

Evaluación del comportamiento del índice de humedad y vegetación en un cultivo de café por medio de sensores remotos utilizando Vehículos Aéreos no Tripulados

Evaluation of moisture index and vegetation performance in a coffee crop by remote sensing using Unmanned Aerial Systems

Gerardo Enrique Mora-Pérez¹, Karolina Villagra-Mendoza², Sergio Arriola-Valverde³

Fecha de recepción: 29 de abril, 2024

Fecha de aprobación: 1 de agosto, 2024

Mora-Pérez, G, M, Villagra-Mendoza,K, Arriola-Valverde, S. Evaluación del comportamiento del índice de humedad y vegetación en un cultivo de café por medio de sensores remotos utilizando Vehículos Aéreos no Tripulados. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 63-76.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7133>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Estudiante: Ingeniería Agrícola
 enrique270402@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0007-6733-9315>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Prof.: Escuela Ingeniería Agrícola
 kvillagra@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0615>

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Prof.: Escuela Ingeniería Agrícola
 sarriola@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1155-3076>

Palabras clave

Índice de humedad; índice de vegetación; imágenes multiespectrales; manejo agronómico; sensores remotos; café.

Resumen

La producción de café se encuentra constantemente amenazada por las condiciones de mercado y por cambios extremos del clima, afectando el rendimiento. Tecnologías con sensores remotos son una herramienta que contribuye al manejo eficiente del cultivo. Este trabajo evaluó el comportamiento de índices de humedad y vegetación en una plantación de café, bajo los sistemas agronómicos de sol y sombra, por medio de sensores remotos. Se realizaron mediciones directas de humedad, altura y diámetro de copa por medio de muestreos en campo e indirectamente con sensor LiDAR e imágenes multiespectrales utilizando vehículos aéreos no tripulados. El análisis geoespacial, con resoluciones de 5, 10 y 20 cm/px, determinó que el diámetro de los cafetos entre modelos y datos observados tuvieron un menor error al aumentar la resolución, contrario a la altura de los cafetos cuya resolución de 10 cm/píxel condujo a un menor error con respecto a los datos observados. El análisis estadístico mostró diferencias significativas de los índices multiespectrales de vegetación NDVI y de agua NDWI entre los tratamientos de sol y sombra, con respecto al consumo hídrico. El NDVI presentó una correlación fuerte para el tratamiento de sol (proporcional) y de sombra (inversa), contrario al NDWI que mostró una fuerte correlación proporcional al consumo para el tratamiento de sombra e insignificativa para el tratamiento de sol. El sensor LiDAR es una herramienta útil para obtener información de altura y diámetro en cafetos, asimismo el uso de imágenes multiespectrales son una opción para estimar el consumo hídrico del cultivo.

Keywords

Moisture index; vegetation index; multispectral imaging; agronomic management; remote sensing; coffee.

Abstract

The coffee production sector constantly faces threats from market conditions and extreme weather changes, which affect its yield. Remote sensing technologies serve as a tool to contribute to efficient crop management. This study evaluated the behavior of moisture and vegetation indices in a coffee plantation under agronomic systems of sun and shade using remote sensors. Direct measurements of moisture, height, and canopy diameter were taken through field sampling and indirectly through LiDAR sensors and multispectral images using unmanned aerial vehicles. Geospatial analysis, at resolutions of 5, 10, and 20 cm/px, determined that the diameter of coffee trees had lower error rates with increasing resolution, contrary to tree height, where a resolution of 10 cm/pixel resulted in less error compared to observed data. Statistical analysis showed significant differences in vegetation indices NDVI and water NDWI between sun and shade treatments concerning water consumption. NDVI exhibited a strong correlation with water consumption in the sun treatment (proportional), while NDWI showed a strong proportional correlation with consumption in the shade treatment and an insignificant correlation in the sun treatment. LiDAR sensors proved to be a useful tool for obtaining height and diameter information in coffee trees, while multispectral images are an option for estimating crop water consumption.

Introducción

La producción cafetalera ha venido enfrentando cada vez más, retos y desafíos, producto de condiciones climatológicas y de mercado, lo que ha hecho necesario buscar diversas soluciones innovadoras y sostenibles para asegurar su rentabilidad. Fenómenos climáticos como el Niño-Oscilación del Sur (ENOS), han tenido un gran impacto en la agricultura [1]. Los costos de producción, así como las exigencias agronómicas y ambientales de la producción han obligado a buscar tecnologías que contribuyan a un manejo más eficiente de los recursos y a mejorar la toma de decisiones en la producción de café. Tecnologías y herramientas como la inteligencia artificial y la agricultura de precisión, han tomado más valor estratégico en la producción cafetalera. El Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE) ha promovido tecnologías que permitan aumentar la sostenibilidad y la producción de un café de alta calidad, y para esto, los sensores remotos, como cámaras multiespectrales y LiDAR, se perfilan como herramientas complementarias a las labores convencionales. Por ejemplo, el ICAFE ha utilizado sensores remotos para ubicar geoespacialmente tendencias en los sistemas de producción cafetalera con el fin de identificar opciones de sistemas agroforestales en zonas donde aún se mantiene el manejo convencional, según el ICAFE [2].

Los índices multiespectrales son calculados a partir de bandas que reflejan diferentes longitudes de onda, y son formados por operaciones algebraicas entre bandas. Dentro de sus aplicaciones, los índices multiespectrales permiten monitorear la actividad de la planta a partir de fotografías digitales multiespectrales, observar radiométricamente el comportamiento de la biomasa en el espectro electromagnético, analizar el vigor de la planta con la banda infrarroja, así como generar modelos para predecir variables físicas [3]. Existe una variedad de índices multiespectrales, los más utilizados en la agricultura son: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNVI), Índice Diferencial de Agua Normalizada (NDWI), Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE), Índice de diferencia Normalizada Red Edge (NDVI red Edge), e Índice de Diferencia de Vegetación (DVI), Índice de Vigor Relativo (RVI), Índice Global de Vegetación (GVI), Índice de Estrés Hídrico por Enfermedad (DSWI), entre otros, y sirven para estimar biomasa, vigorosidad de los cultivos, estrés hídrico, cobertura y volumen de producción [4].

En este estudio se pretende analizar el comportamiento de índices de vegetación y humedad aplicados en una parcela de café la cual posee tratamientos agronómicos de sol y sombra, para ello se utilizarán mediciones de campo y datos geoespaciales adquiridos por sensores activos y pasivos a bordo de un sistema UAS, y mediante un análisis estadístico se determinará la correlación existente en entre datos de campo contra datos geoespaciales.

Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en un cultivo de café de la variedad arábica (*Coffea arabica L.*), en Poás de Alajuela, bajo dos sistemas de manejo agronómico en dos parcelas de aproximadamente 5 ha, para sol y sombra (Figura 1). La plantación se encuentra a una altitud de 1250 m.s.n.m., con una precipitación media anual de 2380 mm y una temperatura promedio de 20.4 °C, [5]. El orden de los suelos corresponde al Andisol[6] y la textura del área de estudio es franco (47% arenas, 15% arcillas y 38% limo) según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [7].

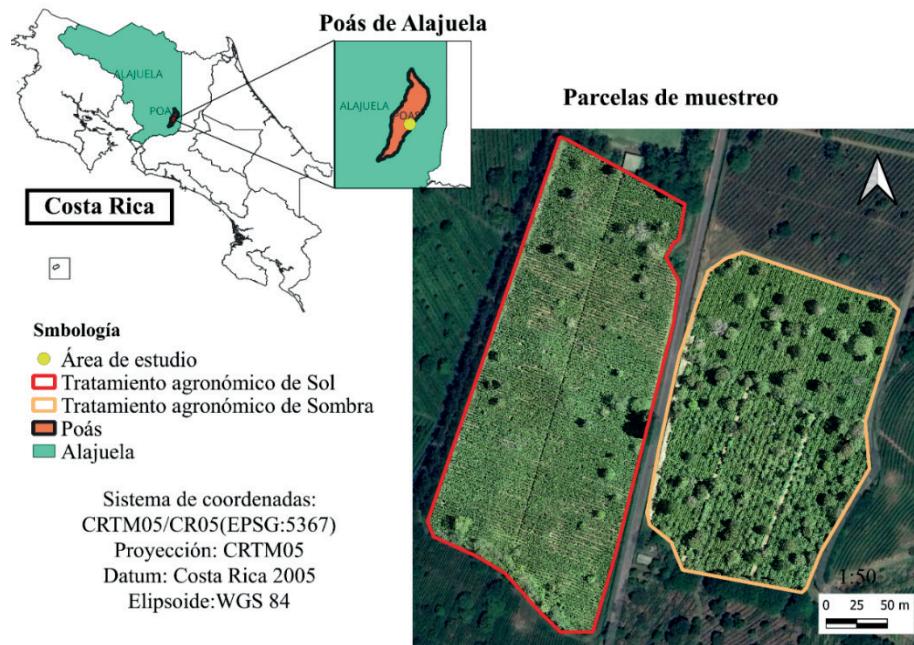


Figura 1. Ubicación del área de estudio en Poás de Alajuela e identificación de las parcelas de muestreo para sol y sombra.

Recolección de la información

Se realizaron dos campañas de muestreo para obtener datos de campo de humedad, altura, diámetro de copa de cafetos y también se realizó un muestreo con sensores remotos por medio de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) equipado con una cámara multiespectral y LiDAR. Se utilizó un sistema UAS, marca DJI modelo MATRICE 300 RTK con un sensor multiespectral Micasense RED EDGE-P y un sensor LiDAR DJI Zenmuse L1. Los vuelos fotogramétricos se realizaron a una altura de 80 m, con un traslape del 85% y mediante un procesamiento fotogramétrico los productos multiespectrales se proyectan con una resolución espacial de 6 cm/px. Para determinar la humedad del suelo, se tomaron muestras no disturbadas en cilindros de acero inoxidable con un volumen aproximado de 100 cm³, a 5 y 20 cm de profundidad pesándose inmediatamente después de la recolección con el objetivo de obtener el peso de suelo húmedo (Psh). Por cada punto de muestreo se seleccionaron 4 plantas de café en sol y 3 en sombra y se midió respectivamente el diámetro de copa y altura. La figura 2 muestra los puntos de muestreo seleccionados en sol y sombra.

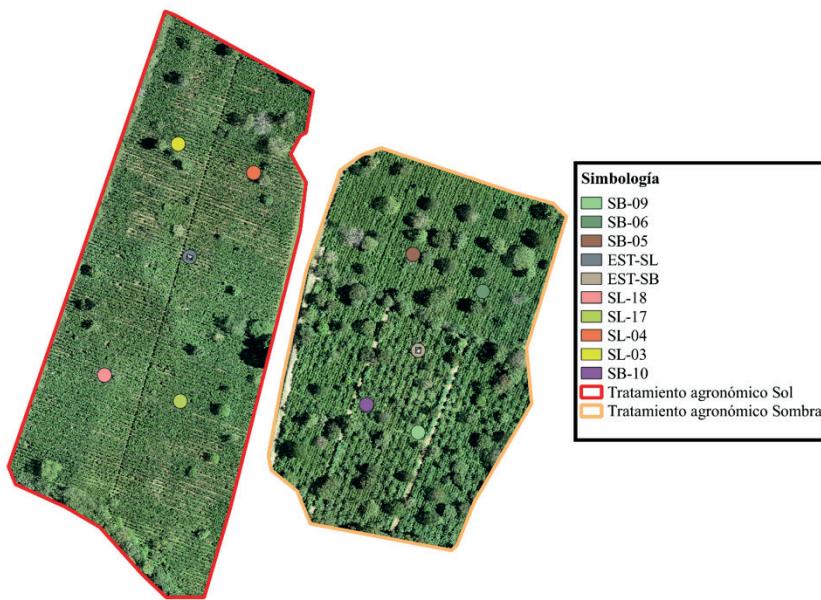


Figura 2. Puntos de muestreo del contenido de humedad y características del cultivo en cada uno de los tratamientos. Donde los tratamientos SB y SL corresponden a la zona de muestreo de sombra y sol respectivamente. EST- corresponde al punto ubicado cerca de la estación meteorológica en el tratamiento sol (SL) y de sombra (SB).

Procesamiento de muestras de suelo.

Las muestras no disturbadas, colectadas a 5 y 20 cm de profundidad, se secaron a una temperatura de 105°C para obtener el peso de suelo seco (Pss), contenido de humedad gravimétrica (HG) (Eq. 1), densidad aparente (Da) (Eq. 2), humedad volumétrica (HV) (Eq. 3), el agua consumida a 5 cm (HC5) (Eq. 4) y a 20 cm (HC20) (Eq. 5). La densidad aparente fue determinada a partir de la relación de la masa seca del suelo confinada en un volumen conocido. La humedad consumida se estimó mediante la diferencia de capacidad de campo y la humedad el suelo a la respectiva profundidad. El contenido de humedad a capacidad de campo se determinó a un potencial mátrico de 0.33 bar.

$$HG = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100 \quad (1)$$

$$Da = \frac{M}{V} \quad (2)$$

$$HV = HG \times Da \quad (3)$$

$$HC5 = CC - HV \quad (4)$$

$$HC20 = CC - HV \quad (5)$$

donde M es la masa suelo seco (g), V es el volumen total de la muestra (cm³), Psh es el peso de suelo húmedo (g), Pss es el peso de suelo seco (g), CC es el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo, HV es el contenido de humedad volumétrica a una profundidad de 5 y 20 cm respectivamente, HC es el porcentaje de consumo hídrico a su respectiva profundidad.

Procesamiento fotogramétrico.

Procesamiento de datos LiDAR.

A través de una nube de puntos, se generaron los modelos digitales del terreno (DTM) y de superficie (DSM), los cuales fueron utilizados para conformar un modelo de altura de dosel (CHM, por sus siglas en inglés Canopy Height Model). Los modelos se generaron a diferentes resoluciones espaciales de 5cm/px, 10 cm/px y 20 cm/px. A partir del modelo CHM, se trazaron perfiles longitudinales y transversales de los cafetos con el objetivo de determinar la altura y diámetro de los cafetos según las parcelas y puntos de muestreo seleccionados (ver figura 2).

El análisis fue estructurado en dos etapas donde la primera se estima la altura de los cafetos utilizando dos metodologías de medición 1) altura puntual donde se tomaron únicamente los picos de altura de las plantas ubicadas en un perfil longitudinal (línea roja en la figura 3A), e indicado con un punto morado en la gráfica de la figura 3A; 2) Altura Perfil, donde se calculó el promedio de todas las alturas identificadas en el perfil longitudinal indicado por las líneas de color según la resolución espacial (roja, amarilla o verde), como se observa en la gráfica de la figura 3A. El promedio se observa como la línea horizontal que cruza la gráfica. La segunda etapa determina el diámetro de copa y para ello se definieron perfiles transversales los cuales atraviesan las calles de manera perpendicular (línea roja de la imagen de la figura 3B). El diámetro del cafeto se midió de acuerdo con el ancho indicado con la línea azul, como se muestra en la gráfica de la figura 3B.

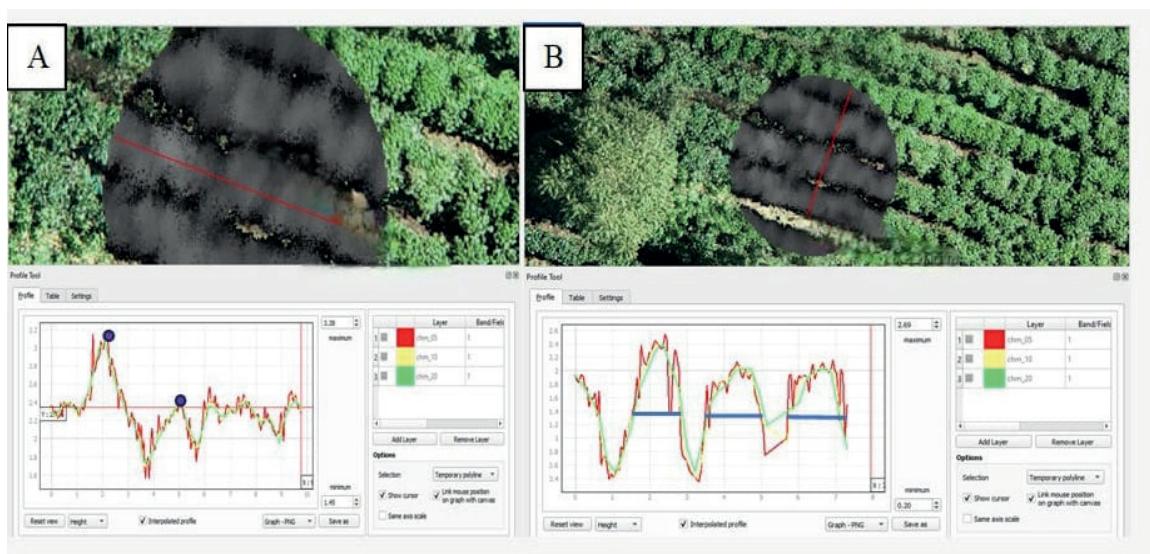


Figura 3. Perfil longitudinal y transversal para medir a) altura y b) diámetro de copa. Donde cada línea en el gráfico representa una resolución espacial, roja 5 cm/px, amarilla 10 cm/px, verde 20 cm/px.

Procesamiento multiespectrales.

Las imágenes capturadas en las bandas RED, GREEN, BLUE, NIR, RED EDGE y Pancromática (figura 4C). se cargaron en el software Pix4Dmapper con licencia educativa y fueron calibradas radiométricamente con los respectivos valores de reflectancia según el fabricante. Obteniendo un ortomosaico de todo el terreno en cada una de las bandas.

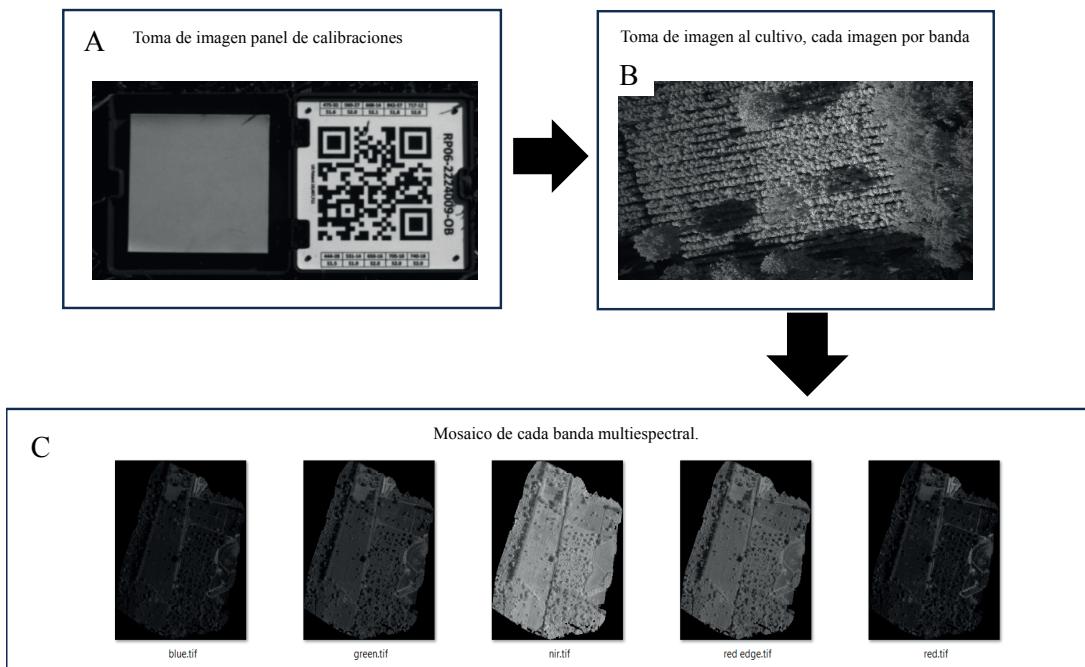


Figura 4. Procesamiento de imágenes multiespectrales, donde se observa a) el proceso de calibración radiométrica de las imágenes, b) imagen filtrada por banda, c) mosaico de la imagen con diferentes bandas generadas.

A partir de los ortomosaicos de bandas multiespectrales se calcularon los índices: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Eq. 6), Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) (Eq. 7), Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) (Eq. 8), Índice de Diferencia Normalizada Red Edge (NDVI red Edge) (Eq 9), e Índice de Diferencia de Vegetación (DVI) (Eq. 10). Los índices normalizados oscilan entre +1 y -1, siendo los valores próximos a +1 aquellos con mayor humedad o vigorosidad y los valores próximos a -1 los que poseen menor humedad o vigorosidad, [8].

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (6)$$

$$NDWI = \frac{(GREEN-NIR)}{(GREEN+NIR)} \quad (7)$$

$$NDRE = \frac{NIR-REDEdge}{NIR+REDEdge} \quad (8)$$

$$NDVI\ rededge = \frac{rededge-RED}{rededge+RED} \quad (9)$$

$$DVI = NIR - RED \quad (10)$$

Para analizar únicamente los cafetos se utilizó el índice DVI (figura 5A) esto con el fin de filtrar el suelo del cultivo, permitiendo únicamente analizar la vegetación. Se asignó un NO DATA (N/DA) a aquellos valores del DVI menor a 0.2 con ayuda de la calculadora ráster y de la ecuación 11:

$$((x > 0.20) * x) / ((x > 0.20) * 1 + (x \leq 0.20) * 0) \quad (11)$$

donde x son los valores iguales o inferiores que se desean volver N/DA.

En los diferentes puntos de muestreo se creó una capa vectorial de un círculo con un radio de 5 m abarcando una zona de estudio, esta capa vectorial también ayudó a disminuir el desfase entre un vuelo y otro debido a la ausencia de puntos de control. La capa vectorial sirvió como máscara para recortar la ortofoto y reducir el tiempo de procesamiento. El DVI se recortó con el círculo de las zonas de muestreo (figura 5B) y se convirtió de capa ráster a capa vectorial para posteriormente servir como una nueva capa máscara (figura 5C) y así extraer los datos de los índices únicamente sobre la vegetación. Esto se realizó para cada uno de los índices generados (NDVI, NDVI RED EDGE, NDRE y NDWI). A partir la capa máscara generada del índice DVI, se extrajo por cada zona de muestreo en un archivo vectorial permitiendo realizar una extracción por corte máscara en lotes generando 10 ráster de las zonas de muestreo con los datos del índice establecido como capa de entrada. Al calcular los cuatro índices, se generaron 40 ráster por vuelo. De cada ráster se extrajo el promedio, siendo el valor promedio del índice en esa zona de muestreo (figura 5D).

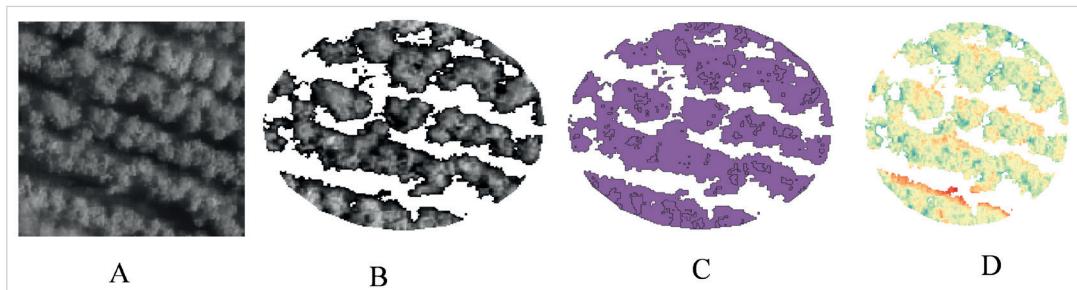


Figura 5. Recorte de solo cafetos en los índices usando el índice DVI donde a) es la zona de muestreo, b) es el buffer de las zonas de muestreo, c) es la capa máscara, d) valor del índice promedio.

Análisis estadístico de los índices de vegetación y humedad

Se realizó una matriz de correlación con los índices generados (NDRE NDVI RED EDGE, NDWI, NDVI) y las variables calculadas de forma directa (HV5, HC5, HV20, HC20) con el fin de analizar el comportamiento entre los índices y los datos de humedad recolectados para cada uno de los tratamientos agronómicos. Sumado se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y de significancia por medio de Tukey ($p < 0.05$) con el fin de analizar el comportamiento de las variables en los tratamientos sol y sombra. Se calcularon los errores estadísticos error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{ajustado}$) y la desviación estándar (σ) entre los datos obtenidos directa e indirectamente (ver ecuaciones 12, 13, 14 y 15). El criterio de análisis del $R^2_{ajustado}$ y R^2 , se basó en que los valores más altos indican una menor varianza del error, siendo 1 una predicción perfecta de la variable, un R^2 , $R^2_{ajustado} > 0.5$ se considera aceptable, un mientras un RMSE menor a la mitad de σ de los datos observados se considera indicativo de una buena precisión del modelo [9].

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sum(Y_j - \bar{Y})} \right)^2 \quad (12)$$

$$R^2_{ajustado} = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2} \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Y_j - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (15)$$

Donde Y_j es el dato medido en campo, \hat{Y}_j es el dato del sensor remoto LiDAR, n el número de observaciones, p es el número de variables independientes, \bar{Y} es la media de la variable Y , Y_i es el i ésimo dato, Y_{media} es el promedio aritmético.

Resultados y Discusión

La tabla 1 muestra los resultados de los errores RMSE, R^2 y $R^2_{ajustado}$, para las resoluciones de 5, 10 y 20 cm/px con respecto a los datos de altura de cafetos medidos directamente en campo. La metodología de altura pencial obtuvo mejores resultados con respecto a la metodología de altura perfil, con un RMSE máximo de 0.0787 m mientras que el RMSE máximo de altura pencial fue de 0.0297 m. Al comparar los resultados de altura de las tres resoluciones se observó un comportamiento proporcional entre la resolución espacial y el RMSE, al aumentar la resolución espacial el RMSE aumentó también, mientras que el $R^2_{ajustado}$ siguió un patrón aleatorio en el orden de 10 cm/px, 20 cm/px y 5 cm/px. Esto se puede deber al tamaño del píxel y características de la variable a medir. Por ejemplo, la altura de un cafeto la puede determinar una rama que vista desde arriba por el dron su área de visualización puede ser pequeña, así el tamaño del píxel juega un papel muy importante, ya que, en una resolución muy pequeña, como lo es 5 cm/px, los datos atípicos son más evidentes (figura 3 línea roja) al compararla con la resolución de 20 cm/px donde el píxel es más grande, es más factible suavizar los datos atípicos (figura 3 línea verde). Bajo este análisis la mejor resolución espacial para estimar altura de cafetos es de 10 cm/px. Sin embargo, dado que la desviación estándar de los datos de altura medidos de manera directa en campo dio como resultado 0.22, y al comprarlo con los valores RMSE que fueron menores a la mitad de la desviación estándar, se consideró las 3 resoluciones presentaron buen rendimiento.

Tabla 1. Análisis de confiabilidad basado en errores estadísticos de dos metodologías para el cálculo de alturas en cafetos, obtenidas en los diferentes modelos de vegetación para 10 puntos de muestreo.

Análisis de error estadístico	Altura en modelos de altura de vegetación					
	Resolución cm/píxel					
	5		10		20	
Altura puntual	Altura perfil	Altura puntual	Altura perfil	Altura puntual	Altura perfil	
R^2	0.8498	0.8382	0.8878	0.8383	0.8690	0.8554
R^2 ajustado	0.8310	0.8180	0.8738	0.8180	0.8526	0.8373
RMSE (m)	0.0146	0.0787	0.0250	0.0798	0.0297	0.0727

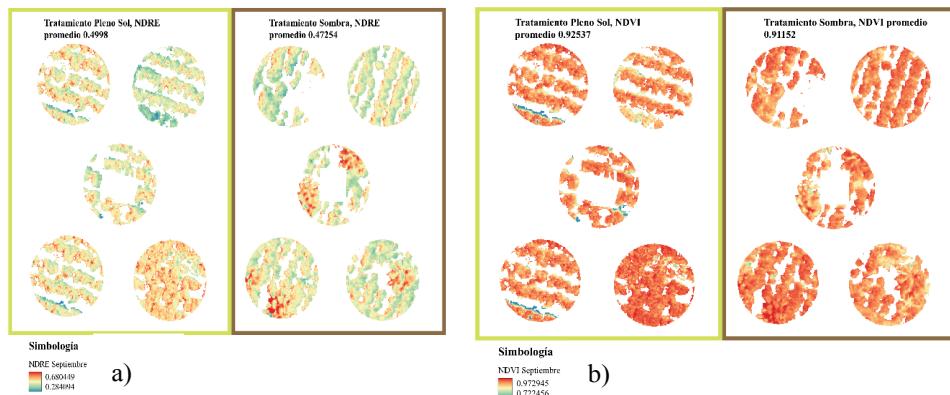
Para el análisis de los diámetros de copa en cafetos los datos mostrados en la tabla 2, en general, se ajustaron con mayor precisión. Con la resolución espacial de 5 cm/px se obtuvieron mejores resultados, siendo la más precisa, con un error RMSE menor. Siendo que a mayor resolución espacial el error respecto a la medición directa disminuyó. La desviación estándar de los datos de diámetro medidos fue de 0.24 m, siendo los RMSE calculados menores a la mitad de la desviación estándar, bajo este criterio, las 3 resoluciones presentaron buen rendimiento, [9].

Investigaciones han determinado un R^2 promedio de 0.67 en el uso del sensor LiDAR para medir altura y un R^2 promedio de 0.53 para el diámetro de copa en árboles para una resolución de 50 cm/px [10]. Según la investigación de Maesano et. al [11] reportó con una resolución de 20 cm/px un R^2 de 0.73, en las mediciones de altura de caña (*arundo donax*). Los resultados obtenidos por Islas et. al [12] fueron los siguientes, un R^2 ajustado de altura total y diámetro con LiDAR respecto con los datos medidos en campo de 0.916 y 0.841, respectivamente; y concluyó que una resolución de 5 m/px era más adecuada para medir altura y diámetro para estimar biomasa aérea de árboles. Al comparar las resoluciones de 20 cm/px — entre los resultados de Maesano et. al [11] con los obtenidos en este estudio en el cultivo de café — se observó un aumento considerable en el R^2 en nuestro estudio. A pesar de utilizar resoluciones iguales, el motivo de la mejora se puede atribuir al tipo de vegetación medida, sensores usados y metodologías de medición empleados.

Tabla 2. Análisis de confiabilidad basado en errores estadísticos de diámetros de cafetos obtenidos en los diferentes modelos de vegetación para 10 puntos de muestreo.

Análisis de error estadístico	Diámetro en modelos de altura de vegetación		
	Resolución cm/píxel		
	5	10	20
R^2	0.9610	0.9166	0.8763
R^2 ajustado	0.9561	0.9062	0.8608
RMSE (m)	0.0022	0.0059	0.0073

La figura 6 muestra los índices vegetativos NDRE y NDVI. Donde el NDRE muestra una vigorosidad media mientras que en el NDVI la vigorosidad es alta. Otros trabajos como el de [13] han calculado un valor promedio de NDVI de 0.93 para café pleno sol. El estudio desarrollado por Revelo et al [14] reportó una mejor respuesta del NDRE en la variabilidad del vigor, ya que este índice tiene su uso en cultivos en etapas avanzadas de desarrollo. Al analizar los valores obtenidos respecto a otros estudios se encontró diferencias en el índice NDRE y similitudes entre los resultados del NDVI, en el tratamiento pleno sol. Al analizar los resultados del NDRE en los diferentes proyectos se validó el uso de este índice para cultivos en etapas avanzadas.



La figura 7 muestra la matriz de correlación de los índices de vegetación y las variables de humedad del suelo, para cada tratamiento agronómico de sol y sombra, para dos observaciones. En el tratamiento de sol, la mayor correlación respecto a las variables de humedad y los diferentes índices fue entre el consumo hídrico a una profundidad de 5 cm (HC5) con el índice NDVI con una correlación positiva de 0.56, indicando que las plantas con un índice mayor fueron las que consumieron mayor cantidad de agua. Los otros índices de vegetación mostraron una menor correlación positiva, así como el NDWI que mostró una débil correlación negativa de -0.14 con posibilidades muy bajas de poder generar un modelo para estimar el consumo hídrico a partir del NDWI.

En el caso del tratamiento de sombra, se presentó una correlación moderada e inversamente proporcional entre los índices vegetativos y HC5 destacando los índices NDRE y NDVI, con una correlación negativa de -0.90 y de -0.57 respectivamente, indicando que en el tratamiento de sombra a mayor valor de índice vegetativo el consumo hídrico de la zona es menor, mientras que el índice NDWI posee una correlación de 0.79 con él HC5. Esto significa que a menor valor de NDWI, mayor consumo hídrico a 5 cm de profundidad.

Al comparar los resultados del tratamiento sol y sombra se observó que son inversos en los índices vegetativos. En el tratamiento de sol las correlaciones son positivas, en un rango entre 0.39 y 0.59 lo cual significa que a mayor vigor de la planta esta tiende a consumir mayor cantidad de agua. Esto se puede deber a que dentro del tratamiento sol el consumo de agua se puede ver afectado por la evaporación producida por los rayos solares y la transpiración de la planta, siendo menos los factores que participan en el consumo hídrico a diferencia del tratamiento sombra que posee otros cultivos que interfieren en los índices y generan condiciones diferentes al tratamiento sol. En condiciones naturales las demandas de agua debido a la evaporación se ven afectadas por las fluctuaciones climáticas y el tipo de textura, Necochea [15], el uso de cobertura puede variar significativamente la evaporación de agua en el suelo en comparación de un cultivo sin cobertura, Gomes et al [16]. Siendo la cobertura vegetal del tratamiento de sombra un factor importante.

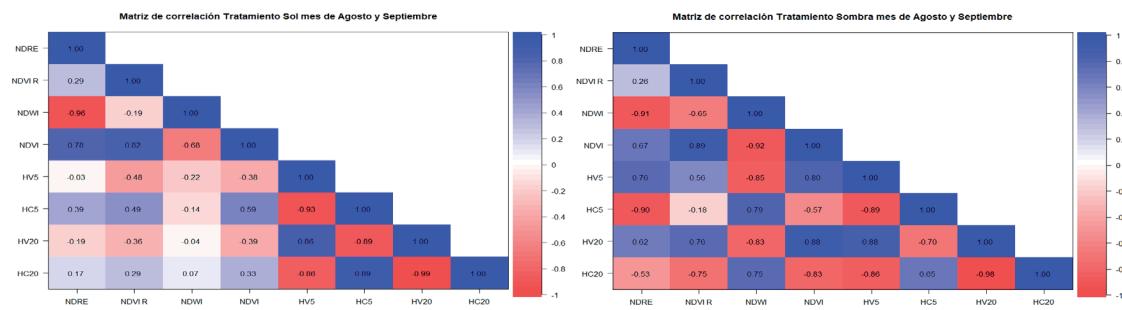


Figura 7. Matriz de correlación tratamiento de Sol y Sombra en los meses de agosto y septiembre del 2023. NDV R: NDVI REDEDGE, HV5: porcentaje de humedad volumétrica a una profundidad de 5 cm, HC5: consumo hídrico a 5cm de profundidad, HV20: porcentaje de humedad volumétrica a una profundidad de 20 cm, HC20: consumo hídrico a 20 cm de profundidad.

Le figura 8 muestra la tendencia del comportamiento de los índices NDVI y NDWI para los tratamientos de sol y sombra. Para ambos índices se observaron tendencias de comportamiento opuestas de acuerdo con la presencia o no de sombra. Bonnaire et al [17] no reportaron diferencias significativas en el espacio temporal entre 3 parcelas de café a pleno sol con diferente déficit de nitrógeno en el índice multiespectral del NDVI. El estudio realizado por Revelo et al [14], recomendó el índice NDRE para explicar variaciones de vigor en café e indicó la aptitud del índice NDVI para ser utilizado en la estimación del tipo de cobertura y para evaluar la variación temporal del tejido vegetal. Los estudios realizados por [14] y [17] concilian en la poca variabilidad del NDVI en un mismo uso agroforestal químico y recomendaron la utilización de este índice para determinar el tipo de cobertura como la tiene el uso agroforestal sombra.

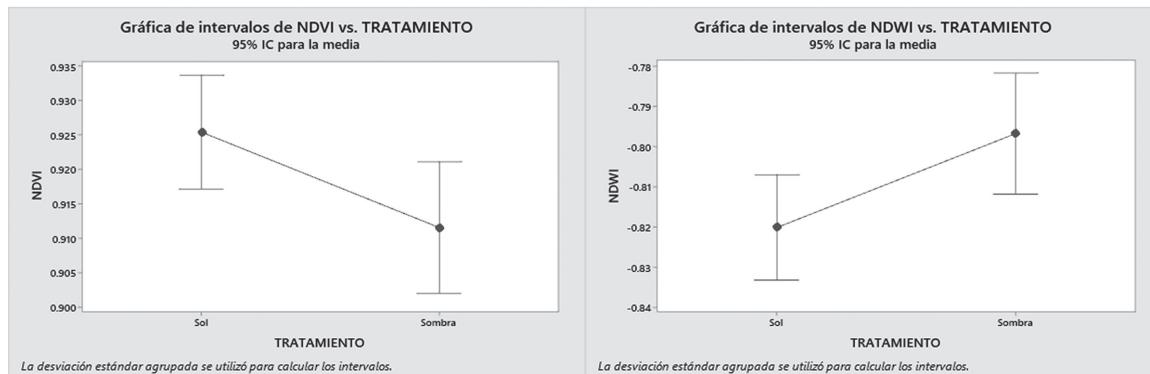


Figura 8. Análisis de Varianza de los índices NDVI y NDWI en los tratamientos de sol y sombra.

Conclusiones

Los datos obtenidos por medio de sensores LiDAR permiten estimar altura y diámetro de copa de los cafetos, siendo la resolución de 10 cm/píxel la mejor según el análisis de $R_{ajustado}$ y el RMSE, mientras que la mejor resolución espacial para estimar diámetro de copa en cafetos fue de 5 cm/px, sin embargo las tres resoluciones espaciales tanto para altura y diámetro de copa en cafeto obtuvieron resultados eficientes según el criterio del RMSE y los coeficientes de determinación.

Los índices NDVI y NDWI se comportaron inversamente en los tratamientos agronómicos de sol y sombra. El NDVI en el tratamiento de sombra explicó de forma inversa el consumo hídrico, es decir, en la zona de sombra con mayor valor del índice NDVI se dio un menor consumo hídrico, mientras que en el tratamiento de sol el NDWI explicó mejor la vigorosidad del cultivo y se correlacionó mejor con el aumento en el consumo hídrico. De acuerdo con los resultados, el índice NDVI se puede considerar como un indicador para estimar el consumo hídrico tanto del cultivo de café como la vegetación utilizada para el tratamiento de sombra, mientras que el tipo de uso agroforestal puede influir en el comportamiento del índice NDWI y el consumo hídrico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento para realizar este estudio y al proyecto Dinámica de la Captura de Carbono en Agroecosistemas cafetales innovadores (DiC²AFE) financiado con el Fondo Especial para la Educación Superior (FEES) por permitir realizar esta investigación.

Referencias

- [1] C. Brenes, “El fenómeno de El Niño y la agricultura latinoamericana”, San José, Costa Rica, 2014. Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/2992>
- [2] Instituto del Café de Costa Rica (Icafe), “Actualización Área Cafetalera 2017 - 2018”, Heredia, jun. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/maps/gxPZgBn8ZXB2>.
- [3] E. F. Avila- Vélez y B. Royero Benavides, “Application of vegetable indices in coffee (*Coffea arabica* L.)”, *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, vol. 24, núm. 2, dic. 2021, doi: 10.31910/rudca.v24. n2.2021.1584.
- [4] Piedad A, D. Hernández, H. Lárraga, y E. Zacarías, “Teledetección en la Agricultura de Precisión: Estado del Arte en los Índices de Vegetación”, *TECTZAPIC*, vol. 6, pp. 46–58, 2020, Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8504957>
- [5] C. Chinchilla-Soto, A. M. Durán-Quesada, M. Monge-Muñoz, y M. V. Gutiérrez-Soto, “Quantifying the annual cycle of water use efficiency, energy and CO₂ fluxes using micrometeorological and physiological techniques for a coffee field in costa rica”, *Forests*, vol. 12, núm. 7, jul. 2021, doi: 10.3390/f12070889.
- [6] E. Ortis, “Atlas de Costa Rica 2014”, 2014. Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2238/6749>
- [7] FAO and IUSS, “Base referencial mundial del recurso suelo 2014”, Roma, Italia, 2016. Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org>
- [8] M. Zakir, “GIS and RS Based Spatio-Temporal Analysis of Soil Moisture/Water Content Variation in Southern Irrigated Part of Sindh, Pakistan”, *Journal of Remote Sensing & GIS*, vol. 07, núm. 04, sep. 2018, doi: 10.4172/2469-4134.1000250.
- [9] G. Golmohammadi, S. Prasher, A. Madani, y R. Rudra, “Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT”, *Hydrology*, vol. 1, núm. 1, pp. 20–39, 2014, doi: 10.3390/hydrology1010020.
- [10] M. Coromines Munt, E. Blanco Casellas, y A. Ruiz García, “Aplicación de la Tecnología LIDAR al Estudio de la Cobertura Vegetal”, *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, vol. 19, pp. 71–77, 2005, Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2981951>
- [11] M. Maesano *et al.*, “UAV-based LiDAR for high-throughput determination of plant height and above-ground biomass of the bioenergy grass arundo donax”, *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, núm. 20, pp. 1–20, oct. 2020, doi: 10.3390/rs12203464.
- [12] F. Islas Gutiérrez *et al.*, “Ecuación Alométrica para Estimar Biomasa Aérea de Árboles de *Pinus harwegii* a partir de Datos LIDAR”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 47, núm. 1, p. 70, mar. 2024, doi: 10.35196/rfm.2024.1.70.

- [13] E. F. Avila-Vélez y B. Royero-Benavides, "Application of vegetable indices in coffee (*Coffea arabica* L.)", *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgación Científica*, vol. 24, núm. 2, dic. 2021, doi: 10.31910/rudca.v24.n2.2021.1584.
- [14] D. Revelo, J. Mejía, B. Montoya, y J. Hoyos, "Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*)", Colombia, ago. 2020. doi: <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>.
- [15] J. Necochea, "Efecto del Biochar en la Curva de Retención de Agua de Materiales de Revale de Cobre", Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2021. doi: 10.7764/tesisUC/ING/62196.
- [16] J. Gomes, J. Pacheco, R. Carlesso, C. Trois, y A. Knies, "Perdidas de agua por evaporación en maíz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta. I. resultados experimentales", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20, pp. 60–64, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93222228012>
- [17] L. Bonnaire, B. Bonilla, y F. Obando, "Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo", *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, vol. 22, núm. 1, abr. 2021, doi: 10.21930/RCTA.VOL22_NUM1_ART:1578.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.