la zona de estudio y su porcentaje de área de las mismas, al igual que los primeros indicios del estado fitosanitario del material vegetal presente. La información recolectada en este levantamiento multiespectral se toma como punto de partida del análisis

multitemporal del policultivo implementado en el área (frijol, plátano y yuca), siendo necesario aclarar que los cultivos implementados presentan fases fenológicas distintas al momento de adquisición de información, lo cual permite una mejor visualización y la comprensión de los datos obtenidos en la ventana de tiempo y la cantidad de muestras determinadas para la interpretación de las variables de evolución de las coberturas y el estado de salud del material vegetal usado en la implementación del policultivo, garantizando un mejor análisis e interpretación de los datos. En la figura 3 se observa una imagen Ortomosaico del área correspondiente al predio.

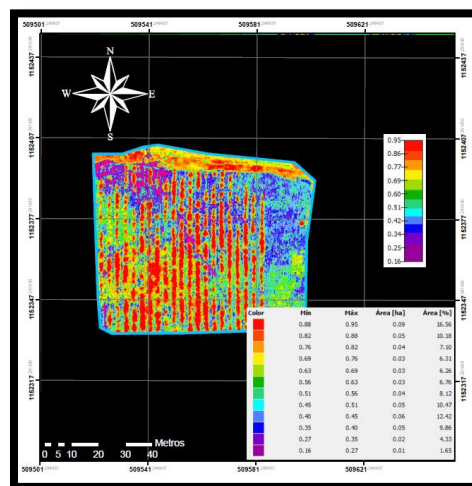
Figura 3 Ortomosaico del predio



Nota. Ortomosaico de visualización de coberturas en imagen RGB (color real), que permita identificar la evolución de los tipos de cobertura.

Una vez extraída la información aérea del predio se procede a tener el ortomosaico multispectral del mismo, suministrando información correspondiente a los índices de vegetación normalizada (NDVI), a través de la paleta de colores.

Figura 4 Ortomosaico multispectral del predio



Nota. Ortomosaico multispectral de visualización de las coberturas en rangos multispectrales del índice NDVI para clasificación según su firma espectral en la zona de estudio.

Con la información obtenida e interpretación de la misma se agruparon los resultados de los porcentajes de área cubierta, en siete intervalos que caracterizan los índices NDVI, desde zonas altamente optimas las cuales corresponden a valores de índices cercanos a uno, disminuyendo gradualmente hasta tener valores cercanos a cero o por debajo de cero (valores negativos) considerados zonas de cero cobertura o nulas con baja información de presencia de vegetación o con presencia de suelo desnudo, todo ello resumido en la tabla 1.

Tabla 1 Clasificación de los intervalos de NDVI del predio

Categoría	Intervalo de NDVI		Área (%) Primer Sobrevuelo
	Min	Max	
Altamente Optima	0,75	1,00	33,84
Optima	0,50	0,75	27,45
Baja cobertura de vegetación	0,25	0,50	37,08
Cero cobertura de vegetación	0,00	0,25	1,65
Cero cobertura (posible huella hídrica)	-0,30	0,00	0
Cero cobertura (rocas)	-0,60	-0,30	0
Nulo	-1,00	-0,60	0

Analizando los resultados obtenidos se puede decir que en un 61,29% (altamente optima y optima) del área en estudio, el material vegetal usado en el establecimiento de los policultivos presenta una alta presencia de forraje por individuo o una alta cantidad de individuos por unidad de área, este porcentaje puede ser asociado de igual manera a un buen estado fitosanitario de los cultivos. De lo descrito anteriormente se puede deducir que las prácticas agrícolas implementadas son adecuadas para el desarrollo de los cultivos y que el material vegetal cuenta con condiciones óptimas de nutrientes para su crecimiento y estrés sin hídrico aparente.

De igual forma la zona de baja cobertura, representada con un 37,08%, pueden ser asociadas a las etapas fenológicas iniciales de los cultivos usados donde la cantidad de forraje en las especies es menor, por lo tanto, estas áreas no se pueden asociar a estrés hídrico, algún tipo de enfermedad o déficit nutricional, por último, se identifica que un 1,65% del área es suelo desnudo, debido a los procesos de labranza como plateado, eliminación de maleza, abonado entre otros. Una vez finalizado el levantamiento espectral del primer sobrevuelo y el correspondiente análisis basado en la interpretación de los valores de los índices de vegetación NDVI, con sus respectivos aportes, se procedió a realizar un segundo levantamiento con una diferencia de un mes entre uno y otro. Para con ello, proceder al análisis comparativo entre los dos sobrevuelos en función del comportamiento de distribución de área porcentual según el índice de vegetación normalizada (NDVI).

3.2 Segundo levantamiento espectral

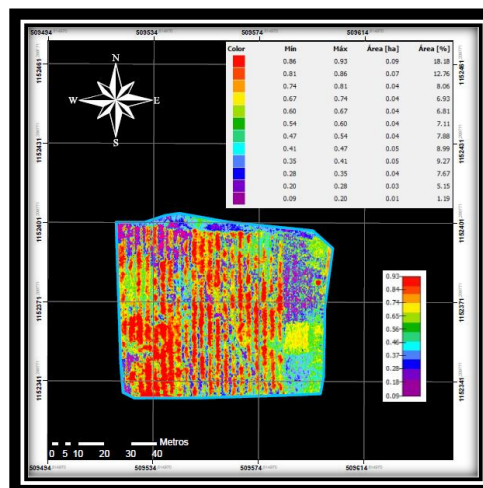
Como se mencionó anteriormente se realizó el segundo levantamiento multispectral en el mismo predio con una diferencia de un mes con respecto al primer sobrevuelo, el objetivo es el de identificar los porcentajes de área de cobertura presentes al momento de la adquisición de datos del material vegetal presente. Los cual permito determinar la evolución del material vegetal entre los sobrevuelos generados y el estado fitosanitario. En las figuras 5 y 6 se muestra los ortomosaicos RGB y multispectral del predio en su segundo sobrevuelo.

Figura 5 Ortomosaico del predio en su segundo levantamiento.



Nota. Ortomosaico de visualización de coberturas en imagen RGB (color real), de la evolución de los tipos de cobertura entre la ventana de tiempo del primero y segundo sobrevuelo.

Figura 6 Ortomosaico Multiespectral del predio (segundo levantamiento)



Nota. Ortomosaico multiespectral de visualización de las coberturas en rangos multiespectrales del índice NDVI para su clasificación según su firma espectral en la zona de estudio.

De igual forma, se realiza la clasificación de los intervalos de NDVI del predio distribuyéndose en los siete intervalos característicos de NDVI. Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de los intervalos de NDVI del predio

Categoría	Intervalo de NDVI		Área (%) Primer Sobrevuelo	Área (%) Segundo Sobrevuelo
	Min	Max		
Altamente Optima	0,75	1,00	33,84	39,00
Optima	0,50	0,75	27,45	28,73
Baja cobertura de vegetación	0,25	0,50	37,08	25,93
Cero cobertura de vegetación	0,00	0,25	1,65	6,34
Cero cobertura (posible huella hídrica)	-0,30	0,00	0,00	0,00

Cero cobertura (rocas)	-0,60	-0,30	0,00	0,00
Nulo	-1,00	-0,60	0,00	0,00

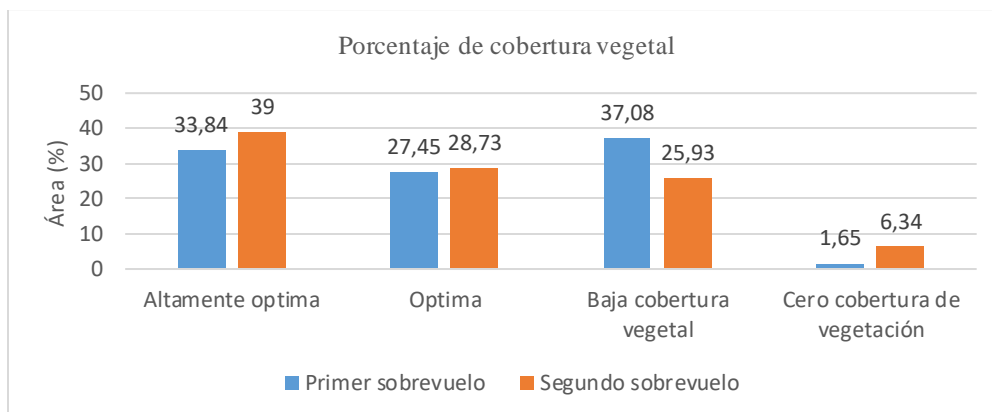
Analizando los resultados obtenidos se puede decir que en un 67,73% del área en estudio, el material vegetal usado en el establecimiento de los policultivos presenta una alta presencia de forraje por individuo o una alta cantidad de individuos por unidad de área, este porcentaje puede ser asociado de igual manera a un bu en estado fitosanitario de los cultivos. De lo descrito anteriormente ratifica que las prácticas agrícolas implementadas son adecuadas para el desarrollo de los cultivos y que el material vegetal cuenta con condiciones óptimas de nutrientes para su crecimiento y estrés hídrico aparente.

De igual forma la zona de baja cobertura, es representada con un 25,93%, dichas zonas pueden ser asociadas a las etapas fenológicas iniciales de los cultivos usados donde la cantidad de forraje en las especies es menor, por lo tanto, estas áreas no se pueden asociar a estrés hídrico o algún tipo de enfermedad, por último, se identifica que un 6,34% del área es suelo desnudo, debido a los procesos de labranza.

3.3 Comparación de los levantamientos multispectrales del predio

A continuación, se presenta la información recopilada sobre los tipos de cobertura y su porcentaje de área basados en el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI entre los levantamientos multispectrales del predio, la evolución de las coberturas entre el primero y el segundo levantamiento de imágenes.

Figura 7 Grafico comparativo entre el primer y segundo sobrevuelo.



Nota. La grafica muestra el aumento del porcentaje de área ocupada por la cobertura altamente optima y la disminución de las áreas relacionadas a la cobertura optima, baja cobertura vegetal y cero coberturas vegetales, la cobertura altamente optima es usada como indicador de la evolución adecuada de los cultivos entre la ventana de tiempo entre la primera y segunda toma de imágenes multispectrales.

La cobertura altamente optima aumentó con una variación del 5,16% de la totalidad del área de estudio, en los rangos de cobertura optima se aumentó con una variación del 1,28%, el comportamiento de baja cobertura del predio se disminuyó con una variación de 11,15%. En las áreas del predio con presencia de cero coberturas vegetales se pueden determinar qué aumentó en un 4,69%, las variaciones presentes en los diferentes tipos de coberturas se presentan debido a las actividades propias de los procesos de labranza de los cultivos. De igual manera se puede determinar una tasa de crecimiento mensual del 14,19% en la cobertura altamente optima, el análisis de la tasa de crecimiento y los aumentos del porcentaje de las coberturas altamente optima y optima, contrastados con la disminución del porcentaje de las áreas determinadas con baja cobertura según el índice, permiten deducir que el policultivo presenta un buen desarrollo el cual puede ser asociado a las buenas prácticas agrícolas y los nutrientes aportados por el suelo, el aumento de los suelos desnudos se puede asociar a las mismas prácticas de labranza.

3.4 Tercer levantamiento espectral

Finalmente, se realizó un tercer y último levantamiento multiespectral sobre el predio, un mes después del segundo sobrevuelo, figuras 8 y 9. Donde se consolido el proceso de seguimiento y evolución de las coberturas, el objetivo fue el de identificar los porcentajes de cobertura presentes en la zona de estudio al momento de la toma de información, de igual forma que los dos vuelos anteriores, determinando la evolución del material vegetal entre el segundo y tercer sobrevuelo, al igual que el estado fitosanitario del material vegetal presente.

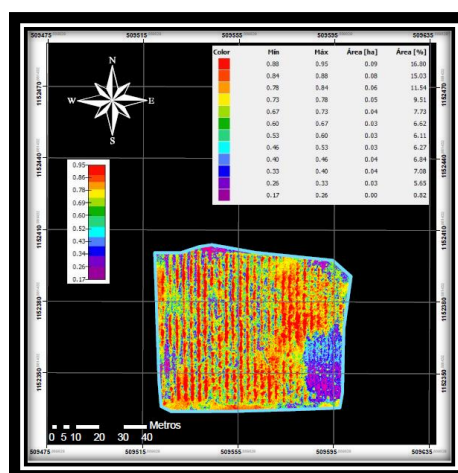
Figura 8 Ortomosaico del predio en tercer sobrevuelo



Nota. Ortomosaico de visualización de coberturas en imagen RGB (color real), de la evolución de los tipos de cobertura entre la ventana de tiempo del segundo y tercer sobrevuelo.

De igual forma, se realiza la clasificación de los intervalos de NDVI del predio distribuyéndose en los siete intervalos característicos de NDVI.

Figura 9 Ortomosaico Multiespectral del predio (tercer sobrevuelo)



Nota. Ortomosaico multiespectral de visualización de las coberturas en rangos multiespectrales del índice NDVI para su clasificación según su firma espectral en la zona de estudio.

La tabla 3 representativa en función de los índices NDVI para el tercer sobrevuelo se muestra a continuación

Tabla 3 Clasificación de los intervalos de NDVI del predio

Categoría	Intervalo de NDVI		Área (%) Segundo Sobrevuelo	Área (%) Tercer Sobrevuelo
	Min	Max		
Altamente Optima	0,75	1	39	52,88
Optima	0,5	0,75	28,73	20,46
Baja cobertura de vegetación	0,25	0,5	25,93	25,84
Cero coberturas de vegetación	0	0,25	6,34	0,82
Cero coberturas (posible huella hídrica)	-0,3	0	0	0
Cero coberturas (rocas)	-0,6	-0,3	0	0
Nulo	-1	-0,6	0	0

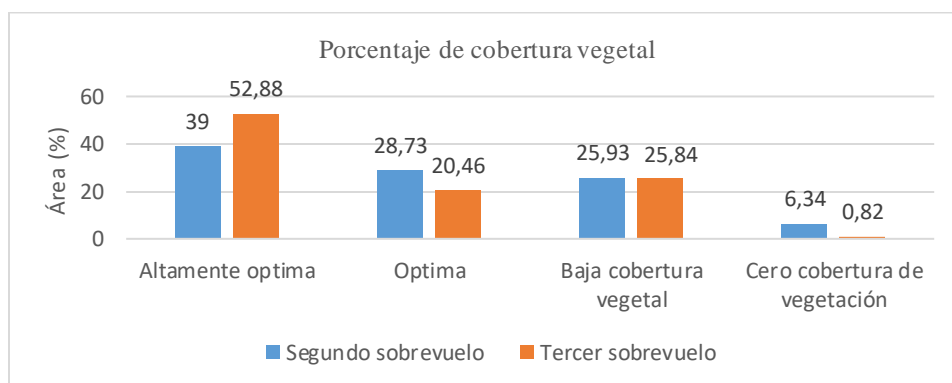
Analizando los resultados obtenidos se puede decir que en un 73,34% del área en estudio (altamente óptima y optima), el material vegetal usado en el establecimiento de los policultivos presenta una alta presencia de forraje por individuo o una alta cantidad de individuos por unidad de área, este porcentaje puede ser asociado de igual manera a un buen estado fitosanitario de los cultivos. De lo descrito anteriormente ratifica que las prácticas agrícolas implementadas son adecuadas para el desarrollo de los cultivos y que el material vegetal cuenta con condiciones óptimas de nutrientes para su crecimiento y estrés sin hídrico aparente.

De igual forma la zona de baja cobertura, representada con un 25,84%, dichas zonas pueden ser asociadas a las etapas fenológicas iniciales de los cultivos usados donde la cantidad de forraje en las especies es menor, por lo tanto, estas áreas no se pueden asociar a estrés hídrico o algún tipo de enfermedad, por último, se identifica que un 0,82% del área es suelo desnudo, debido a los procesos de labranza como plateado, eliminación de maleza, abonado entre otros.

3.5 Comparación del levantamiento multiespectral del predio entre el segundo y tercer vuelo

A continuación, se presenta la información recopilada sobre los tipos de cobertura y su porcentaje de área basados en el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI entre los levantamientos multiespectrales del predio, la evolución de las coberturas entre el segundo y tercer levantamiento de imágenes. La cobertura altamente óptima aumentó con una variación del 13,88% de la totalidad del área de estudio pasando de 39 a 52,88 %, en los rangos de cobertura optima se han disminuido con una variación del 8,27%, el comportamiento de baja cobertura presento una disminución con una variación de 0,09%. Las áreas del predio con presencia de cero coberturas vegetales se pueden determinar que han disminuido en un 5,52%, las variaciones presentes en los diferentes tipos de coberturas se presentan debido a las actividades propias de los procesos de labranza de los cultivos, se puede determinar una tasa de crecimiento de 30,45 mensual para la cobertura altamente optima, dicha tasa de crecimiento y el análisis del comportamiento de la coberturas optima y baja cobertura vegetal ratifican que las prácticas agrícolas son adecuadas y que las plantas no presentan déficit nutricional

Figura 10 grafico comparativo entre el segundo y tercer sobrevuelo.



Nota. La grafica muestra el aumento del porcentaje de área ocupada por la cobertura altamente optima y la disminución de las áreas relacionadas a la cobertura optima, baja cobertura vegetal y cero coberturas, la cobertura altamente optima

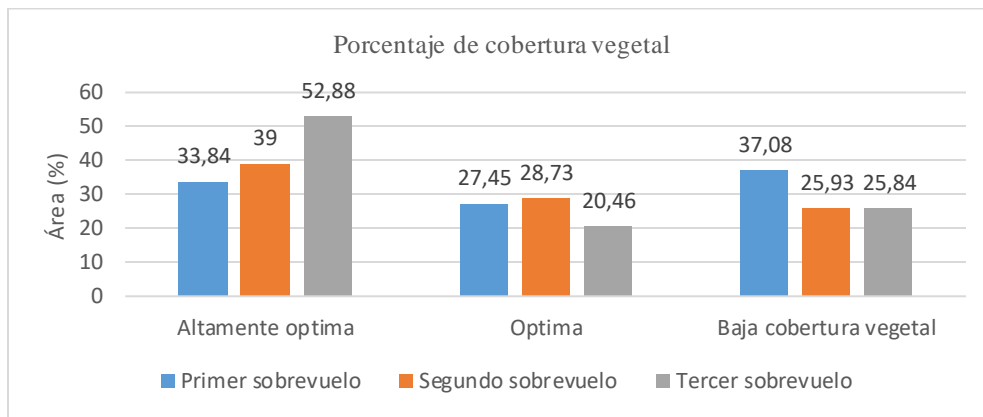
es usada como indicador de la evolución adecuada de los cultivos entre la ventana de tiempo entre la segunda y tercera toma de imágenes multispectrales.

4. CONCLUSIONES

Finalmente, una vez se realizó los tres levantamientos multispectrales en el predio de referencia se procedió a hacer un análisis comparativo global de los resultados de NDVI desde el primero hasta el tercer sobrevuelo, con sus respectivas conclusiones.

Los valores promedio identificados en las coberturas que se encuentran dentro del rango 0,5 a 1 (altamente óptimas y óptimas) que son asociados a un buen estado de salud del material vegetal de los tres sobrevuelos es de 67,45 %, ello permitió afirmar que su desarrollo fue adecuado y no presentó algún tipo de estrés que afectara de manera significativa el estado fitosanitario de las plantas en el tiempo de análisis o dentro del transcurso de la implementación del policultivo.

Figura 11 gráfico comparativo global entre los tres momentos desde el primero hasta el tercer sobrevuelo.



Nota. La grafica muestra el aumento del porcentaje de área ocupada por la cobertura altamente óptima y la disminución de las áreas relacionadas a la cobertura óptima y baja cobertura vegetal, permitiendo la visualización de la evolución adecuada de los cultivos entre la ventana de tiempo entre la primera, segunda y tercera toma de imágenes multispectrales.

Tomado en cuenta el rango anteriormente mencionado, el cual se puede asociar aun buen estado fitosanitario (0,5 – 1,00), se puede determinar que la tasa de crecimiento de las especies usadas en el policultivo sin presencia de alguna carencia nutricional, algún tipo de estrés o enfermedades es de 9% mensual, confirmando que el índice usado es adecuado para el seguimiento del desarrollo de los cultivos.

5. REFERENCIAS

1. Garbero A, Jäckering L. The potential of agricultural programs for improving food security: A multi-country perspective. *Glob Food Secur.* 1 de junio de 2021;29:100529.
2. Cordero E, Longchamps L, Khosla R, Sacco D. Joint measurements of NDVI and crop production data -set related to combination of management zones delineation and nitrogen fertilisation levels. *Data Brief.* 1 de febrero de 2020;28:104968.
3. Talaviya T, Shah D, Patel N, Yagnik H, Shah M. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artif Intell Agric.* 1 de enero de 2020;4:58-73.
4. Bwambale E, Abagale FK, Anomu GK. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agric Water Manag.* 1 de febrero de 2022;260:107324.

Prospectiva, Vol. 23 N°1 2025.

5. Pelaez DA, Gualdrón OE, Torres I. Soil characterization through remote acquisition of electromagnetic radiation. *J Phys Conf Ser.* julio de 2020;1587(1):012033.
6. Zhao W, Zhang X, Jiao J, Yang B, Ma X, Xu Q, et al. High-risk driving factors of rain-induced flooding hazard events on the Loess Plateau and its ecological subregions. *J Hydrol.* 4 de diciembre de 2024;132475.
7. D'Ercole R, Casella D, Panegrossi G, Sanò P. A high temporal resolution NDVI time series to monitor drought events in the Horn of Africa. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation.* 1 de diciembre de 2024;135:104264.
8. Mehmood K, Anees SA, Rehman A, Pan S, Tariq A, Zubair M, et al. Exploring spatiotemporal dynamics of NDVI and climate-driven responses in ecosystems: Insights for sustainable management and climate resilience. *Ecol Inform.* 1 de mayo de 2024;80:102532.
9. Wu Q, Yuan X. Responses of vegetation dynamics to complex environmental changes in the Runoff Producing area of the World's Sixth Longest River: Evolution, Identification, and Prediction. *J Nat Conserv.* 1 de marzo de 2025;84:126776.
10. Khan A, Alamgir A, Fatima N. Spatiotemporal analysis of land use and land cover changes, LST and NDVI in Thatta district, Sindh, Pakistan. *Kuwait J Sci.* 1 de enero de 2025;52(1):100326.
11. Afuye GA, Nduku L, Kalumba AM, Santos CAG, Orimoloye IR, Ojeh VN, et al. Global trend assessment of land use and land cover changes: A systematic approach to future research development and planning. *J King Saud Univ - Sci.* 1 de agosto de 2024;36(7):103262.
12. Liu Y, Wu C, Wang X, Jassal RS, Gonsamo A. Impacts of global change on peak vegetation growth and its timing in terrestrial ecosystems of the continental US. *Glob Planet Change.* 1 de diciembre de 2021;207:103657.
13. Deng L, Mao Z, Li X, Hu Z, Duan F, Yan Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 1 de diciembre de 2018;146:124-36.
14. Eddy IMS, Gergel SE, Coops NC, Henebry GM, Levine J, Zerriffi H, et al. Integrating remote sensing and local ecological knowledge to monitor rangeland dynamics. *Ecol Indic.* 1 de noviembre de 2017;82:106-16.
15. Vecchio Y, De Rosa M, Adinolfi F, Bartoli L, Masi M. Adoption of precision farming tools: A context-related analysis. *Land Use Policy.* 1 de mayo de 2020;94:104481.
16. Griesche C, Baeumner AJ. Biosensors to support sustainable agriculture and food safety. *TrAC Trends Anal Chem.* 1 de julio de 2020;128:115906.
17. Singh PJ, de Silva R. Design and implementation of an experimental UAV network. En: 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT) [Internet]. 2018 [citado 5 de diciembre de 2024]. p. 168-73. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8350739>
18. Xie C, Yang C. A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. *Comput Electron Agric.* 1 de noviembre de 2020;178:105731.
19. Radha Krishna MVV, Govindh MV, Veni PK. A Review on Image Processing Sensor. *J Phys Conf Ser.* enero de 2021;1714(1):012055.
20. GEO Global Agricultural Monitoring and Global Policy Frameworks - Whitcraft - 2022 - Geophysical Monograph Series - Wiley Online Library [Internet]. [citado 6 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119536789.ch10>
21. Sensor Nodes and Communication Protocols of the Internet of Things Applied to Intelligent Agriculture | Request PDF. ResearchGate [Internet]. 21 de noviembre de 2024 [citado 6 de diciembre de 2024]; Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/350536965_Sensor_Nodes_and_Communication_Protocols_of_the_Internet_of_Things_Applied_to_Intelligent_Agriculture

Prospectiva, Vol. 23 N°1 2025.

22. Rivera LB, Bonilla BM, Obando-Vidal F. Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. Cienc Tecnol Agropecu [Internet]. 23 de abril de 2021 [citado 6 de diciembre de 2024];22(1). Disponible en: <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/1578>
23. Modica G, Messina G, De Luca G, Fiozzo V, Praticò S. Monitoring the vegetation vigor in heterogeneous citrus and olive orchards. A multiscale object-based approach to extract trees' crowns from UAV multispectral imagery. Comput Electron Agric. 1 de agosto de 2020;175:105500.
24. Fern RR, Foxley EA, Bruno A, Morrison ML. Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland. Ecol Indic. 1 de noviembre de 2018;94:16-21.
25. Carrillo DAP. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CON POTENCIAL PRODUCTIVO EN EL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER USANDO CÁMARA MULTIESPECTRAL EN UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO. 2019;
26. Tang J, Petrie P, Whitty M. Selección de filtros de bajo costo a partir de datos de espectrómetro para aplicaciones de imágenes multiespectrales. IFAC-Pap. 1 de enero de 2019;52(30):277-82.