



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.2.628>

Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*)

Analysis of the Vegetation Indices NDVI, GNDVI, and NDRE for the Characterization of Coffee Crops (*Coffea arabica*)

DAVID REVELO LUNA *

JULIO MEJÍA MANZANO **

BIBIANA P. MONTOYA-BONILLA ***

JAVIER HOYOS GARCÍA ****

* Corporación Universitaria Comfacauca, Colombia.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3845-8522>.

Correspondencia: drevelo@unicomfacauca.edu.co

** Corporación Universitaria Comfacauca, Colombia.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5666-9235>

*** Corporación Universitaria Comfacauca, Colombia:

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7314-3385>

**** Parque Tecnológico de Innovación del Café y su Caficultura, Colombia.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6485-7762>



Resumen

Los índices de vegetación se han usado en los últimos años para determinar el tipo de cobertura, evaluar su variación temporal o establecer el estado de salud de cultivos a partir de estimaciones de características como vigor vegetal, contenido de clorofila, estado nutricional o estado hídrico. En diversos estudios, se han propuesto una variedad de índices de vegetación que usan diferentes bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano para obtener características de interés. Sin embargo, en cultivos de café estos estudios han sido limitados. El objetivo de este trabajo es evaluar las diferencias estadísticas entre los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE, estimados a partir de imágenes aéreas tomadas a 30 m del dosel de un cultivo experimental de la especie vegetal *Coffea arabica*. El coeficiente de correlación de Spearman mostró que la correlación es mayor entre los índices NDVI y GNDVI en comparación con la correlación presentada entre cualquiera de ellos y el índice NDRE. Además, se observó que, de acuerdo con los valores del coeficiente de variación y el análisis posterior de los histogramas, el índice NDRE presentó una mayor sensibilidad ante la variación de vigor vegetal, lo que sugeriría un mayor potencial a la hora de caracterizar el estado de desarrollo del cultivo de café, frente a los otros índices estudiados.

Palabras clave: agricultura de precisión, *Coffea arabica*, imágenes multiespectrales, índices espectrales.

Abstract

Recently, vegetation indices have been used in order to determine the type of cover, with the interest of its temporal variation evaluation, or with the aim of determining the status of the health of crops from estimation of some characteristics such as plant vigor, chlorophyll content, nutritional or water status. Several studies have put forward a range of vegetation indices that use different bands in the visible and near-infrared spectrum, to obtain characteristics of interest. In this study, statistical differences between the NDVI, GNDVI, and NDRE vegetation indices, estimated from aerial images taken at 30 m above the canopy of an experimental *Coffea arabica* crop, were evaluated. Spearman correlation coefficient showed a higher correlation between the NDVI and GNDVI indices, compared to that found between either of them and NDRE. In addition to this, it was observed that, according to the values of the coefficient of variation, and the subsequent analysis of the histograms, the NDRE index presented a greater sensitivity to variation in plant vigor, which would suggest a greater potential to characterize the state of development of coffee cultivation, compared to other studied indices.

Keywords: *Coffea arabica*, multispectral images, precision agriculture, spectral indices

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, y en especial en el departamento del Cauca, la producción de café tiene gran importancia económica y social. Si bien durante los últimos años los cultivos han comenzado a ser monitoreados para comprender el efecto de diferentes variables químicas y ambientales sobre la productividad y las características finales del producto, no todos los caficultores tienen acceso a conocer aspectos como distribución espacial de sus cultivos y gestión de los recursos en este [1]. La producción exitosa del café depende de un monitoreo adecuado que involucre diferentes variables del cultivo, el cual se realiza en campo y demanda extensas jornadas en la recolección de información. Existen herramientas tecnológicas como el uso de RPA (aviones tripulados de forma remota) equipados con cámaras multiespectrales que permiten mapear extensiones mucho más grandes de cultivo en menor tiempo [2].

La respuesta espectral en un cultivo se relaciona con la interacción entre la radiación electromagnética y las características relacionadas con la vegetación, como la estructura de la vegetación, el estado fenológico, la densidad de la vegetación, la orientación espacial y los efectos del fondo del suelo [3], [4]. En áreas de cultivos como el café, factores tales como el suelo, el uso sistemático de implementos agrícolas, el sombreado interno y la distancia entre plantas aumentan la complejidad del estudio de sus características espectrales. Otros elementos que intervienen en el análisis de la respuesta espectral de los cultivos son la variación en la iluminación y las geometrías del objetivo [5]. La característica no lambertiana de la superficie y la topografía también influyen en la respuesta espectral del cultivo [6]. Según [7], la topografía influye en la luminosidad medida por los sensores remotos y reduce la precisión de las estimaciones derivadas de la cubierta vegetal. Lo anterior tiene importancia en el estudio espectral del cultivo de café del departamento del Cauca debido a la irregularidad de las parcelas cafeteras.

Los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multiespectrales permiten determinar el estado de salud de los cultivos, a partir de diferentes características, como contenido de clorofila [8], [9], [10]; estado nutricional [11], [12]; estado hídrico [13], [14], [15]; y deficiencias estructurales [16], [17]; todo esto con alta resolución espacial. Medidas ópticas similares pueden tomarse usando equipos de campo con la consecuente pérdida de resolución espacial y espectral, efecto que ocurre, por ejemplo, en los espectrómetros foliares que permiten medir índices de vegetación en hoja.

Elegir el índice de vegetación adecuado para cada aplicación constituye un reto, en ocasiones, difícil de abordar. Diversos estudios han mostrado que el desempeño de algunos índices de vegetación difiere en relación con los parámetros específicos que se desean estimar, por ejemplo, índices $CI_{Red-edge}$ y TSAVI (por sus siglas en inglés) para

estimar área foliar [18], [19]; índice EVI (por sus siglas en inglés) para estimar contenido de agua [20]; índices NDVI, GCI y SR (por sus siglas en inglés) para estimar biomasa, densidad vegetal, biodiversidad, abundancia vegetal [21], [22]; e índices NDVI*SR, SR y mND_{blue} para estimar contenido de nitrógeno y contenido de clorofila [23], [24], [25]. El objetivo principal de esta investigación fue establecer las diferencias y similitudes estadísticas entre los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE, en un cultivo experimental de la especie *Coffea arabica*, usando imágenes aéreas tomadas con la cámara multispectral MicaSense RedEdge-M.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño experimental

Este estudio se realizó en la hacienda Los Naranjos, propiedad de Supracafé, ubicada en el municipio de Cajibío, en el departamento del Cauca. Tiene como característica principal su topografía plana y vegetación arbórea en sus alrededores. Climatológicamente, el municipio de Cajibío forma parte de la zona de confluencia intertropical (ZCIT) y cuenta con dos periodos de precipitaciones (abril-junio y septiembre-noviembre) [26]. El área de estudio tiene una extensión de 0,1652 h, con una altitud de 1870 m s. n. m. y con coordenadas correspondientes a latitud 2°35'11,6" norte, longitud -76°33'11,2" oeste (tabla 1).

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO

Edad del cultivo	Dos años y medio
Modalidad de siembra	Indirecta
Tipo de cultivo	Variedad Castillo
Distancia entre surcos	1,5 m
Distancia entre plantas	1,33 m
Densidad de plantación	5013 semillas por hectárea
Número de árboles cultivados	828
Tipo de renovación	Bandola o pulmón
Fertilizante	25, 4, 24
Fechas de cosecha	Abril-julio

Fuente: elaboración propia.

La zona de estudio se dividió usando una cuadrícula que segmenta la región en 25 zonas de igual dimensión, y se tomaron las 15 regiones centrales para su procesamiento de forma independiente. Estas regiones se numeraron para identificarlas en los procesamientos siguientes (figura 1).

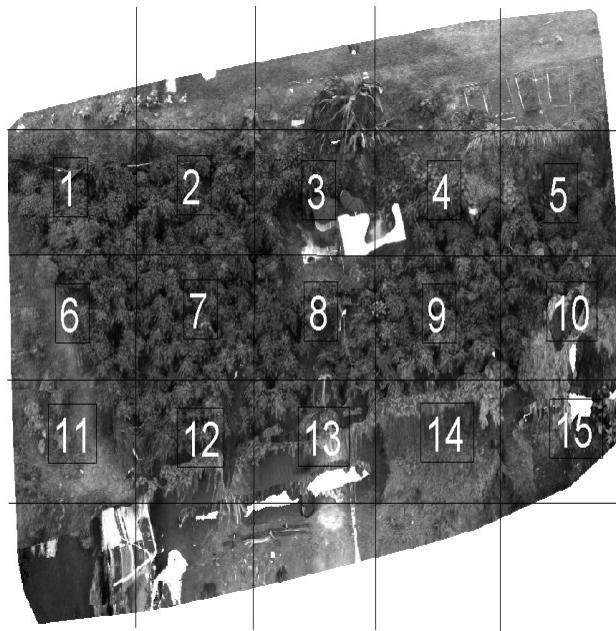


FIGURA 1. CULTIVO DE CAFÉ EN ESTUDIO, DIVISIÓN EN CUADRÍCULA DE LAS ZONAS DE INTERÉS.

2.2. Medida de índices de vegetación usando imágenes multiespectrales

Se tomaron imágenes multiespectrales aéreas de la parcela en estudio, usando la cámara MicaSense RedEdge-M y una aeronave no tripulada Phantom-4 de DJI a una distancia de 30 m del nivel del dosel, previa calibración con blanco de reflectancia. Las imágenes multiespectrales fueron calibradas radiométricamente (obtención de reflectancia a partir de medidas de intensidad). Se realizó calibración geométrica para obtener ortomosaicos de cada banda del espectro (azul 475 nm, verde 560 nm, rojo 668 nm, rojo-borde 717 nm e infrarrojo cercano 840 nm (NIR)), usando un algoritmo desarrollado para tal fin. Se estimaron los índices de vegetación (figura 2) de diferencia normalizada NDVI, GNDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada verde) [27] y NDRE (índice de vegetación de diferencia normalizada de borde rojo) [28], Eq. 1.

$$NDVI = \frac{(R_{840} - R_{668})}{(R_{840} + R_{668})}$$

$$GNDVI = \frac{(R_{840} - R_{560})}{(R_{840} + R_{560})} \quad (1)$$

$$NDRE = \frac{(R_{717} - R_{668})}{(R_{717} + R_{668})}$$

Donde R_{840} , R_{717} , R_{668} , R_{560} son los porcentajes de luz reflejados con respecto al blanco de calibración a longitudes de onda 840, 717, 668 y 560 nm, correspondientes a las bandas NIR, rojo-borde, rojo y verde, respectivamente. Con el fin de identificar la sensibilidad de los índices espectrales ante variaciones en el vigor en las zonas de estudio, se calculó el coeficiente de variación (CV) de cada región de interés [29] para cada índice de vegetación (NDVI, GNDVI y NDRE). Además, se estimaron valores representativos de las zonas de interés (ROI, por sus siglas en inglés) usando el valor más frecuente del histograma para los índices de vegetación en estudio.

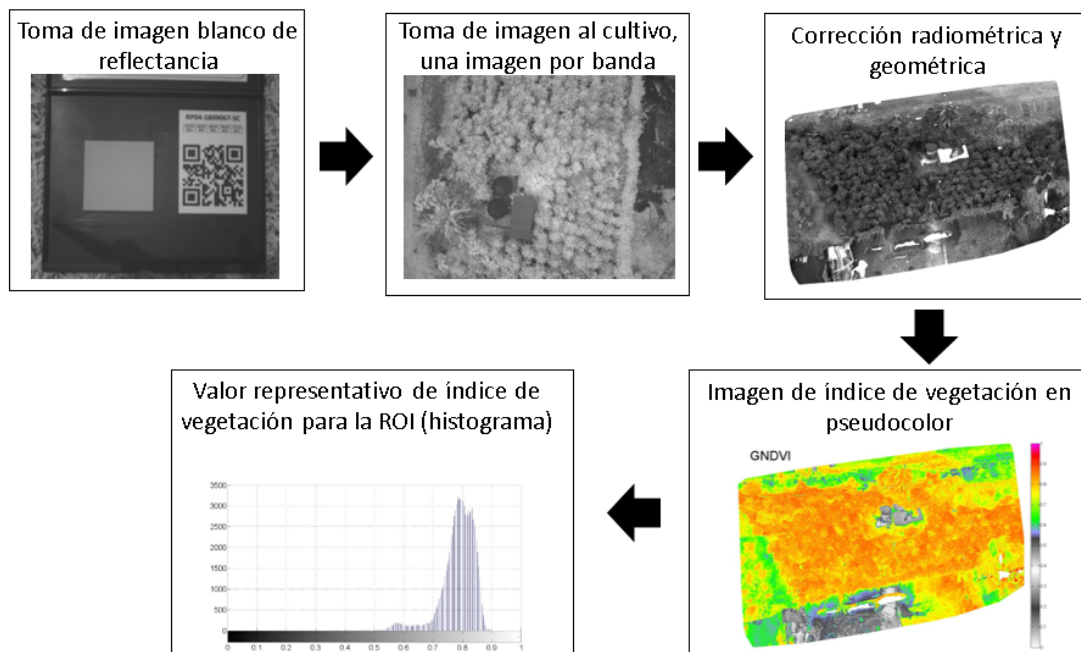


FIGURA 2. ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES CON CÁMARA MICASense REDEDGE-M.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Respuesta espectral, imágenes multiespectrales

Las imágenes multiespectrales procesadas permitieron estimar los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE en el cultivo de estudio, con una resolución espacial de 2,1 cm². El mapa espectral permitió, en los tres índices, diferenciar entre tejido vegetal y no vegetal (figura 3).

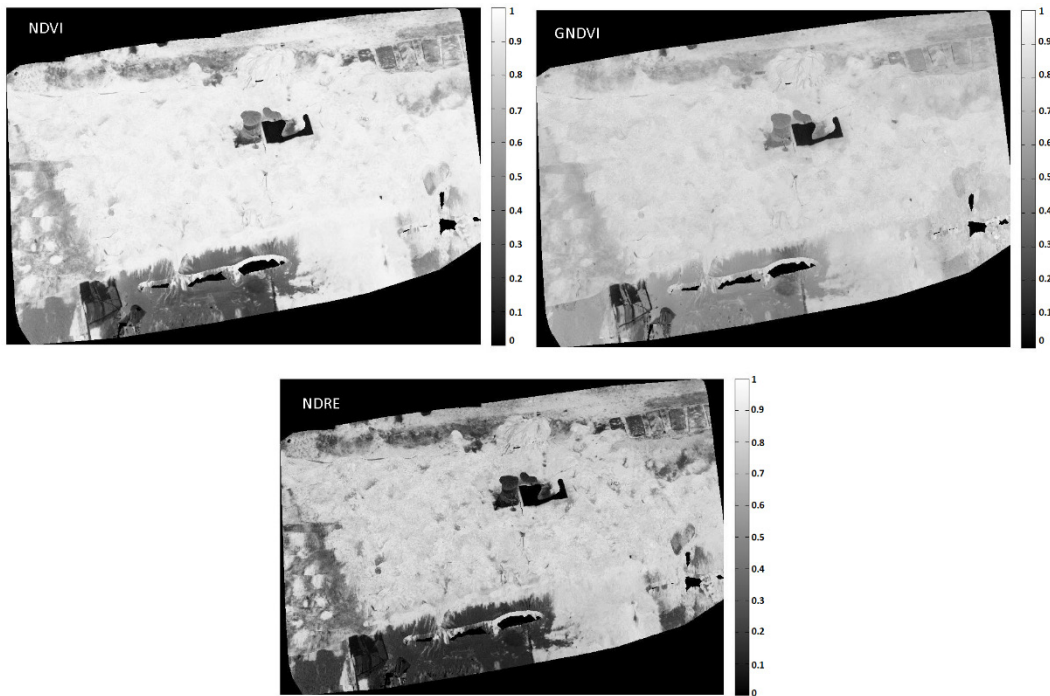


FIGURA 3. ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI, GNDVI Y NDRE DEL CULTIVO DE ESTUDIO.

Los valores de coeficiente de variación fueron mayores en el índice NDRE que en los índices NDVI y GNDVI (figura 4). Esto sugiere que el índice NDRE puede ser más sensible ante variaciones de vigor del cultivo, y podría presentar mayor sensibilidad en la determinación del contenido de clorofila, pigmento que se encuentra estrechamente ligado al vigor vegetal [30]. El índice NDVI se ha usado satisfactoriamente para determinar si el tipo de cobertura es vegetal o no, además, para evaluar la variación temporal del tejido vegetal [31]-[34]. Sin embargo, la sensibilidad en determinar variaciones dentro de la cobertura vegetal ha sido limitada, debido, en buena medida, a que relativamente poca cantidad de clorofila es suficiente para saturar la absorción en la

banda alrededor de 668 nm [35]. Las variaciones en este índice se deben a cambios estructurales en el mesófilo de la hoja o en el dosel [36]. Los índices de vegetación alternativos como el NDRE pueden presentar una mejor respuesta ante las variaciones de vigor dentro de un cultivo. Incluso, se han encontrado niveles de correlación altos para determinar variaciones de clorofila usando la banda espectral del rojo-borde [37]-[40].

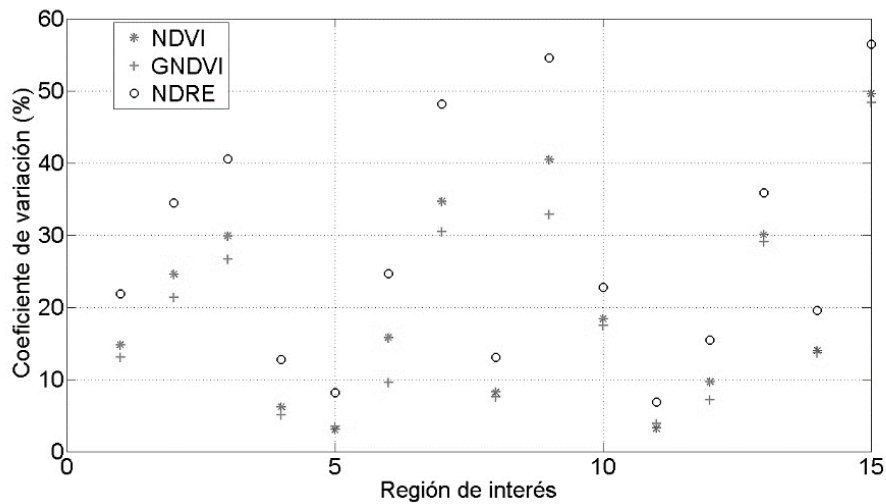


FIGURA 4. COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI, GNDVI Y NDRE PARA LAS 15 REGIONES DE INTERÉS.

3.2. Correlación entre índices espectrales

El coeficiente de correlación de Spearman [41] entre los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE fue en todos los casos $\rho > 0,9$ (tabla 2). En particular, la pareja de índices con menor coeficiente de correlación y determinación fue NDRE-GNDVI ($\rho = 0,91$, $R^2 = 0,83$), lo cual sugiere que los eventos que no logren ser explicados por uno de los índices podrían verse reflejados en el comportamiento del otro. Es decir, estos dos índices, al no compartir longitudes de onda, podrían explicar diferentes estados del cultivo. A pesar de haber realizado un mapeo por toda la imagen donde se espera existan valores de índice de vegetación en todo el rango de trabajo, los índices de vegetación presentaron poca frecuencia para valores intermedios (0,5-0,7), lo cual sugiere que los índices de vegetación pueden perder sensibilidad para ciertos rangos de vigor vegetal o contenido de clorofila (figura 5).

TABLA 2. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN Y COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R² ENTRE ÍNDICES NDVI, GNDVI Y NDRE

Índices de vegetación	Coefficiente de correlación de Spearman (ρ)	Coefficiente de determinación (R ²)
GNDVI-NDVI	0,97	0,94
NDRE-GNDVI	0,91	0,83
NDRE-NDVI	0,95	0,90

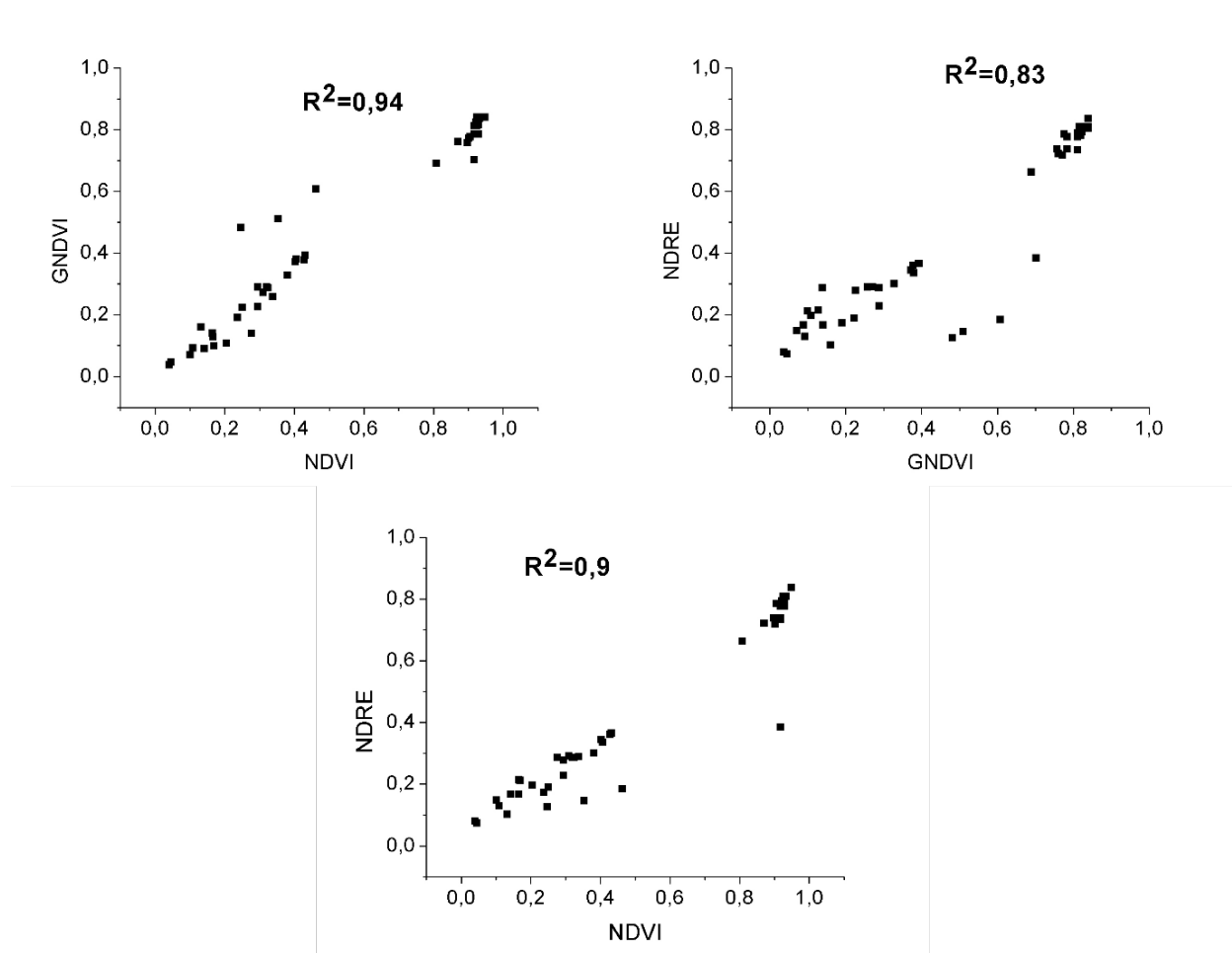


FIGURA 5. CORRELACIÓN ENTRE ÍNDICES ESPECTRALES NDVI, GNDVI Y NDRE.

3.3 Histogramas de las zonas de interés

En consideración a la resolución espacial que proporcionan las imágenes multiespectrales, se estimaron los valores más frecuentes del histograma de cada región de interés. Se encontró que el índice NDVI fue menos sensible ante las variaciones de cobertura en toda la zona de estudio. Por ejemplo, las zonas 3 y 12 presentaron una disminución para los índices GNDVI y NDRE, mientras que el índice NDVI permaneció casi constante (figura 6).

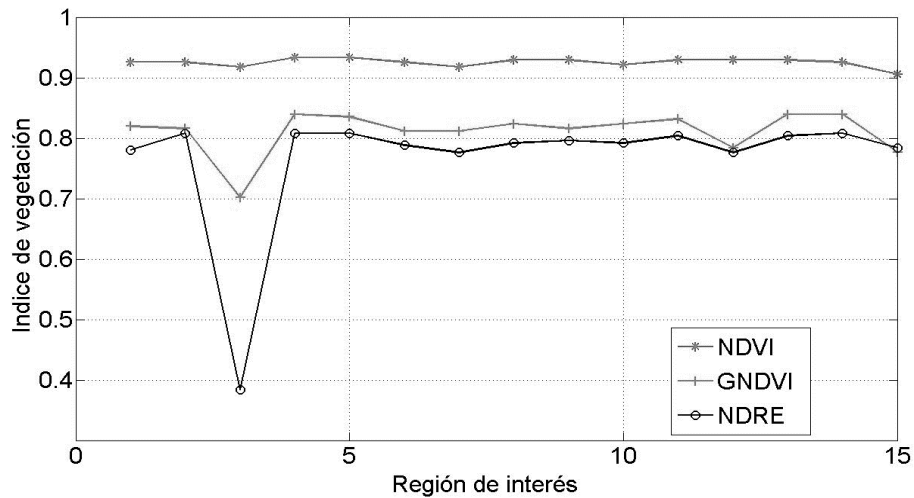


FIGURA 6. VALORES MÁS FRECUENTES DEL HISTOGRAMA DE CADA ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI, GNDVI Y NDRE) PARA LAS 15 REGIONES DE INTERÉS DEL CULTIVO.

El histograma de una zona que tiene solo tejido vegetal difiere en su distribución respecto de una zona que tiene cubierta vegetal y no vegetal. En regiones de interés como la 3 en el cultivo de estudio, donde la cobertura no vegetal es comparable con la cobertura vegetal, se espera que la distribución de su histograma tenga dos máximos o valores representativos, tal como lo muestra la distribución de frecuencias del índice NDRE en la figura 7.

El índice GNDVI presenta en la misma zona un solo máximo definido, lo cual sugiere que tiene la menor sensibilidad ante las variaciones de cobertura dentro de una ROI. Mientras que el índice NDVI, aunque presenta dos máximos en su histograma, sus valores se encuentran entre 0,6 y 0,95 (figura 7), lo cual muestra que también presenta sensibilidad limitada ante estados bajos de vigor vegetal. Los resultados sugieren que la sensibilidad del índice NDRE puede ser más conveniente al analizar el tipo de cobertura y sus variaciones espaciales de vigor.

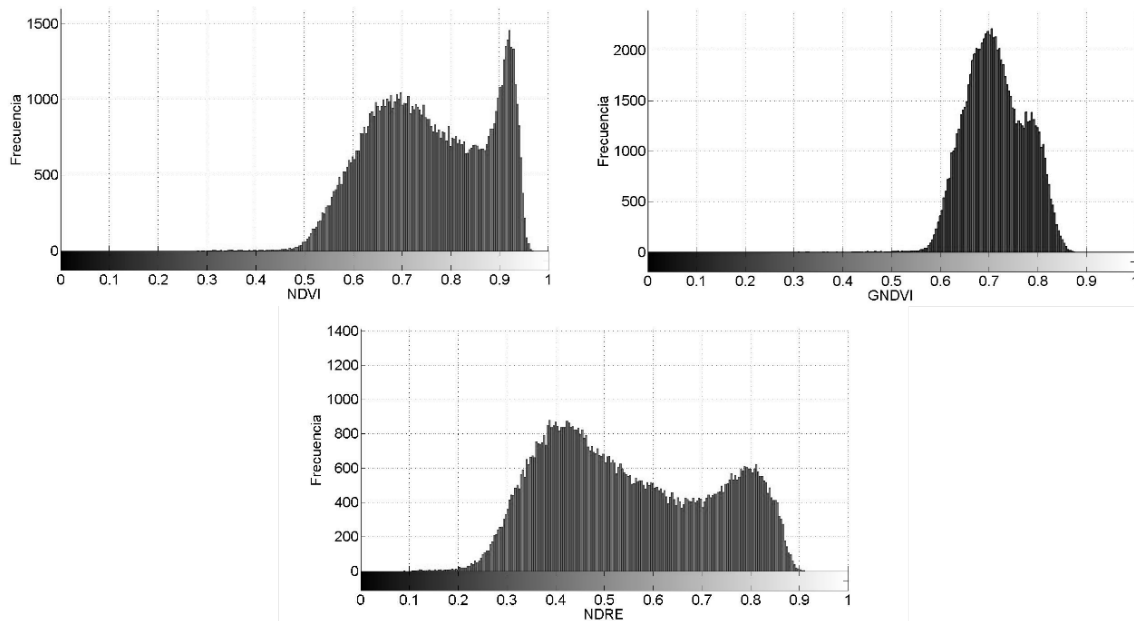


FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DE HISTOGRAMAS EN LA REGIÓN DE INTERÉS 3 PARA LOS ÍNDICES NDVI, GNDVI Y NDRE.

4. CONCLUSIONES

Los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE son indicadores aceptables de las zonas de vegetación. En particular, el índice NDRE presentó mayor coeficiente de variación que los otros dos índices en las mismas zonas de estudio, lo cual sugiere un mejor desempeño en la detección de cobertura vegetal. El coeficiente de correlación de Spearman mostró mayor dependencia entre los índices NDVI y GNDVI que entre alguno de ellos y el índice NDRE.

La resolución espacial de las imágenes multiespectrales permitió realizar un análisis espacial en frecuencia a través de ROI. Los valores más representativos de cada ROI mostraron que los índices NDVI y GNDVI son más susceptibles a estados de saturación. La posible saturación de las bandas asociadas a la absorción de clorofila puede ocasionar la poca sensibilidad de este índice espectral, lo cual sugiere que un estudio valioso puede ser determinar longitudes de onda donde exista absorción del pigmento, pero que no lleguen a estados de saturación prematuramente.

REFERENCIAS

- [1] Federación Nacional de Cafeteros. (5 dic. 2018). *Informe gerente general* [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/comitecafeterosvalle/docs/informe_del_gerente_2018_1_
- [2] S. Chauhan, R. Darvishzadeh, M. Boschetti, M. Pepe y A. Nelson, “Remote sensing-based crop lodging assessment: current status and perspectives”, *ISPRS*, vol. 151, pp. 124-140, my. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.005>
- [3] L. Galvão, A. Formaggio y D. Tisot, “Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, no. 8, pp. 523-534, febr. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012>
- [4] Y. E. Shimabukuro y F. J. Ponzoni, “Orbital sensors data applied to vegetation studies”, *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 64, no. 6, pp. 873-886, dic. 2012.
- [5] E. P. Moreira, “Correção radiométrica do efeito de iluminação solar induzido pela topografia”, Tesis de maestría, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2014.
- [6] C. Mattar, B. Franch, J. A. Sobrino, C. Corbari, J. C. Jiménez-Muñoz, L. Olivera-Guerra, D. Skokovic, G. Sória, R. Oltra-Carriò, Y. Julien y M. Mancinie, “Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural área”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 147, pp. 23-42, my. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.011>
- [7] S. Ediriweera, S. Pathirana, T. Danaher, D. Nichols y T. Moffiet, “Evaluation of different topographic corrections for Landsat TM data by prediction of foliage projective cover (FPC) in topographically complex landscapes”, *Remote Sens.*, vol. 5, no. 12, pp. 6767-6789, 2013. <https://doi.org/10.3390/rs5126767>
- [8] A. R. Petach, M. Toomey, D. M. Aubrecht y A. D. Richardson, “Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 195-196, pp. 143-151, sep. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.008>
- [9] K. Yu, V. Lenz-Wiedemann, X. Chen y G. Bareth, “Estimating leaf chlorophyll of barley at different growth stages using spectral indices to reduce soil background and canopy structure effects”, *ISPRS*, vol. 97, pp. 58-77, nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.005>
- [10] R. Main, M. A. Cho, R. Mathieu, M. M. O’Kennedy, A. Ramoelo y S. Koch, “An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation”, *ISPRS*, vol. 66, no. 6, pp. 751-761, nov. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.08.001>

- [11] B. Zhao, A. Duan, S. Ata-Ul-Karim, Z. Liu, Z. Chen, Z. Gong, J. Zhang, J. Xiao, Z. Liu, A. Qin y D. Ning, "Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize", *European Journal of Agronomy*, vol. 93, pp. 113-125, febr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.006>
- [12] J. Abdulridha, Y. Ampatzidis, R. Ehsani y A. I. de Castro, "Evaluating the performance of spectral features and multivariate analysis tools to detect laurel wilt disease and nutritional deficiency in avocado", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 155, pp. 203-2011, dic. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.016>
- [13] M. Rossini, F. Fava, S. Cogliati, M. Meroni, A. Marchesi, C. Panigada, C. Giardino, L. Busseto, M. Migliavacca, S. Amaducci y R. Colombo, "Assessing canopy PRI from airborne imagery to map water stress in maize", *ISPRS*, vol. 86, pp. 168-177, dic. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.10.002>
- [14] A. Ramoelo, S. Dzikiti, H. van Deventer, A. Maherry, M. Cho y M. Gush, "Potential to monitor plant stress using remote sensing tools", *Journal of Arid Environments*, vol. 113, pp. 134-144, febr. 2015. doi: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.003
- [15] R.S.NLima, I.García-Tejero, T.S. Lopes, J. M. Costa, M. Vaz, V. H. Durán-Zuazo, M. Chaves, D. M. Glenn y E. Campostrinid, "Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes", *Agricultural Water Management*, vol. 164, p. 148-157, en. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.017>
- [16] J. Farifteh, R. R. Struthers, R. Swennen y P. Coppin, "Plant spectral and thermal response to water stress induced by regulated deficit irrigation", *International Journal of Geosciences and Geomatics*, vol. 1, no. 1, pp. 17-22, 2013.
- [17] Y. Ge, G. Bai, V. Stoerger y J. Schnable, "Temporal dynamics of maize plant growth, water use, and leaf water content using automated high throughput RGB and hyperspectral imaging", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 127, pp. 625-632, sep. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.028>
- [18] A. Viña, A. A. Gitelson, A. L. Nguy-Robertson y Y. Peng, "Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf are index crops", *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 12, pp. 3468-3478, dic. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010>
- [19] V. M. Rodríguez-Moreno y S. H. Bullock, "Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el desierto sonorense", *Rev. Mex. Cienc. Agríc*, vol. 4, no. 16, pp. 611-623, my.-jun. 2013.
- [20] J. Qiu, W. T. Crow, W. Wagner y T. Zhao, "Effect of vegetation index choice on soil moisture retrievals via the synergistic use of synthetic aperture radar and optical remote sensing", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 80, pp. 47-57, ag. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.015>

- [21] V. Kumar, A. Sharma, R. Bhardwaj y A. K. Thukral, “Comparison of different reflectance indices for vegetation analysis using Landsat-TM data”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 12, pp. 70-77, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.013>
- [22] A. Kross, H. McNairn, D. Lapen, M. Sunohara y C. Champagne, “Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 34, p. 235-248, febr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.002>
- [23] M. Xu, R. Liu, J. M. Chen, Y. Liu, R. Shang, W. Ju, C. Wu y W. Huang, “Retrieving leaf chlorophyll content using a matrix-based vegetation index combination approach”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 224, pp. 60-73, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.039>
- [24] S. Jay, F. Maupas, R. Bendoula y N. Gorretta, “Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping”, *Field Crops Research*, vol. 210, pp. 33-46, ag. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.005>
- [25] A. Tong y Y. He, “Estimating and mapping chlorophyll content for a heterogeneous grassland: comparing prediction power of a suite of vegetation indices across scales between years”, *ISPRS*, vol. 126, pp. 146-167, abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.010>
- [26] Alcaldía Municipal Cajibío Cauca. (2012). *Plan de Desarrollo 2012-2015 “Propósito de todos* [En línea]. Disponible en: <http://www.cajibio-cauca.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-vigilancia-20122015>
- [27] C. Qiu, G. Liao, H. Tang, F. Liu, X. Liao, R. Zhang y Z. Zhao, “Derivative Parameters of Hyperspectral NDVI and Its Application in the Inversion of Rapeseed Leaf Area Index”, *Appl. Sci.*, vol 8, no. 8, p. 1300, 2018, <https://doi.org/10.3390/app8081300>
- [28] E. Raymond Hunt Jr., C. S. T. Daughtry, J. U. H. Eitel y D. S. Long, “Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index”, *Agronomy Journal*, vol. 103, no. 4, pp. 1090-1099, jul. 2011. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0395>
- [29] R. Sonobe, T. Sano y H. Horie, “Using spectral reflectance to estimate leaf chlorophyll content of tea with shading treatments”, *Biosystems Engineering*, vol. 175, pp. 168-182, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.018>
- [30] A. de la Casa, G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, G. Díaz y C. Miranda, “Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot”, *ISPRS*, vol. 146, pp. 531-547, dic. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>

- [31] R. R. Fern, E. A. Foxley, A. Bruno y M. L. Morrison, "Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland", *Ecological Indicators*, vol. 94, pp. 16-21, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.029>
- [32] G. Zhijia, D. Xingwu, S. Yandong, L. Ya y P. Xi, "Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China", *Ecological Indicators*, vol. 93, pp. 54-64, oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.033>
- [33] Y. Zhang, F. Ling, G. Foody, Y. Ge, D. Boyd, X. Li, Y. Du y M. Atkinson, "Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007-2016", *Remote Sensing of Environment*, vol. 224, pp. 74-91, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.038>
- [34] G. Wang, J. Wang, X. Zou, G. Chai, M. Wu y Z. Wang, "Estimating the fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil from MODIS data: Assessing the applicability of the NDVI-DFI model in the typical Xilingol grasslands", *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, vol. 76, pp. 154-166, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.006>
- [35] C. Wu, Z. Niu, Q. Tang y W. Huang, "Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation", *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 148, no. 8-9, pp. 1230-1241, jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.005>
- [36] G. Cordon, M. G. Lagorio y J. M. Paruelo, "Chlorophyll fluorescence, photochemical reflective index and normalized difference vegetative index during plant senescence", *Journal of Plant Physiology*, vol. 199, pp. 100-110, jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.05.010>
- [37] J. G. Clevers y A. A. Gitelson, "Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 23, pp. 344-351, ag. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- [38] C. Ju, Y. Tian, X. Yao, W. Cao, Y. Zhu y D. Hannaway, "Estimating leaf chlorophyll content using red edge parameters", *Pedosphere*, vol. 20, no. 5, pp. 633-644, 2010. doi: 10.1016/S1002-0160(10)60053-7
- [39] T. Zheng, N. Liu, L. Wu, M. Li, H. Sun, Q. Zhang y J. Wu, "Estimation of chlorophyll content in potato leaves based on spectral red edge position", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 17, pp. 602-606, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.131>
- [40] X. Zhou, W. Huang, J. Zhang, W. Kong, R. Casa y Y. Hunag, "A novel combined spectral index for estimating the ratio of carotenoid to chlorophyll content to monitor crop physiological and phenological status", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 76, pp. 128-142, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.012>
- [41] V. Ibáñez, *Análisis y diseño de experimentos*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano Puno, 2009.