

Monitoreo de deforestación y salud vegetal en cultivos de café mediante teledetección

Monitoring deforestation and plant health in coffee crops
using remote sensing

Laura Vanesa Cano-Rodríguez^{1*}, Valentina Cruz-Ospina¹, Juan R. Sanz-Urbe¹ and Eduardo Duque-Dussán¹

RESUMEN

Palabras clave:

Caficultura sostenible
Imágenes RGB
NDVI
Sentinel-2
Zoca

Este estudio analizó la dinámica de la cobertura vegetal en sistemas de producción de café en la estación experimental Naranjal (Chinchiná, Colombia), combinando imágenes de drones (RGB) y satelitales (Sentinel-2) para diferenciar entre prácticas agrícolas de renovación (zoca) y procesos de deforestación. Se evaluaron cuatro lotes de *Coffea arabica* L. en etapas vegetativa/productiva (5 meses a 5 años) mediante el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), el cual mostró aumentos en todos los casos ($\Delta\text{NDVI} +0.029$ a $+0.216$). Los ortomosaicos georreferenciados e imágenes RGB capturadas con dron mostraron un predominio del canal verde (G: 78,2–85,7) y valores bajos en el azul (B: 38,2–43,2), confirmando una cobertura vegetal densa. Los resultados indican un incremento en la cobertura vegetal en los lotes estudiados, lo cual aporta evidencia técnica para demostrar que la renovación de cafetales bajo las prácticas evaluadas no conlleva una pérdida neta de cobertura y diferencia el manejo agronómico legítimo de la deforestación un aspecto relevante frente a regulaciones como el reglamento de deforestación de la Unión Europea (EUDR) que buscan garantizar la sostenibilidad de las cadenas de suministro.

ABSTRACT

Keywords:

Sustainable coffee
RGB images
NDVI
Sentinel-2
Stumping

This study analyzed the dynamics of plant cover in coffee production systems at the Naranjal experimental station (Chinchiná), by combining drone (RGB) and satellite (Sentinel-2) images to differentiate between agricultural renewal practices (stumping) and deforestation processes. Four *Coffea arabica* L. plots in vegetative/productive stages (5 months to 5 years) were evaluated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which showed increases in all cases ($\Delta\text{NDVI} +0.029$ to $+0.216$). Georeferenced orthomosaics and RGB images captured by drone showed a predominance of the green channel (G: 78.2–85.7) and low blue values (B: 38.2–43.2), confirming dense plant coverage. The results indicate an increase in plant cover in the studied plots, providing technical evidence to demonstrate that coffee renewal under the evaluated practices does not lead to a net loss of cover, a relevant aspect in the context of regulations such as the European Union Deforestation Regulation (EUDR), which aim to ensure the sustainability of supply chains.

¹ Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Manizales, Colombia.

*Corresponding author: laura.cano@cafedecolombia.com

América Latina produce aproximadamente el 60% del café mundial y el 80% de *Coffea arabica* L. (Ekqvist 2015). Colombia es uno de los tres principales productores, consumidores y exportadores globales (Caravaggio and Vaquero-Piñeiro 2024), destina más de 850 mil hectáreas a este cultivo, principalmente en manos de pequeños agricultores con 1,3-1,6 ha de área promedio cultivadas (FNC 2024). El café es un pilar económico, social y ambiental para la región, sustentando medios de vida y configurando paisajes rurales (Somarriba et al. 2021). Las exportaciones colombianas en 2023/24 alcanzaron 11,9 millones de sacos de 60 kg 15,2% mas que en el año 2022/23, con mercados clave en Norteamérica (47.8%), Europa (27,1%) y Asia (20,8%) (FNC 2024). Sin embargo, regulaciones como el reglamento de deforestación de la Union Europea (EUDR) exigen certificar que el café no provenga de tierras deforestadas después de 2020 (Soto and Parada 2025). El cumplimiento de esta norma requiere de sistemas de trazabilidad y verificación de la condición de la cobertura del suelo, lo que representa un desafío para la cadena productiva. En Colombia

donde tradicionalmente el café es cultivado bajo sombra (Arcila P et al. 2007), prácticas como la zoca (renovación de cafetales) son frecuentemente confundidas con deforestación. Esta ambigüedad amenaza certificaciones y el acceso a mercados internacionales. Este estudio evaluó si la zoca puede ser diferenciada de la deforestación real, mediante el análisis integrado de imágenes Sentinel-2 (Copernicus) y drones. El propósito es generar evidencia que sustente la sostenibilidad de este manejo agronómico en términos de cobertura vegetal.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Naranjal (Cenicafé), ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas (Colombia), en las coordenadas 04°59' N, 75°39' O, a una altitud de 1.400 msnm y temperatura media anual de 20,8 °C. (Gómez-Soto 2023).

Material vegetal

Se evaluaron lotes de *Coffea arabica* L. con diferentes edades y etapas fenológicas:

Tabla 1. Descripción de lotes evaluados.

Lote	Edad	Etapas fenológica	Área
La Merced	5 meses	etapa vegetativa	2.325 m ²
Germinación	7 meses	etapa vegetativa	3.319 m ²
Desarrollo	3 años	etapa productiva	4.394 m ²
Maduro	5 años	etapa productiva	4.043 m ²

Adquisición de imágenes

Drones: se capturaron imágenes RGB con un dron DJI Mavic mini (formato PNG), volando a 20 m de altura con un ángulo nadiral (90°), velocidad de 1,5 m s⁻¹, y solapes del 80% (frontal) y 70% (lateral). Las fotografías se tomaron cada 3 segundos para garantizar una cobertura completa.

Procesamiento: las imágenes RGB se procesaron mediante el software WebODM Lightning para generar ortomosaicos georreferenciados. El flujo de trabajo incluyó:

Fotografías de cada lote con metadatos GPS, Procesamiento automático con configuración estándar y ortomosaicos resultantes que se analizaron en ImageJ,

donde se obtuvieron los valores promedio de rojo, verde y azul (escala 0-255).

Análisis comparativo con imágenes satelitales: se utilizaron imágenes multiespectrales de la misión Sentinel-2 (plataforma Copernicus) para los años 2020 (línea base) y 2024 (estado mas actual de las imágenes). El Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) se calculó para cada lote y año utilizando la ecuación 1, donde B8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B4 a la banda roja.

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{B8 + B4} \quad (1)$$

El NDVI varía entre -1 y 1, donde valores altos (próximos a 1) indican vegetación densa y saludable, valores bajos

positivos representan vegetación escasa o estresada, y valores negativos se asocian a cuerpos de agua o suelo desnudo. Cabe mencionar que el NDVI puede presentar efectos de saturación en áreas de vegetación muy densa, lo que podría subestimar la verdadera vitalidad de la vegetación en los puntos de más alta cobertura.

Análisis de datos. El análisis se centró en la comparación descriptiva de los valores de NDVI entre

2020 y 2024 para evaluar la tendencia en la cobertura vegetal, y en el análisis de las firmas espectrales RGB derivadas de los ortomosaicos. Dada la naturaleza del diseño observacional y el número limitado de lotes, no se realizaron pruebas estadísticas de significancia; los cambios reportados son de carácter descriptivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN
Comparación Temporal de NDVI (2020 vs. 2024)

Tabla 2. Valores de NDVI por lote (2020 vs 2024) y su diferencia.

Lote	NDVI 2020	NDVI 2024	Δ NDVI
La Merced	0,613	0,642	+0,029
Germinación	0,419	0,635	+0,216
Desarrollo	0,614	0,666	+0,052
Maduro	0,547	0,647	+0,1

Como se ve en la tabla 2 todos los lotes muestran un aumento en NDVI entre 2020 y 2024, lo que indica

mejoras notables en la salud vegetal y/o manejo agrícola.

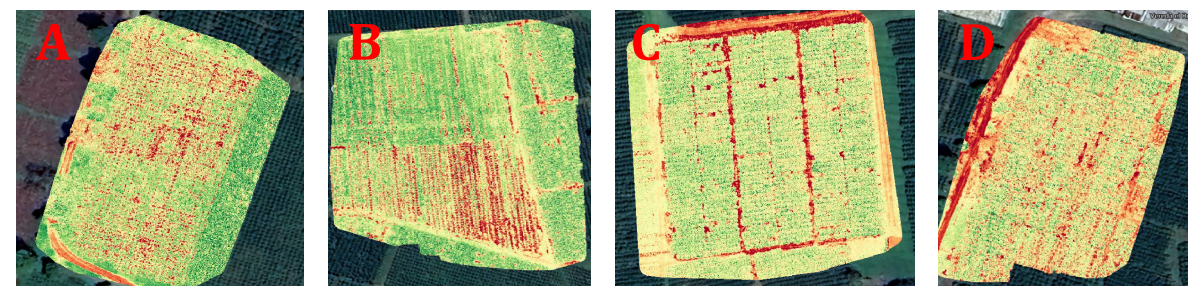


Figura 1. Salud vegetal de lotes evaluados.

La Figura 1 presenta los mapas de salud vegetal de los cuatro lotes: la Merced (A), Germinación (B), Desarrollo (C) y Maduro (D) donde la escala de color (verde:

alta actividad fotosintética; amarillo: estrés leve; rojo: suelo desnudo) permite visualizar el vigor de la cobertura.



Figura 2. ortomosaicos georreferenciados de lotes evaluados

Tabla 3. Valores RGB por lote derivados de ortomosaico.

Lote	Red	Green	Blue	(R+G+B)/3	Luminosidad
La Merced	64,27	78,19	43,15	61,90	70,06
Germinación	65,15	85,72	38,17	63,06	74,14
Desarrollo	63,80	80,00	41,99	61,93	70,81
Maduro	65,13	80,83	43,22	63,07	71,83

Los valores RGB de la Tabla 3 de 2025 revelaron alta reflectancia en verde y baja en azul, indicando cobertura vegetal densa y mínima exposición de suelo. El lote 'Germinación' destacó con el mayor valor de verde (G: 85.7) y NDVI elevado (0,635). Los lotes con mayor NDVI tienen valores altos de verde y bajos de azul, confirmando cobertura vegetal densa.

CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran que los sistemas de producción de café en la Estación Experimental Naranjal mantienen e incrementan la cobertura vegetal (NDVI promedio 2024: 0.64).

El estudio proporciona evidencia técnica para sustentar que los métodos de renovación en Naranjal cumplen con la regulación de cobertura vegetal de la EUDR, al comprobar el aumento progresivo de NDVI en todos los lotes y bajos valores de azul en RGB (B <45), indicando mínima exposición de suelo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por las acciones

de investigación e innovación Horizon EUSPA-2022-SPACE de la Unión Europea, en virtud del acuerdo de subvención no.101131859 (COMUNIDAD).

REFERENCIAS

- Arcila PJ, Farfán VF, Moreno BA, Salazar GLF and Hincapié GE (2007) Sistemas de producción de café en Colombia
- Caravaggio N and Vaquero-Piñero C (2024) Are Geographical Indications Contributing to Environmental Conservation? The Case of Coffee Industry and Deforestation in Colombia SSRN <https://doi.org/102139/ssrn4685756>
- Ekqvist I (2015, mayo 29) The influence of agroforestry on soil fertility in coffee cultivations
- FNC FN de C de C (2024) Informe gerente general <https://publicacionescenicafecafeorg/index.php/infgerente/article/view/2954/2937>
- Gómez-Soto J (2023) Análisis económico de la retención de pases y empleo de lonas en la recolección de café Revista Cenicafé 74(1): e74101 <https://doi.org/1038141/10778/74101>
- Somarriba E, Lopez-Sampson A and Rica C (2021) Coffee and Cocoa Agroforestry Systems: Pathways to Deforestation, Reforestation, and Tree Cover Change.
- Soto XO and Parada LP (2025) Buenas prácticas públicas y privadas para la adecuación a la normativa europea en América Latina—Casos de aceite de palma, cacao y café.