

Comparación de herramientas tecnológicas para determinar índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis*, Guanacaste, Costa Rica

Comparison of technological tools to determine vegetation indices in *Tectona grandis* plantations, Guanacaste, Costa Rica

Arleth V. Porras-Granados, M.Sc.¹, Casia Soto-Montoya, M. Sc.², Dagoberto Arias-Aguilar, Ph.D.³, Heileen Aguilar-Arias, Ing.⁴ y David Romero-Badilla, Ing.⁵

^{1,2 y 3}Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, avporras@gmail.com, csoto@itcr.ac.cr y darias@itcr.ac.cr

^{4 y 5}Laboratorio PRIAS-CeNAT, Costa Rica, haguilar@cenat.ac.cr, darbafe@gmail.com

Resumen– Para el adecuado manejo del recurso forestal es necesario disponer de información confiable y a bajo costo sobre variables del rodal, en este sentido es de especial importancia el uso de nuevas y adecuadas herramientas. Con el desarrollo de las tecnologías satelitales, espectroradiómetros y más recientemente los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) con cámaras especializadas se pueden estimar y utilizar distintos parámetros, entre estos los índices de vegetación, como el NDVI y el GNDVI, como herramientas útiles en el monitoreo de la vegetación, especialmente en zonas de difícil acceso o de grandes extensiones. Con el propósito de comparar las diferentes tecnologías para obtener los índices NDVI y GNDVI, que incluyen un espectroradiómetro de campo UniSpec SC, imágenes satelitales Sentinel-2 y productos fotogramétricos del RPAS Phantom 4 multispectral, se llevó a cabo un estudio en una plantación de *Tectona grandis* en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, mediante un diseño experimental completamente aleatorio con 20 parcelas de observación y localizadas en el terreno mediante una estación total GNSS. El NDVI no presentó diferencias entre los valores obtenidos a partir de imágenes satelitales y los obtenidos en campo; sin embargo, sí mostró diferencias entre los datos de campo y los valores obtenidos con el RPAS, siendo estos últimos los valores más bajos. El GNDVI mostró diferencias significativas entre los diferentes métodos estudiados, siendo los valores obtenidos con los RPAS los más bajos y los obtenidos con la imagen satelital los más altos. Este estudio recomienda el uso de las imágenes Sentinel-2 para la estimación de los índices de vegetación y se brindan recomendaciones sobre los aspectos a mejorar con el uso de los RPAS.

Palabras clave– Sentinel-2, RPAS, espectroradiómetro.

Abstract– For the proper management of forest resources, it is necessary to have reliable and low-cost information on stand variables; in this sense, the use of new and adequate tools is of special importance. With the development of satellite technologies, spectroradiometers and more recently Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) with specialized cameras, different parameters can be estimated and used, including vegetation indices, such as NDVI and GNDVI, as useful tools. in the monitoring of the vegetation, especially in areas of difficult access or large extensions. With the

purpose of comparing the different technologies to obtain the NDVI and GNDVI indices, which include a UniSpec SC field spectroradiometer, Sentinel-2 satellite images and photogrammetric products of the multispectral RPAS Phantom 4, a study was carried out in a *Tectona grandis* plantation in the province of Guanacaste, Costa Rica, using a completely randomized experimental design with 20 observation plots and located on the ground using a GNSS total station. The NDVI did not present differences between the values obtained from satellite images and those obtained in the field; however, it did show differences between the field data and the values obtained with the RPAS, the latter being the lowest values. The GNDVI showed significant differences between the different methods studied, being the values obtained with the RPAS the lowest and those obtained with the satellite image the highest. The use of Sentinel-2 images is recommended for the estimation of vegetation indices and recommendations are provided on aspects to improve with the use of RPAS.

Keywords– Sentinel-2, RPAS, spectroradiometer.

I. INTRODUCCIÓN

La adecuada valoración de la vegetación como recurso natural estratégico, requiere de un conocimiento exhaustivo y de disponer de las herramientas adecuadas para su monitoreo [1]. Se debe tomar en cuenta que, la respuesta de la vegetación es un importante indicador para evaluar diferentes procesos biofísicos y fisiológicos en los ecosistemas; por ejemplo, los fenómenos relacionados a la pérdida de biodiversidad, desertificación, relación entre la vegetación y erosión del suelo e interacción vegetación-clima [2].

Los índices de vegetación son una herramienta muy útil y versátil en el monitoreo del estado de la vegetación [3-4]; en específico, en zonas de difícil acceso o de grandes extensiones [5]. De forma genérica, se podría definir un índice de vegetación como un parámetro calculado a partir de la reflectividad de estructuras de la planta, a distintas longitudes de onda ya definidas en la literatura [6-7].

De acuerdo con [8], uno de los índices más utilizados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI,

por sus siglas en inglés), que se destaca por su capacidad para evaluar el estado de la cobertura vegetal, estimar propiedades de la vegetación y productividad en un ecosistema; así como, indicar estrés vegetativo. Asimismo, existen otros índices como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI, por sus siglas en inglés), el cual, es una variante del NDVI que utiliza la longitud de onda de la banda verde en lugar de la banda del rojo. Ambos índices han sido ampliamente utilizados como indicadores comunes para evaluar la salud, densidad de la vegetación en un área determinada, estado de la productividad entre otros [9-14].

Existen distintas técnicas destructivas y no destructivas utilizadas para la obtención de los índices de vegetación, como lo son las aplicaciones por medio de la teledetección y la instrumentación *in situ*. En este contexto, la teledetección ha sido determinante en la evaluación de las fluctuaciones en la distribución, productividad y estructura de los ecosistemas [15], destacando su aplicación en las dinámicas del cambio de uso del suelo y coberturas vegetales [16]. Las imágenes generadas mediante la tecnología de espectroradiómetros, cámaras, drones y satélites brindan no solamente mayor cantidad de observaciones sobre las coberturas del suelo; sino que también, permiten la detección de características de la vegetación que no pueden detectarse a simple vista [17]. Aunque se debe tener en cuenta, que existen limitaciones, en su mayoría en el caso de los sensores disponibles de manera gratuita, con restricciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles [18].

Por otro lado, los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) se han utilizado en los últimos años como una nueva plataforma versátil para la adquisición de imágenes remotas para una multitud de aplicaciones en cartografía, termografía y agricultura de precisión [19]. Algunas desventajas de los productos fotogramétricos obtenidos de los RPAS respecto a las imágenes satelitales son: una menor resolución espectral y una menor área de cobertura por unidad de superficie [18]. Por otro lado, de acuerdo con [20], los RPAS aportan información precisa y detallada, con una alta resolución espacial, lo que los posiciona como una herramienta de gran utilidad en el sector forestal. Los efectos del mercado asociados a la oferta y demanda de estos equipos han hecho que sean más accesibles, e inclusive se ha llegado a considerar que se pueden adquirir a un bajo costo en comparación con otras tecnologías, causando así un ahorro en mano de obra, dinero y tiempo. Según [21], los costos de los RPAS varían según los modelos de hélices, las diferentes capacidades de carga; así como, por las posibilidades de instalación de sensores, cámaras y otros componentes. Sin embargo, en temas de costos, aunque bien pueden considerarse más baratos que algunas otras tecnologías, este no es el caso al compararlo con imágenes satelitales de libre acceso, como las opciones de uso de datos de la familia de sensores Sentinel.

Por otro lado, dentro de las técnicas que permiten estudiar el comportamiento de la vegetación, se encuentra la

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

espectroradiometría, a través de la utilización de espectroradiómetros de campo, que pueden medir directamente valores de reflectancia de la superficie de la hoja, permitiendo obtener información más detallada y multipropósito [22]. Sin embargo, al comparar su aplicabilidad y rentabilidad con las imágenes satelitales, a nivel del dosel se requiere de un mayor esfuerzo físico y logística, mano de obra calificada y la disponibilidad de los equipos portátiles, lo que se traduce en un alza considerable en los costos de utilización.

Debido a las diferentes ventajas y desventajas entre las distintas tecnologías mencionadas, y la importancia de los índices de vegetación para el monitoreo y la toma de decisiones sobre el manejo de plantaciones forestales; este estudio busca comparar los valores de índices NDVI y GNDVI generados mediante el uso de diferentes tecnologías multi e hiperespectrales como lo son los datos multiespectrales disponibles de las imágenes satelitales del sensor Sentinel-2, los productos fotogramétricos obtenidos de los RPAS con cámara multiespectral y las firmas hiperespectrales obtenidas con un espectroradiómetro de campo. Para ello se seleccionaron plantaciones de *Tectona grandis* ubicadas en Guanacaste, Costa Rica; con la finalidad de facilitar este tipo de análisis al sector forestal para la toma de decisiones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio y descripción de las plantaciones.

El estudio se realizó en la finca Palo Arco (1481 ha), propiedad de la empresa forestal Panamerican Woods, ubicada en Nandayure, Guanacaste, Costa Rica (-85.268, 9.798, -85.209, 9.879, 11 m.s.n.m.). La misma se encontraba cubierta por plantaciones de *Tectona grandis* con edades de 1 hasta 16 años y una red de 660 parcelas permanentes establecidas por la empresa. Se localiza dentro de la zona de vida Bosque Tropical muy Húmedo [23], con una temperatura media anual de 27°C y una precipitación media anual de 1888 mm [24].

B. Diseño experimental.

Se utilizó un diseño completamente aleatorio, con un total de 20 unidades de observación de 35 disponibles, que en este caso fueron parcelas cuadradas de 0,36 ha con un tamaño de 60 x 60 metros. Para la ubicación más precisa de las parcelas, éstas fueron localizadas mediante un equipo móvil GNSS multicanal en campo. El tamaño de muestra para un error de muestreo máximo del 10%.

La variable dependiente bajo estudio correspondió a los índices de vegetación NDVI y GNDVI, mientras que los tratamientos experimentales utilizados fueron distintos instrumentos y sensores de obtención de los datos multi e hiperespectrales necesarios para calcular los índices de vegetación. Los tratamientos y su codificación se muestran en la tabla VI.

TABLA VI
 CODIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

Código de tratamiento	Tratamiento
T1	Espectroradiómetro (UniSpec SC, testigo)
T2	Imagen satelital (Sentinel-2 nivel 2A)
T3	Vehículo aéreo no tripulado (P4 Multiespectral – DJI)

C. Adquisición de datos.

La adquisición de los datos fue realizada en los meses de noviembre y diciembre del año 2021. Debido a la logística en la adquisición de los datos se presentaron algunas diferencias en sus periodos de medición, en la siguiente tabla se muestra el cronograma de mediciones.

TABLA VII
CODIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

Parcelas	Tratamiento	Fecha de adquisición	Hora de medición
21 y 22	RPAS	09 de noviembre del 2021	15:50 a 16:55
	Sentinel-2	09 de noviembre del 2021	16:05
	UniSpec	24 de noviembre del 2021	11:01 a 13:12
30, 31, 32, 33, 34 y 35	RPAS	10 de noviembre del 2021	8:31 a 11:33
	Sentinel-2	09 de noviembre del 2021	16:05
	UniSpec	16 y 19 de noviembre del 2021	11:37 a 17:53
5, 7, 8, 9, 26 y 27	RPAS	10 de noviembre del 2021	13:27 a 16:45
	Sentinel-2	09 de noviembre del 2021	16:05
	UniSpec	18 y 23 de noviembre del 2021	11:48 a 16:35
4, 6, 10 y 13	RPAS	02 de diciembre del 2021	14:21 a 16:18
	Sentinel-2	04 de diciembre del 2021	16:06
	UniSpec	23 y 25 de noviembre del 2021	11:33 a 17:43
1 y 3	RPAS	03 de diciembre del 2021	08:18
	Sentinel-2	04 de diciembre del 2021	16:06
	UniSpec	17 de noviembre del 2021	12:20 a 13:41

Debido a los periodos de medición, se utilizaron dos imágenes satelitales Sentinel-2 nivel 2A, las cuales de acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) son imágenes “corregidas atmosféricamente e incluye la corrección de la dispersión de las moléculas de aire, de los efectos de absorción y dispersión de los gases atmosféricos, en particular el ozono, el oxígeno y el vapor de agua y la corrección de la absorción y la dispersión debida a aerosoles. Dichas imágenes fueron las siguientes: S2B_MSIL2A_20211109T160459_N0301_R097_T16PFR_20211109T204306.SAFE y la S2A_MSIL2A_20211204T160641_N0301_R097_T16PFR_20211204T203122.SAFE. Fueron descargadas de manera gratuita de la plataforma de la Agencia Espacial Europea.

D. Obtención de ortomosaicos con imágenes del RPAS.

Los vuelos fotogramétricos se realizaron con un RPAS DJI Phantom 4 Multispectral previamente calibrado según indicaciones del manual de usuario. Se realizaron vuelos programados para cubrir los diferentes lotes del área de estudio en donde se encontraban las parcelas de muestreo. Dichos vuelos fueron elaborados con la aplicación DJI GS Pro, con la siguiente configuración: 70 m de altura de vuelo, 75% de traslape vertical, 65% de traslape horizontal.

El procesamiento de las imágenes de los vuelos para la obtención de ortomosaicos fue realizado en estaciones de alto rendimiento con un sistema operativo Windows 64 bit, 32 GB de memoria RAM, un procesador Intel® Core™ i7-10700K, con dos tarjetas gráficas GeForce RTX SUPER, y como software de fotogrametría se empleó Agisoft Metashape 1.8.1. Para un procesamiento semi-automatizado se desarrolló un flujo por lotes (batch process), el cual consistía en los

siguientes procesos: alineación de fotografías, optimización de alineamiento, creación de nube densa de puntos, creación del modelo de elevación digital y generación del ortomosaico. La calibración de reflectancia en las fotografías se realizó con el sensor de sol integrado en la aeronave. Como resultado se obtuvieron mosaicos multispectrales con cinco bandas a saber: banda azul (1), banda verde (2), banda roja (3), banda Red Edge (4) y banda infrarrojo cercano (5).

E. Toma de datos con sensor in situ.

Se seleccionaron los tres árboles más representativos de cada parcela, tomando en cuenta el diámetro medio de la parcela, se procedió a seleccionar de cada uno de estos árboles, cinco hojas representativas de la copa, siguiendo la metodología de Ramírez-Mesén (2019), a las cuales se les midió y promedió el valor de reflectancia a través de las firmas espectrales. Para esto se utilizó el espectroradiómetro UniSpec SC el cual mide en una longitud de onda de 310 a 1100 nm (VIS/NIR), y fue previamente calibrado según el manual de usuario. Para la selección de las hojas de cada árbol se siguió la metodología propuesta por [25] las hojas que se utilizaron fueron debidamente seleccionadas para que no presentaran imperfecciones y fueron tomadas de la parte superior de la copa expuesta al sol, se recolectaron de la porción distal o media de la rama y fueron medidas de manera estandarizada inmediatamente al ser cortadas.

F. Obtención de índices de vegetación.

Para los ortomosaicos generados de las fotografías aéreas del RPAS y la imagen satelital, los índices de vegetación se obtuvieron mediante la calculadora ráster del programa QGIS 3.16.16, utilizando las siguientes ecuaciones.

TABLA VII
CODIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
NDVI	$(\text{NIR-Red})/(\text{NIR+Red})$ (1)	[26]
GNDVI	$(\text{NIR-Verde})/(\text{NIR+Verde})$ (2)	[27]

Posterior a esto se extrajo el promedio del índice para cada parcela, utilizando una capa vectorial de las parcelas en estudio y la herramienta “Estadísticas de zona del programa QGIS 3.16.16”.

Para calcular los índices de vegetación medidos con el UniSpec SC (2702 archivos), se creó un código en el lenguaje de programación Python. De las 247 filas de cada archivo, correspondientes a la medida de la reflectancia en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, se programó calcular los índices NDVI y GNDVI, con las bandas más cercanas en longitud a las bandas de Sentinel-2.

Debido al tamaño de resolución de la imagen satelital y el RPAS utilizado, el número de muestras utilizadas para el promedio de los índices de vegetación fue de un aproximado de 36 con la imagen satelital Sentinel-2 y un aproximado de 4 000 000 para el RPAS.

G. Análisis estadístico.

Se inició con una exploración general de los datos para detectar alguna inconsistencia, seguido por la verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas, debido a que los datos no poseían una distribución normal y

no se logró una transformación satisfactoria de la variable, se procedió a realizar un análisis no paramétrico mediante la prueba de Kruskal Wallis con una comparación por pares para determinar las diferencias estadísticas entre los índices de vegetación obtenidos en cada tratamiento, el análisis fue realizado bajo un nivel de significancia de 0,05 y se obtuvieron con el programa estadístico Infostat®.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico mediante gráficos BoxPlot que se observa en la figura 4, indica que para el NDVI los valores entre el T1 y T2 son muy similares entre sí; sin embargo, el T3 es completamente distinto, tanto en distribución y ampliación del rango de valores como en variación de los datos.

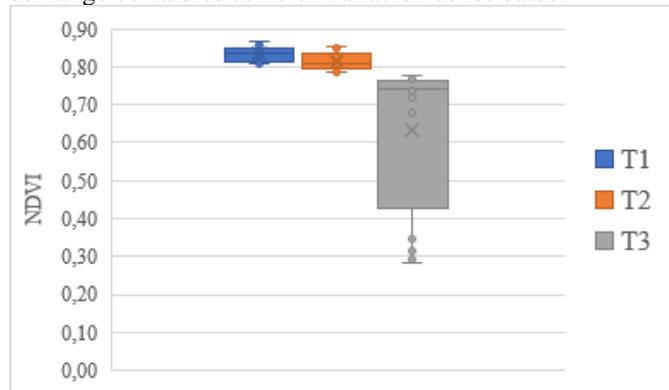


Fig. 4 Box plot de valores de NDVI por tratamiento.

Por otra parte, de acuerdo con la figura 5, para el GNDVI, las diferencias entre los tratamientos aumentan, aunque aún se sigue manteniendo el mismo comportamiento en donde el T3 presenta una mayor ampliación del rango de valores y variación de los datos.

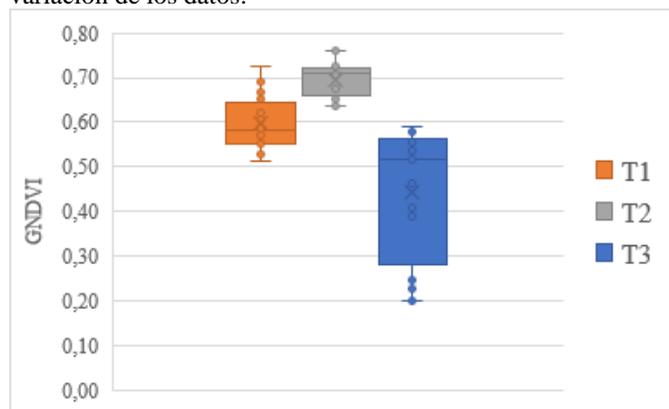


Fig. 5 Box plot de valores de GNDVI por tratamiento.

Los valores del NDVI que se presentan en la tabla IX, se destacan por concordar con lo observado en la figura 4, en donde los valores de NDVI para los tratamientos T1 y T2 son cercanos, teniendo así T1 los valores más altos y también, se observa que los valores de T3 se encuentran por debajo de T1 y T2, ostentando estos una amplitud más pronunciada; ya que, para T1 los valores máximos y mínimos corresponden a 0,87 y 0,81 (amplitud de 6 unidades), mientras que para el T2 son de

0,85 y 0,79 (6 unidades) y para el T3 son de 0,77 y 0,28 (49 unidades) correspondientemente.

TABLA IX
RESULTADOS DE ÍNDICES OBTENIDOS (20 PARCELAS)

Parcela	UniSpec		Imagen Satelital		Dron	
	NDVI	GNDVI	NDVI	GNDVI	NDVI	GNDVI
1	0,87	0,72	0,80	0,72	0,74	0,56
3	0,81	0,53	0,81	0,71	0,74	0,55
4	0,84	0,63	0,80	0,68	0,69	0,39
5	0,82	0,55	0,79	0,67	0,28	0,20
6	0,81	0,51	0,79	0,66	0,68	0,41
7	0,81	0,54	0,81	0,67	0,35	0,23
8	0,81	0,57	0,79	0,64	0,29	0,20
9	0,82	0,54	0,79	0,65	0,31	0,21
10	0,81	0,55	0,83	0,71	0,78	0,56
13	0,86	0,68	0,80	0,65	0,72	0,46
21	0,85	0,59	0,79	0,64	0,68	0,42
22	0,83	0,57	0,82	0,68	0,74	0,52
26	0,84	0,62	0,81	0,71	0,30	0,25
27	0,83	0,60	0,82	0,72	0,76	0,52
30	0,84	0,61	0,84	0,72	0,77	0,56
31	0,84	0,55	0,85	0,76	0,75	0,57
32	0,85	0,65	0,85	0,74	0,77	0,56
33	0,84	0,58	0,85	0,76	0,77	0,59
34	0,85	0,67	0,83	0,73	0,77	0,58
35	0,86	0,69	0,83	0,72	0,74	0,54

Por otra parte, los valores de GNDVI presentados en la tabla 9, recalcan que los valores más altos de este índice, los posee el T2 con un valor de 0,76, seguido del T1 con 0,72 y por último el T3 con 0,59. Situación que también se corrobora en la figura 5.

La prueba de Kruskal Wallis indicó que existe al menos un tratamiento diferente en ambos índices de vegetación estudiados, lo que se puede observar en la tabla 10, en donde se muestra que, para ambos índices de vegetación, el p-valor es inferior al nivel de significancia establecido (0,05).

TABLA X
RESULTADOS DE ANDEVA Y VALORES PROMEDIO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN ESTUDIADOS POR TRATAMIENTO, CON SUS RESPECTIVAS DIFERENCIAS

Índice	p-valor	Tratamiento	Promedio del índice*
NDVI	<0,0001	T1	0,83 ^A
		T2	0,82 ^A
		T3	0,63 ^B
GNDVI	<0,0001	T1	0,60 ^A
		T2	0,70 ^B
		T3	0,44 ^C

*Las letras que se ubican al lado del valor medio de los índices de vegetación indican la diferencia estadística significativa entre tratamientos, tratamientos con letras iguales no poseen diferencias entre sí y viceversa.

El análisis estadístico evidenció las diferencias encontradas por tratamientos para cada uno de los índices estudiados, acentuando lo mostrado en las figuras 4 y 5, así como en el Tabla IX. Para el NDVI no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos T1 y T2, pero si, entre estos y el T3, mostrando así los valores promedios más altos en el T1 y los más bajos en el T3, los valores obtenidos para este índice mediante las tecnología del

espectroradiómetro UniSpec e imagen satelital Sentinel-2 fueron de 0,83 y 0,82 respectivamente, cercanos a los reportados para sensores remotos, en coberturas boscosas sin detallar, más específicamente para Sentinel por los autores [28], los cuales eran de aproximadamente de 0,8.

Por otra parte, para el GNDVI se presentaron diferencias estadísticas entre los tres tratamientos, reportando los valores más altos en el T2 y los más bajos T3. El valor obtenido para el GNDVI mediante la tecnología de RPAS fue de 0,44 cercano a los reportados con esta misma tecnología para cultivos de arroz, los cuales oscilan entre 0,2 y 0,45 [29]. y para el cultivo de café (*Coffea arabica*) en donde un grupo de datos oscilaron entre 0 y 0,4 [30].

Los valores bajos obtenidos mediante el RPAS, en ambos índices pueden deberse a problemas presentados durante el procesamiento de la información por la falta de más puntos de control o bien, aspectos de calibración de la cámara, previo al sobrevuelo. Los autores [31], recomiendan una calibración previa y además mencionan la importancia de la utilización de puntos de control y calibración mediante una estación GNSS [32-33] para así no caer en la falta de aplicación de los principios técnicos adecuados para obtener distancias de las fotografías tomadas y evitar problemas con el procesamiento futuro.

Las diferencias encontradas entre los valores de NDVI y GNDVI, obtenidos del RPAS y de la imagen satelital, pueden deberse también a la exactitud y precisión de las tecnologías utilizadas, ya que cada una posee una resolución distinta, y por ende un número de muestras distintas para el cálculo de los promedios de los índices de vegetación. Para el caso del RPAS la resolución espacial fue de 3 centímetros, mientras que para la imagen satelital fue de 10 metros, lo que en parcelas de 3600 m² equivalen a un n=36 para la imagen satelital, mientras que para el RPAS corresponde a un n= 4 000 000. Lo mencionado se puede apreciar claramente en la figura 6.

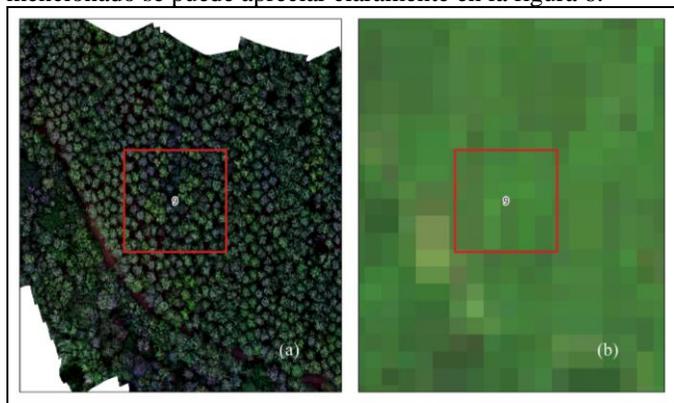


Fig. 6 Diferencias visuales de un ortomosaico RGB obtenido mediante un RPAS (a) y uno obtenido a través de una imagen satelital Sentinel-2 (b).

Los valores bajos en ambos índices de vegetación obtenidos mediante el uso del RPAS, además de deberse a la exactitud y precisión de las imágenes según la tecnología de adquisición, como se evidencia en la figura 6, también incluye el efecto del estado fenológico de la plantación, la cual se

encontraba en etapa de floración en los meses de medición. Esto coincidiría con los autores [34], quienes encontraron que, a mayor cobertura de floración, menor es el NDVI, resultados obtenidos mediante un estudio de campo, utilizando el espectroradiómetro MS-720, en *Halerpestes tricuspis* bajo distintos niveles de floración. Además, [35], también mencionan que los “radiómetros e instrumentación de imágenes infrarrojas adolecen de los inconvenientes de los efectos de floración”.

Por otra parte, con el espectroradiómetro de campo utilizado, se toma la medición directamente en la hoja, por lo tanto, las medidas no son afectadas por el estado fenológico, salvo condiciones de contenidos de clorofila diferentes por la condición fenológica. Además, otros autores han encontrado problemas en los resultados obtenidos en el NDVI y GNDVI de ortomosaicos creados a partir de fotografías de RPAS, como es el caso de la autora [36] quien encontró que los índices de vegetación que utilizan la banda infrarroja alcanzaron valores más altos con respecto a los basados en bandas del espectro visible.

Los índices de vegetación, como el NDVI y el GNDVI, pueden proporcionar información valiosa sobre la salud de la vegetación y el crecimiento de las plantas en una plantación forestal. Esto puede ayudar al personal técnico de las empresas a tomar decisiones de manejo informadas, basadas en la interpretación de los índices de vegetación para la selección de calidad de sitio en áreas de plantación, aspectos de densidad del rodal o de factores determinantes de sitio para la determinación de la cantidad adecuada de fertilizantes y la identificación de áreas que requieren manejo para controlar plagas y enfermedades [37-40].

IV. CONCLUSIONES

El índice NDVI no presentó diferencias entre los valores obtenidos de la imagen satelital y los obtenidos en campo; sin embargo, sí mostró diferencias entre estos y los valores obtenidos con el RPAS, siendo estos últimos los valores más bajos.

El GNDVI mostró diferencias significativas entre los tres tratamientos estudiados, siendo los valores obtenidos del RPAS los más bajos y los obtenidos con la imagen satelital los más altos.

Se recomienda estudiar los índices de vegetación en distintas etapas fenológicas de la plantación, esto debido a que la reflectancia de las flores puede afectar algunos índices de vegetación, en las respuestas espectrales esperadas y dependiendo del instrumento que se utilice, la comparación de estos presenta una amplia variación.

Se sugiere al trabajar con imágenes de RPAS aplicar una máscara al suelo o delimitar las áreas de copa para así asegurarse que los cálculos de índices se están haciendo específicamente sobre la vegetación y que los valores sean más comparables con los obtenidos mediante otras herramientas.

No se encontró diferencias en el NDVI calculado con el espectroradiómetro manual y el calculado con Sentinel-2. Por lo tanto, se recomienda el uso de Sentinel-2 lo cual ahorra recursos, debido a que no se compra equipo especializado ni se gasta en su mantenimiento, además no es necesario ir al campo a tomar las mediciones (bajar hojas para estudio)

No se recomienda, tomar los datos con el vehículo aéreo no tripulado (P4 Multiespectral – DJI), bajo las condiciones y configuración utilizada en este estudio, debido a que los resultados distan ampliamente a los obtenidos con el espectroradiómetro manual y con Sentinel-2, siendo los primeros los valores más cercanos a la reflectancia real de la vegetación, pues son medidos directamente en las hojas. La planificación y procesamiento de los datos con esta tecnología es costosa y compleja, los datos deberían ser calibrados con una estación GNSS, con puntos de control en el campo, lo cual aumenta el costo.

Debido a que los metadatos de las imágenes satelitales Sentinel-2 poseen un volumen considerable, para la descarga se recomienda contar con una conexión a internet estable y suficiente, también crear previamente una cuenta en la página de COPERNICUS y tener espacio de almacenamiento en el ordenador. También se puede utilizar Google Earth Engine y hacer el procesamiento sin necesidad de invertir en equipo especializado.

V. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parte del proyecto de investigación “Implementación de tecnologías y aplicaciones de bajo costo para el estudio de la fisiología de especies arbóreas del trópico mesoamericano como herramienta para la conservación”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) y al Sistema de Posgrados del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como parte de un trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

A Panamerican Woods y sus funcionarios por ser parte del equipo de trabajo y brindar el apoyo, las herramientas y los insumos de trabajo necesarios.

Al programa de becas CeNAT-CONARE y al equipo de trabajo del PRIAS-CeNAT por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCES

[1] Hasan, S. S., Zhang, Y., Chu, X., & Teng, Y. (2019). The role of big data in China's sustainable forest management. *Forestry Economics Review*, 1(1), 96-105. DOI 10.1108/FER-04-2019-0013

[2] Flores, D. D. C., Benítez, E. A. C., Sánchez, Y. F. Ávila, D. D. (2020). Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas*, 29(1), 1885-1885. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>

[3] Luna, D. R., Manzano, J. M., Montoya-Bonilla, B. P., & García, J. H. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 298-312. <http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.2.628>

[4] Mandal, D.; Kumar, V.; Ratha, D.; Dey, S.; Bhattacharya, A.; Lopez-Sanchez, J. M.; & Rao, Y. S. (2020). Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data. *Remote*

Sensing of Environment, 247, 111954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>

[5] Rhyma, P. P., Norizah, K., Hamdan, O., Faridah-Hanum, I., & Zulfa, A. W. (2020). Integration of normalised different vegetation index and Soil-Adjusted Vegetation Index for mangrove vegetation delineation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100280.

[6] Gilabert, M. A., González-Piqueras, J. & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(1), 1-10. https://www.researchgate.net/profile/Ma-Gilabert/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion/links/00b7d5187635eb5a1a00000/Acerca-de-los-indices-de-vegetacion.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail

[7] Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_Indices_de_vegetacion

[8] Huang, S; Tang, L; Hupy, J. P; Wang, Y & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-020-01155-1>

[9] Corti, M; Cavalli, D; Cabassi, G; Vigoni, A; Degano, L & Marino, P. (2019). Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. *Precision Agriculture*, 20, 675-696. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-018-9609-y>

[10] Duré, A & Vanessa, K. (2019). Análisis de la relación entre el carbono orgánico del suelo y los valores de los índices NDVI y SAVI en sistemas productivos, distrito de San Pedro del Ycuamanduyu (Tesis de Maestría). Recuperado de: <https://repositorio.conacyt.gov.py/handle/20.500.14066/3950>

[11] Lima-Cueto, F. J; Blanco-Sepúlveda, R; Gómez-Moreno, M. L & Galacho-Jiménez, F. B. (2019). Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. *Remote Sensing*, 11(21), 2564. Recuperado de: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/21/2564?type=check_update&version=1&utm_source=TrendMD&utm_medium=cpc&utm_campaign=Remote_Sens_TrendMD

[12] Moreno, A., & Salgado, E. (2019). Análisis de cultivo de maíz para ensilaje utilizando imágenes desde un UAV. *Repositorio Institucional. Universidad de Manizales*. Recuperado de: <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3406>

[13] Kim, E. J; Nam, S. H; Koo, J. W & Hwang, T. M. (2021). Hybrid approach of Unmanned Aerial Vehicle and Unmanned Surface Vehicle for assessment of chlorophyll-a imagery using spectral indices in Stream, South Korea. *Water*, 13(14), 1930. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/14/1930>

[14] Villatoro, B; Barrera, C; Tagua, K & Marroquín, S. (2022). Uso de índice de vegetación NDVI como herramienta para realizar mapas de productividad de TCH en caña de azúcar. *CENGICANA: Memoria Presentación de resultados de investigación Zafra*. Recuperado de: <https://cengicana.org/files/2022072714591310.pdf>

[15] Lechner, A. M., Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2020). Applications in remote sensing to forest ecology and management. *One Earth*, 2(5), 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>

[16] González, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), 30-41.

[17] Esperanza, F. & Zerda, H. (2002). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. *Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Speranza-2/publication/337907941_Potencialidad_de_los_indices_de_vegetacion_para_la_discriminacion_de_coberturas_forestales/links/5df22fe592851c83647661c3/Potencialidad-de-los-indices-de-vegetacion-para-la-discriminacion-de-coberturas-forestales.pdf

[18] García-Cervigón, D. & José, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de

- [19]éstos a la agricultura de precisión [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad Complutense de Madrid.
- [20]García-Martínez, H., Flores-Magdaleno, H., Khalil-Gardezi, A., Ascencio-Hernández, R., Tijerina-Chávez, L., Vázquez-Peña, M. A., & Mancilla-Villa, O. R. (2020). Estimación de la fracción de cobertura de la vegetación en maíz (Zea mays) mediante imágenes digitales tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(4), 399-399.
- [21]Koh, L. P., & Wich, S. A. (2012). Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical conservation science*, 5(2), 121-132. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/310404552_Dawn_of_Drone_Ecology_Low-Cost_Autonomous_Aerial_Vehicles_for_Conservation
- [22]Aguilar, L. & Herrera, J. (2016). Evaluación de bosques tropicales mediante el uso de tecnología VANT. *Revista Germinar*, n° 19, pp. 14-15. Recuperado de: https://issuu.com/ciagro/docs/germinar_no_20
- [23]Bedoya Duque, H. A., & Rendón Valencia, J. L. (2014). Modelación del contenido de clorofila basado en la reflectancia medida por espectrorradiometría de campo en caña de azúcar [Tesis de grado no publicada]. Universidad del Valle. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/10074/CB-0519957.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24]Fernández-Moya, J., Alvarado, A., Morales, M., San Miguel-Ayanz, A. & Marchamalo-Sacristán, M. (2014). Using multivariate analysis of soil fertility as a tool for forest fertilization planning. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 98(2), 155–167. doi:10.1007/s10705-014-9603-3
- [25]Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M., & Spínola Parallada, R. M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de Gmelina arborea en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 143-159. Recuperado de: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/14822/20715>
- [26]Murillo, R; Alvarado A & Verjans, J. (2014). Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del canal de Panamá., *Agronomía Costarricense*, vol. 38, n° 1, pp. 11-28.
- [27]Rouse, J; Haas, R; Schell, J & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1*
- [28]Gitelson, A. & Merzlyak, M. (1998). Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*, 22, 689-692. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2)
- [29]Huang, S; Tang, L; Hupy, J. P; Wang, Y & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-020-01155-1>
- [30]García, D. A. (2019). Dinámica de los índices de vegetación NDVI, GNDVI Y GVI en un cultivo de arroz a partir de imágenes aéreas multispectrales tomadas por drones. Tesis de Maestría. Recuperado de: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4603>
- [31]Gómez, E & Mayorga, S. (2020). Manual de topografía aplicado a la recolección y procesamiento de datos tomados con drones en procesos forenses. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/26318>
- [32]Rivera, J. (2016). Evaluación de Método de Corrección Geométrica de Fotografía Aérea escala 1: 1.000 capturada por vehículos aéreos no tripulados estableciendo una red Geodésica de cuarto orden (Master's thesis, Universidad del Azuay). Recuperado de: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5768>
- [33]Castro, A. (2020). Drones: configuración de vuelos y generación de modelos 3D. Recuperado de: <http://repositorio.inictel-uni.edu.pe:8080/xmlui/handle/123456789/60>
- [34]Shen, M; Chen, J; Zhu, X & Tang, Y. (2009). Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values: Evidence from a field experiment in an alpine meadow. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(2), 99-106. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5589/m09-003>
- [35]Zheng, Y; Tang, L & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129488. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621036672>
- [36]Ramírez-Mesén, C. 2019. Uso de un vehículo aéreo no tripulado como alternativa para evaluar el estado nutricional de una plantación de Gmelina arborea Roxb, San Carlos, Costa Rica (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- [37]Latifi, H; Galos, B & Kohler, M. (2015). Canopy nitrogen mapping in a mixed temperate forest using hyperspectral imagery and LiDAR data. *Remote Sensing*, 7(1), 715-734. doi:10.3390/rs70100715
- [38]Singh, P.K; Kushwaha, S.P.S & Singh, V.P. (2018). Remote sensing applications in forestry: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(1), 3060-3069. doi:10.20546/ijcmas.2018.701.365
- [39]Yan, K; Wang, J; Zhao, C & Li, Q. (2018). Forest health status assessment using Sentinel-2A imagery and machine learning algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 510-521. doi:10.1016/j.jag.2018.08.006
- [40]Aparecido, L.M.T & Rudke, A.P. (2019). The use of remote sensing for forest management: A review. *Forest Ecology and Management*, 432, 209-221. doi:10.1016/j.foreco.2018.09.051