DOI: https://doi.org/10.47847/fagropec.v17n1a3

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

REVISTA FAGROPEC
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ISSN-Revista en línea: 2539-178X

EVALUACIÓN DEL NDVI EN CAFÉ *COFFEA ARABICA* A TRAVÉS DE DIFERENTES SENSORES

Evaluation of NDVI in Coffea arabica Through the Use of Different Sensors

Carlos Andrés Benavides Cardona[1]
https://orcid.org/0000-0002-9144-6168
cabenavides@udenar.edu.co

Jorge Fernando Navia Estrada[3]
https://orcid.org/0000-0002-2441-2400
jornavia@udenar.edu.co

David Andrés Calvache Muñoz[2]
https://orcid.org/0000-0003-1975-9343
dacalvache@udenar.edu.co

Javier García Álzate[4]
https://orcid.org/0000-0002-2506-4030
javier@udenar.edu.co

[1]*Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.*

[2]*Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.*

[3]*Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.*

[4]*Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.*

RESUMEN

La agricultura enfrenta actualmente desafíos cada vez mayores para garantizar su sostenibilidad y productividad. En este contexto, la gestión eficiente de la información se consolida como una herramienta fundamental para optimizar la toma de decisiones. En el presente estudio se evaluó la eficiencia de dos tipos de sensores en la recolección de datos en un cultivo de café (*Coffea arabica*), mediante la estimación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en distintas etapas fenológicas. Se compararon un sensor de contacto (PlantPen NDVI 310) y un sensor remoto acoplado a un vehículo aéreo no tripulado (High Precision Single Sensor NDVI - Sentera). El experimento se desarrolló en un lote de café de la variedad Cenicafé 1, ubicado en el municipio de Consacá, departamento de Nariño, considerando tres momentos de evaluación durante la fase reproductiva. Se aplicaron análisis descriptivos, de distribución de frecuencias e interpolación espacial para comparar los resultados obtenidos por ambos métodos. Los datos revelaron que ambos sensores registraron tendencias similares en las variaciones del NDVI

Cómo citar: Fecha recepción: 17 de Junio de 2025 / Fecha Aprobación: 24 de Junio 2025 / Fecha Publicación: 27 de Agosto 2025

Benavides Cardona, C. A., Calvache Muñoz, D. A., Navia Estrada, J. F. & García Álzate, J.(2025). *Evaluación del ndvi en café coffea arabica a través de diferentes sensores.* Revista. FAGROPEC. Vol. 17(1), ppt 49-62. https://doi.org/10.47847/fagropec.v17n1a3

Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons (CC BY 4.0).

asociadas al desarrollo y vigor del cultivo. No obstante, se evidenció la necesidad de utilizar ambos métodos de manera complementaria para mejorar la interpretación del estado fisiológico del cultivo, dado que cada tecnología presenta ventajas y limitaciones específicas en términos de eficiencia y aplicabilidad.

PALABRAS CLAVE:
agricultura de precisión, *Coffea arabica*, percepción remota, sensores, teledetección.

ABSTRACT

Agriculture is currently facing increasingly significant challenges to ensure its sustainability and productivity. In this context, efficient information management has become a fundamental tool for optimizing decision-making. This study evaluated the efficiency of two types of sensors in data collection within a coffee crop (*Coffea arabica*), through the estimation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) at different phenological stages. A contact sensor (PlantPen NDVI 310) and a remote sensor mounted on an unmanned aerial vehicle (High Precision Single Sensor NDVI – Sentera) were compared. The experiment was conducted in a plot of the Cenicafé 1 coffee variety, located in the municipality of Consacá, Nariño department, considering three evaluation points during the reproductive phase. Descriptive analyses, frequency distribution, and spatial interpolation were applied to compare the results obtained by both methods. The data revealed that both sensors recorded similar trends in NDVI variations associated with crop development and vigor. However, the results highlighted the need to use both methods complementarily to enhance the interpretation of the crop's physiological status, as each technology presents specific advantages and limitations in terms of efficiency and applicability.

KEYWORDS:
precision agriculture, Coffea arabica, remote sensing, sensors, telemetry

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la agricultura constituye un pilar esencial para la seguridad alimentaria, pero enfrenta actualmente una disminución en la productividad de cultivos estratégicos como el café, arroz y maíz, situación que ha impulsado la necesidad de adoptar herramientas tecnológicas que optimicen la toma de decisiones en el manejo agrícola (Herrera, 2019). Es evidente que la gestión de procesos y proyectos que ayuden a enfrentar este importante desafío, requiere del concurso de prácticas innovadoras que involucren tanto acciones de intervención en los sistemas productivos, como también el acceso eficiente a la información, aspecto en cual, el uso de sensores remotos, vehículos aéreos no tripulados, minería de datos, entre otras herramientas se constituyen cómo un eje de gran importancia para ser considerados dentro de las ciencias agrarias para afrontar estos nuevos retos (Sishodia et al., 2020).

Los avances en cámaras multiespectrales y sensores ópticos permiten recopilar datos precisos y de alta resolución sobre el estado fisiológico de los cultivos, superando las limitaciones de la observación convencional (Rossius, 2012; Schiaffino, 2006). La teledetección, especialmente mediante imágenes multiespectrales, ha demostrado ser eficaz en el monitoreo de grandes extensiones agrícolas, facilitando la implementación de prácticas más sostenibles y resilientes (Ángeles et al., 2020; Cuervo, 2016).

Gracias a esta tecnología, la identificación de posibles riesgos en la producción agrícola puede abarcar grandes extensiones de terreno (Cuervo, 2016). La teledetección a partir de imágenes multiespectrales contribuye así en la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas o correctivas de forma eficiente (Parlamento Europeo, 2021). Promoviendo de esta manera una agricultura más eficiente, sostenible y resiliente, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al bienestar de la sociedad (FAO, 2015).

Entre los métodos más utilizados para el análisis del estado de la vegetación se destacan los índices espectrales, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ampliamente reconocido por su sensibilidad al vigor vegetal y facilidad de interpretación (Fuentes et al., 2019; Muñoz, 2013; Soubry et al., 2017). Este índice permite cuantificar biomasa, actividad fotosintética y distribución espacial de la vegetación. Otros índices complementarios como GNDVI, SAVI y AMTCI, ofrecen información adicional sobre la clorofila y la estructura del dosel (Zúñiga, 2018).

En el cultivo de café, se ha demostrado que la teledetección multiespectral permite diagnosticar de forma temprana el estado nutricional y fenológico, agilizando la toma de decisiones agronómicas (Rivera et al., 2019). En el departamento de Nariño, donde el café representa la principal fuente de ingresos para más de 54.000 familias en 41 municipios (FNC, 2022), su monitoreo eficiente es prioritario para mejorar la productividad local (CENICAFÉ, 2022).

Por tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de dos tecnologías de captura de datos; un sensor remoto acoplado a un dron (High Precision Single Sensor

NDVI - Sentera) y un sensor de contacto (PlantPen NDVI 310), para estimar el NDVI en distintas etapas del desarrollo reproductivo del café (C. arabica) bajo condiciones ambientales del sur de Colombia.

METODOLOGÍA

Área de estudio.
La zona de estudio se localizó en la finca Villa Lola en la vereda Paltapamba, municipio de Consacá, Nariño, con una altura aproximada de 1.830 msnm, una temperatura promedio de 22 ºC y humedad relativa promedio del 69% (Alcaldía municipal de Consacá, 2020), con coordenadas 77º28'00'' Oeste y 1º12'55'' Norte y con un área aproximada de 2806 m2.

Material vegetal.
Con el objetivo de evaluar el índice NDVI en función del desarrollo fenológico del cultivo, se seleccionó un lote de café de la variedad registrada Cenicafé 1, con 18 meses de edad y un marco de siembra de 2 m entre surcos por 1 m entre plantas. El monitoreo se realizó en tres momentos estratégicos: el primero al inicio de la floración, el segundo a los 78 días y el tercero a los 179 días posteriores a la primera evaluación. Estos tiempos fueron establecidos para corresponder con las fases fenológicas I (floración), II (llenado de fruto) y IV (maduración) del desarrollo del fruto, según la clasificación propuesta por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé, 2014), correspondiente al ciclo productivo del primer semestre del año.

Equipos.
Para la captura de imágenes aéreas se utilizó un dron Mavic Pro (DJI) equipado con un sensor multiespectral NDVI High Precision Single Sensor (SENTERA), con resolución de 1248 × 950 píxeles. Este sensor registró bandas específicas para NDVI (625 nm y 850 nm) y NDRE (720 nm y 840 nm). Los vuelos fueron planificados mediante el software FieldAgent, que permitió delimitar el área de estudio y generar una grilla de vuelo automatizado.

A nivel de planta, se empleó el medidor portátil PlantPen NDVI 310, basado en la fórmula de Tucker (1979), usando lecturas en las bandas de 660 y 740 nm. Se realizaron tres lecturas promedio por planta en hojas de los tres estratos del dosel foliar. Cada medición fue georreferenciada gracias al GPS incorporado en el sensor.

Captura de imágenes y obtención del NDVI
Las fechas de vuelo se establecieron considerando la proyección de la curva de desarrollo del fruto mencionadas previamente y usando los sensores mencionados agendando fechas cada tres meses aproximadamente y se estableció el mismo horario (10:00 am – 12:00 m), con el fin de garantizar una radiación fotosintéticamente activa homogénea.
Para el caso del sensor de contacto, se establecieron muestreos periódicos que coincidirían con los momentos mencionados y ejecutados a través de lectura directa sobre plantas marcadas en la ruta que posteriormente sería considerada en los planes de vue-

lo para el vehículo soporte del sensor remoto en el cual se consideró una velocidad de ascenso y desplazamiento de 2 m/s, inclinación de la cámara de 90o, número de fotos y solape frontal y lateral del 80%.

Empleando el software FieldAgent se trazó el polígono del área de influencia y la grilla del vuelo. Posteriormente, se escribió el vuelo programado en el computador/piloto automático del vehículo aéreo no tripulado para que este lo siguiera durante los vuelos.

Análisis de la información

Para el caso de los datos derivados del sensor de contacto Plantpent, se consideró inicialmente, un proceso descriptivo a través de un análisis de tendencia central en cada momento de evaluación. Posteriormente, se realizó un análisis de distribución de frecuencias que permito en cada momento, la obtención de rangos de NDVI característicos y diferenciales dentro del lote. Para el sensor remoto se establecieron parámetros básicos descriptivos gráficos a través de un proceso de algebra de mapas. Finalmente, con el objetivo de realizar la comparación de imágenes obtenidas con los dos sensores, se estableció una interpolación a partir de las coordenadas consideradas en la evaluación de contacto versus imagen derivada del sensor remoto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis descriptivo

En primera instancia, la Tabla 1 presenta el análisis de tendencia central correspondiente a los datos obtenidos mediante el sensor de contacto. Los resultados indican un comportamiento estadísticamente homogéneo, evidenciado por la proximidad entre los valores de los parámetros calculados y la media, así como por rangos de dispersión reducidos. En particular, parámetros como la desviación estándar, la curtosis, la varianza y el coeficiente de variación reflejaron una baja dispersión y sugieren una distribución de datos próxima a la normalidad.

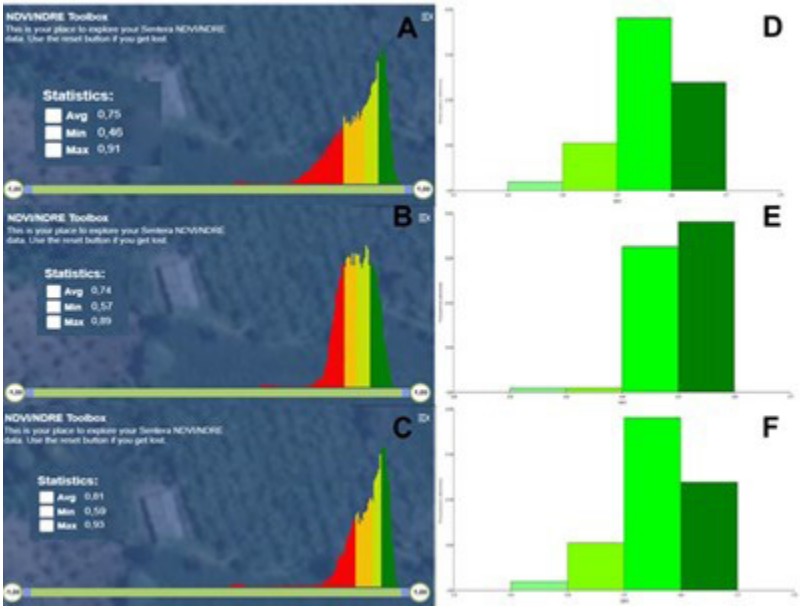
Durante el primer momento de evaluación correspondiente a la fase de floración, se registró una media de NDVI de 0,62, una moda de 0,64, una curtosis de 1,959 y un coeficiente de variación de 8,172. Estos indicadores no solo evidencian un estado fisiológico vigoroso y saludable del cultivo en esta etapa, sino que además constituyen una línea base de referencia para el análisis comparativo del comportamiento del NDVI en los momentos fenológicos subsiguientes.

Tabla 1.
Análisis de tendencia central primer, segundo y tercer momento de evaluación – Sensor de contacto.

Primer momento			
Estadístico	NDVI	Estadístico	NDVI
Media	0,62	Coeficiente de asimetría	-1,160
Error típico	0,006	Rango	0,275
Mediana	0,62	Mínimo	0,434
Moda	0,64	Máximo	0,709
Desviación estándar	0,051	Cuenta	78
Varianza de la muestra	0,003	Coeficiente de variación	8,172
Curtosis	1,959	Nivel de confianza (95,0%)	0,011
Segundo momento			
Estadístico	NDVI	Estadístico	NDVI
Media	0,56	Coeficiente de asimetría	-1,700
Error típico	0,005	Rango	0,294
Mediana	0,57	Mínimo	0,348
Moda	0,58	Máximo	0,642
Desviación estándar	0,044	Cuenta	78
Varianza de la muestra	0,002	Coeficiente de variación	7,731
Curtosis	6,852	Nivel de confianza (95,0%)	0,010
Tercer momento			
Estadístico	NDVI	Estadístico	NDVI
Media	0,63	Coeficiente de asimetría	-2,193
Error típico	0,005	Rango	0,302
Mediana	0,64	Mínimo	0,403
Moda	0,64	Máximo	0,705
Desviación estándar	0,046	Cuenta	78
Varianza de la muestra	0,002	Coeficiente de variación	7,300
Curtosis	8,403	Nivel de confianza (95,0%)	0,010

En el caso del sensor remoto, el análisis de la imagen obtenida durante la evaluación del NDVI arrojó una media de 0,75, con un valor mínimo de 0,46 y un máximo de 0,91. Aunque la media y el valor mínimo son consistentes con los registrados por el sensor de contacto, el valor máximo fue considerablemente superior. Esta discrepancia puede atribuirse a la naturaleza del sensor remoto, cuya resolución espacial (tamaño del píxel) abarca un área mayor que el dosel individual de las plantas de café. En consecuencia, es posible que la señal registrada incluyera la reflectancia de especies arvenses presentes en el sistema productivo, las cuales presentan índices NDVI más altos, afectando así la estimación puntual del índice (Figura 1A).

Figura 1.
Análisis multitemporal del índice NDVI en C. arabica mediante sensores remoto y de contacto.



Nota: A) Mapa de NDVI correspondiente al primer momento de evaluación, obtenido mediante sensor remoto (Sentera NDVI), B) Mapa de NDVI correspondiente al segundo momento de evaluación, capturado con sensor remoto, C) Mapa de NDVI del tercer momento de evaluación, generado por el sensor remoto, D) Histograma de distribución de frecuencias del NDVI para el primer momento, registrado con sensor de contacto (PlantPen NDVI 310), E) Histograma de distribución de frecuencias del NDVI para el segundo momento, sensor de contacto, F) Histograma de distribución de frecuencias del NDVI para el tercer momento, sensor de contacto.

Para el sensor remoto, el análisis del NDVI arrojó una media de 0,75, con valores extremos de 0,46 (mínimo) y 0,91 (máximo). Aunque la media y el mínimo coinciden con los obtenidos mediante el sensor de contacto, el valor máximo fue superior. Esta diferencia podría explicarse por la resolución espacial del sensor remoto, que abarca áreas más amplias y posiblemente incluye vegetación arvense con mayor vigor fotosintético, elevando así los valores NDVI detectados (Figura 1A).

En la segunda evaluación, los valores obtenidos con el sensor de contacto mostraron una disminución del NDVI respecto al primer momento, con una media de 0,56 y una moda de 0,58. La curtosis aumentó a 6,852, lo que indica una mayor concentración de valores extremos, a pesar de conservar una distribución aproximadamente normal. Esta variación puede atribuirse a un incremento en el gasto energético del cultivo durante esta fase fenológica (Tabla 1).

De forma paralela, el análisis mediante sensor remoto reflejó un patrón similar, con una

media de 0,74, un mínimo de 0,57 y un máximo de 0,89. Los datos también evidenciaron mayor dispersión respecto al primer momento (Figura 1B).

Durante la tercera evaluación, se observó una recuperación en los valores de NDVI con el sensor de contacto, alcanzando una media de 0,63, moda de 0,64, curtosis de 8,403 y un coeficiente de variación de 7,3. Estos valores reflejan una tendencia ascendente, concordante con los resultados obtenidos con el sensor remoto (Tabla 1, Figura 1C). Fisiológicamente, este comportamiento se asocia al avance del fruto hacia su fase final de maduración, caracterizada por una máxima acumulación de biomasa y una reactivación de la actividad fotosintética en el follaje, lo que se traduce en un incremento de la reflectancia y del NDVI en plantas sanas.

Análisis de distribución de frecuencias

La figura 1D muestra el histograma de frecuencia del índice NDVI, en el primer momento de evaluación, en la cual se observa que, poseen el 82.05% de datos agrupados con valores superiores a 0,57.

Tabla 2.

Distribución de frecuencias índice NDVI primera, segunda y tercera evaluación

Primer momento								
Variable	**Clase**	**LI**	**LS**	**MC**	**FA**	**FR**	**FAA**	**FRA**
NDVI	1	0,43	0,50	0,465	2	0,026	2	0,026
NDVI	2	0,50	0,57	0,535	12	0,154	14	0,179
NDVI	3	0,57	0,64	0,605	42	0,538	56	0,718
NDVI	4	0,64	0,71	0,675	22	0,282	78	1
Segundo momento								
Variable	**Clase**	**LI**	**LS**	**MC**	**FA**	**FR**	**FAA**	**FRA**
NDVI	1	0,35	0,42	0,386	1	0,013	1	0,013
NDVI	2	0,42	0,49	0,459	1	0,013	2	0,026
NDVI	3	0,49	0,57	0,531	35	0,449	37	0,474
NDVI	4	0,57	0,64	0,604	41	0,526	78	1
Tercer momento								
Variable	**Clase**	**LI**	**LS**	**MC**	**FA**	**FR**	**FAA**	**FRA**
NDVI	1	0,40	0,47	0,438	1	0,013	1	0,013
NDVI	2	0,47	0,55	0,513	3	0,038	4	0,051
NDVI	3	0,55	0,63	0,588	19	0,244	23	0,295
NDVI	4	0,63	0,70	0,663	55	0,705	78	1

Nota: LI: límite inferior; LS: límite superior; MC: mediana de la clase; FA: frecuencia absoluta FR: frecuencia relativa FAA: frecuencia absoluta acumulativa; FRA: frecuencia relativa acumulativa

Los datos obtenidos reflejan una masa vegetal predominantemente sana, con valores de NDVI superiores a 0.33, umbral mínimo asociado a vegetación vigorosa. Aproximadamente un 25% de las observaciones se ubicaron en rangos indicativos de vegetación

muy saludable. En teledetección, estos valores implican que las plantas absorben más radiación roja y reflejan más radiación infrarroja cercana (NIR), lo cual es característico de tejidos activos fotosintéticamente. Este patrón puede variar según la edad foliar, la proximidad entre plantas y la época del año (Martin et al., 2005; Samborski et al., 2009). En este estudio, el comportamiento observado es coherente con dicha interpretación, indicando un manejo agronómico homogéneo y un estado sanitario favorable, tal como lo refleja la señal captada por el sensor.

La Figura 1E muestra el histograma de frecuencia del NDVI en el segundo momento de evaluación, correspondiente a la fase II de desarrollo del fruto. En esta etapa, los valores oscilaron entre 0.35 y 0.64, confirmando que el 100% de la vegetación permanecía en estado medianamente sano (Tabla 2). Esta disminución del NDVI sugiere un mayor consumo energético asociado a la alteración de la relación fuente-vertedero. Durante el crecimiento acelerado del fruto, una porción significativa de la energía es movilizada desde las hojas adyacentes, provocando su senescencia y caída, y reduciendo la reflectancia del tejido foliar (Valarini et al., 2005; Chaves et al., 1984).

En el tercer momento de evaluación (fase IV de fructificación), el histograma de frecuencia (Figura 1F, Tabla 2) mostró nuevamente homogeneidad en los valores NDVI. Esta estabilización puede estar relacionada con la recuperación del estado energético de las plantas, ya que el fruto alcanza su madurez fisiológica y la demanda de fotoasimilados comienza a disminuir. A medida que las hojas completan su desarrollo, actúan como fuentes de nutrimentos hacia los frutos y raíces, reduciendo su contenido interno (Sadeghian & Salamanca, 2015). En esta fase, disminuye la exportación de fotoasimilados desde órganos fotosintéticos hacia los frutos (Aluko et al., 2021), permitiendo la recuperación parcial de los niveles de azúcares solubles en las hojas, que representan hasta el 80% de los fotoasimilados transportados (Chang et al., 2017; Osorio et al., 2014; Rodrigues et al., 2019).

Se encontraron en su totalidad nuevamente datos correspondientes a vegetación medianamente sana y muy sana, este último estado con un aproximado de 65% de la totalidad de datos, como se indica en la tabla 2.

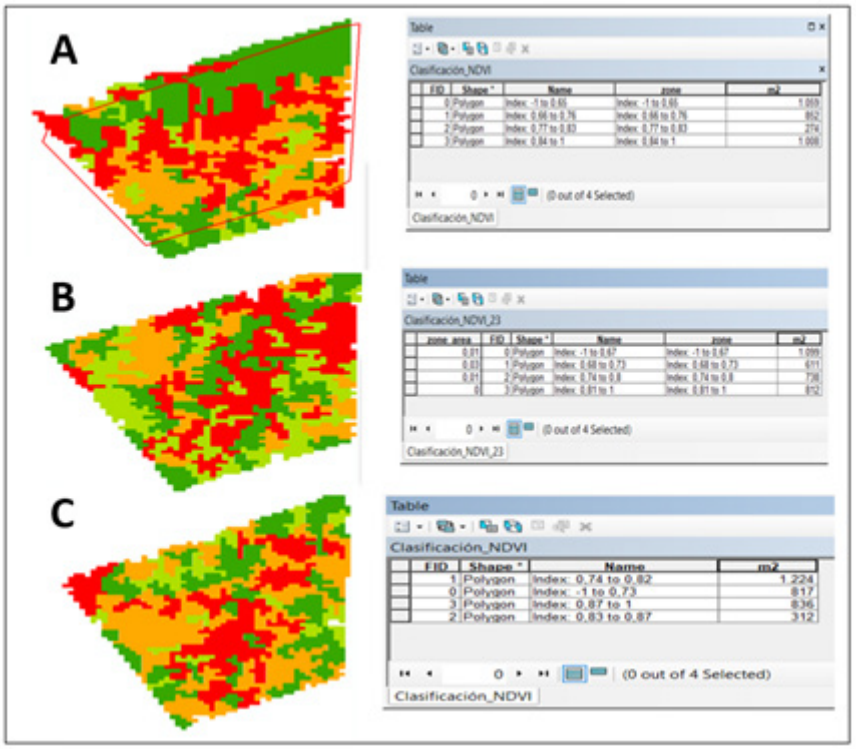
Análisis comparativo imágenes multiespectral

A partir de los datos capturados por el sensor remoto, se generaron polígonos de clasificación para cada uno de los momentos de evaluación, delimitando la cobertura espacial de las distintas clases de NDVI dentro del lote. Se establecieron cuatro clases diferenciadas por colores (rojo, naranja, amarillo y verde), asignadas de menor a mayor valor de NDVI. Cabe aclarar que dichos colores son contrastantes para facilitar la visualización, pero no representan cualitativamente el estado fisiológico del cultivo; este se interpreta directamente a partir del valor numérico del índice (Figura 2).

En el primer momento de evaluación (Figura 2A), los rangos de NDVI y sus respectivas áreas fueron los siguientes: clase 1 (NDVI: -1 a 0.65, rojo): 1,059 m², Clase 2 (NDVI: 0.66 a 0.76, naranja): 852 m², Clase 3 (NDVI: 0.77 a 0.83, amarillo): 274 m², Clase 4 (NDVI:

0.84 a 1.00, verde): 1,004 m².
Estos resultados coinciden con el análisis estadístico previo, en el cual más del 50% del lote presentó valores NDVI superiores a 0.60, lo que indica una distribución predominante de vegetación con vigor fisiológico moderado a alto (Tabla 2).

Figura 2.
Polígonos derivados del sensor remoto con representación gráfica NDVI. A) evaluación primer momento, B) segundo momento y C) tercer momento.



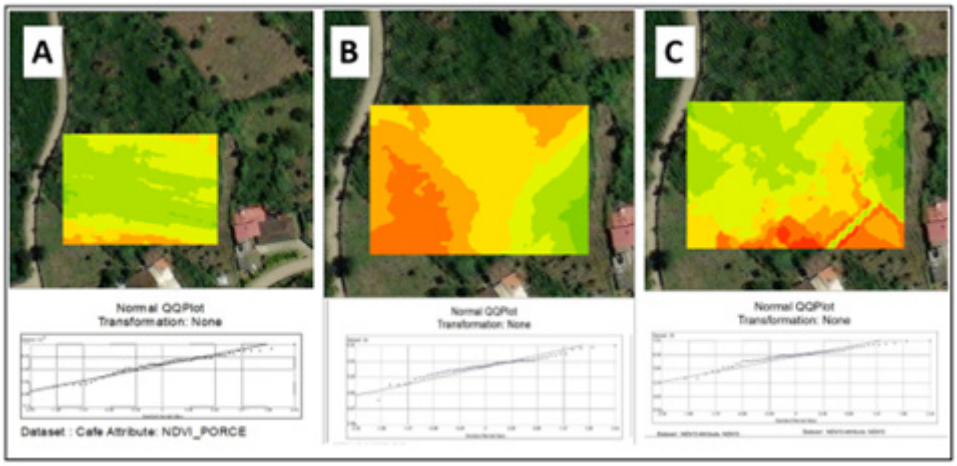
En el segundo momento de evaluación (Figura 2B), los valores de NDVI se clasificaron en cuatro rangos: clase 1 (NDVI: -1 a 0.67, rojo): 1,099 m², clase 2 (NDVI: 0.68 a 0.73, amarillo): 611 m², clase 3 (NDVI: 0.74 a 0.80, naranja): 738 m², clase 4 (NDVI: 0.81 a 1.00, verde): 812 m². En el tercer momento de evaluación, los rangos y áreas fueron: clase 1 (NDVI: -1 a 0.73, rojo): 817 m², clase 2 (NDVI: 0.74 a 0.82, naranja): 1,224 m², clase 3 (NDVI: 0.83 a 0.87, amarillo): 312 m², clase 4 (NDVI: 0.88 a 1.00, verde): 836 m². Estos resultados reflejan una redistribución progresiva de la biomasa y el vigor del cultivo a lo largo de su desarrollo fenológico.

Complementariamente, el análisis de interpolación mediante el método de diagrama de Voronoi aplicado a los datos del sensor de contacto mostró una adecuada representación espacial de los valores de NDVI en todos los momentos evaluados, como se evidencia en la pendiente ajustada de la superficie interpolada (Figura 3). Aunque la cobertura espacial fue menor en comparación con el sensor remoto, debido a la naturaleza puntual

de los datos (valores foliares y buffers derivados), se observaron patrones similares de distribución.

Los rangos de NDVI interpolados por color para cada momento están detallados en la tabla 2 a partir de la cual se establecieron las categorías base utilizadas en los mapas de interpolación.

Figura 3.
Polígonos derivados de la interpolación con datos del sensor de contacto con representación gráfica NDVI. A) evaluación primer momento, B) segundo momento y C) tercer momento.



Las etapas I y IV del desarrollo del fruto presentaron los valores más altos de vigor vegetal, según los índices de NDVI. Este índice, como señalan Meneses et al. (2016), refleja el vigor de las plantas mediante la absorción de radiación roja por la clorofila y la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) por la estructura celular foliar. Una vez que las hojas de café completan su expansión, se convierten en fuentes activas de fotoasimilados y nutrientes móviles, los cuales son redistribuidos hacia órganos de demanda como raíces y frutos.

Durante la fase II de fructificación, este proceso de movilización reduce la concentración de compuestos celulares en las hojas, disminuyendo su reflectancia NIR y aumentando la absorción de energía, lo que se traduce en valores más bajos de NDVI. Así, el desarrollo del fruto implica una dinámica fisiológica que altera la distribución de nutrientes y afecta la acumulación de biomasa (Laviola et al., 2007).

CONCLUSIONES

La evaluación comparativa de los dos sistemas de medición del NDVI evidenció una relativa homogeneidad en los resultados obtenidos. No obstante, la interpretación precisa del estado fitosanitario del cultivo no puede depender exclusivamente de la percepción remota, debido a limitaciones inherentes a su resolución espacial, que pueden introducir sesgos por heterogeneidad en la cobertura vegetal. Ambos sistemas demostraron ser he-

rramientas útiles para el diagnóstico del vigor y la sanidad del cultivo, al permitir detectar variaciones asociadas a los estados fenológicos del desarrollo del fruto. La sensibilidad del NDVI a los cambios estructurales y fisiológicos del dosel vegetal resalta su potencial como indicador clave en el monitoreo de café bajo un enfoque de agricultura de precisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alcaldía municipal de Consacá, (2020). Plan de desarrollo municipio de Consacá 2020 –2023. https://alcaldiaconsacanarino.micolombiadigital.gov.co/sites/alcaldiaconsacanarino/content/files/000385/19246_plan-de-desarrollo-municipio-de-consaca-definitivo.pdf

Aluko, J., Kumar, R., & Zhang, Y. (2021). Understanding source–sink dynamics in crop plants for improved productivity. Physiologia Plantarum, 173(2), 431–446. https://doi.org/10.1111/ppl.13244

Ángeles, R., Geraldi, M., & Marini, F. (2020). Procesamiento digital de imágenes satelitales. Metodologías y técnicas. http://hdl.handle.net/11336/135234

Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé. (2022). Informe Anual Cenicafé 2022. https://doi.org/10.38141/10783/2022

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2014). La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones. https://cenicafe.org/es/publications/avt0441.pdf

Chang, T. G., Zhu, X.-G., & Raines, C. A. (2017). Source–sink interaction: A century old concept under the light of modern molecular systems biology. Journal of Experimental Botany, 68(16), 4417–4431. https://doi.org/10.1093/jxb/erx002

Chaves, J., & Sarruge, J. R. (1984). Alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 19(11), 1307–1312.

Cuervo, F. (2016). Utilización de imágenes multiespectrales para el análisis del comportamiento de la firma espectral del lago de Tota y la influencia de los cultivos de cebolla. Universidad Militar Nueva Granada. http://hdl.handle.net/10654/15602

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – FNC (2022). Café de Nariño: Datos de interés. https://narino.federaciondecafeteros.org/narino/

Fuentes, F., Ortega, S., Rivera, M., Bardeen, M., & Moreno, M. (2019). Comparison of vegetation indices acquired from RGB and multis-

pectral sensors placed on UAV. IEEE Conference Proceedings. https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609861

Herrera, E. (2019). La revolución tecnológica en el campo. Razón Pública. https://razonpublica.com/como-promover-la-innovacion-tecnologica-en-el-campo-economia-naranja-rural-y-agrotech/

Laviola, B. G., Martinez, H. E. P., Salomão, L. C. C., Cruz, C. D., & Mendonça, S. M. (2007). Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. Revista brasileira de ciência do solo, 31, 1451-1462. https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600022

Martin, K., Hodgen, P., Freeman, K., Melchiori, R., Arnall, D., Teal, R., ... & Raun, W. (2005). Plant-to-plant variability in corn production. Agronomy Journal, 97(5), 1603–1611. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0129

Meneses, V., Velásquez, D., & Téllez, J. (2016). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. Universidad Nacional de Colombia.

Muñoz, P. (2013). Apuntes de teledetección: Índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389

Parlamento Europeo. (2021). La inteligencia artificial y su uso. Construir un sistema alimentario sostenible: la estrategia de la UE. https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200827STO85804/que-es-la-inteligencia-artificial-y-como-se-usa

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/sustainable-agriculture/es/

Osorio, S., Ruan, Y.-L., & Fernie, A. R. (2014). An update on source-to-sink carbon partitioning in tomato. Frontiers in Plant Science, 5, 516. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00516

Rivera, L., Montoya, B., & Obando, F. (2019). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el NDVI en plantaciones de café variedad Castillo. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 22(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578

Rodrigues, J., Inzé, D., Nelissen, H., & Saibo, N. J. M. (2019). Source–sink regulation in crops under water deficit. Trends in Plant Science, 24(7), 652–663. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.04.005

Rossius, S. (2012). Reconocimiento de objetos mediante webcam en tiempo real. Universitat Politècnica de València. https://riunet.upv.es/handle/10251/29009

Sadeghian, S., & Salamanca, J. (2015). Micronutrientes en frutos y hojas de café. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Micronutrientes.pdf

Samborski, S. M., Tremblay, N., & Fallon, E. (2009). Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendation. Agronomy Journal, 101(4), 800–816. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0162Rx

Schiaffino, M. (2006). Navegación autónoma basada en visión estereoscópica y lógica difusa. Universidad Tecnológica Nacional. https://tesis.blanque.com.ar/tesis/Home_files/Tesis_Paula_Schiaffino.pdf

Sishodia, R., Ram, R., & Ray, S. S. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. Remote Sensing, 12(19), 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136

Soubry, I., Patias, P., & Tsioukas, V. (2017). Monitoring vineyards with UAV and multi-sensors for the assessment of water stress and grape maturity. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131807485

Valarini, V., Bataglia, O., & Fazuoli, L. (2005). Macronutrientes em folhas e frutos de cultivares de café arábica de porte baixo. Bragantia, 64(3), 333–340. https://www.scielo.br/j/brag/a/yqjJcLv8xqkCjDjP4NBCrtP/

Zúñiga, J. (2018). Application of remote sensors for analysis of the vegetative state of oil palm cultivation by means of the NDVI and spectral signatures. Repositorio UNAD. http://hdl.handle.net/10654/20387