

**USO DE SENSORES PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN  
NORMALIZADO EN CULTIVO DE CAFÉ**

**DAISSY DAYANA GARZÓN MALES**

**JOHANA CAROLINA VILLOTA VALLEJO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO - FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**SAN JUAN DE PASTO, COLOMBIA**

**2023**

**USO DE SENSORES PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN  
NORMALIZADO EN CULTIVO DE CAFÉ**

**DAISSY DAYANA GARZÓN MALES**

**JOHANA CAROLINA VILLOTA VALLEJO**

**DIRECTOR: CARLOS ANDRÉS BENAVIDES CARDONA I.A M.SC**

**INFORME FINAL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**Modalidad investigación como requisito parcial para optar el título de INGENIERO  
AGRÓNOMO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO - FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**SAN JUAN DE PASTO, COLOMBIA**

**2023**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor. Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

**CARLOS ANDRES BENAVIDES CARDONA**  
**DIRECTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

---

**JAVIER GARCIA ALZATE**

**JURADO**

---

**DAVID ANDRES CALVACHE**

**JURADO**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, le agradecemos a Dios y a nuestros padres, los cuales siempre nos han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos nuestros objetivos personales y académicos. Así mismo, agradecemos muy profundamente al director de este trabajo, I.A MSc Carlos Andrés Benavides Cardona, por la dedicación y apoyo brindado, por el respeto a nuestras sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde el primer momento.

USO DE SENSORES PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN  
NORMALIZADO EN CULTIVO DE CAFÉ

USE OF SENSORS FOR THE EVALUATION OF NORMALIZED VEGETATION INDEX  
IN COFFEE CULTIVATION

**Daissy Dayana Garzón Males<sup>1</sup>, Johana Carolina Villota Vallejo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. daissygarzon2000@gmail.com

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. villotajohana9222@gmail.com

**RESUMEN**

Actualmente, la agricultura se enfrenta a varios retos que desafían su sostenibilidad y productividad. Uno de estos, precisamente hace referencia a la gestión de la información en cualquiera de sus etapas de cadena productiva. Durante la fase de cultivo, en ocasiones la toma de decisiones se encuentra condicionada a la eficiencia de la evaluación en el levantamiento de la información base. En este sentido la teledetección cumple un papel importante ya que permite, a través de herramientas alternativas para la obtención de información en determinación de prácticas de manejo. Es así que este trabajo planteó como objetivo el establecer una línea base de información derivada de la relación de variables como el NDVI en estimaciones In situ. Para éste efecto, se comparó en valor de un sensor de contacto y uno remoto acoplado a un vehículo aéreo no tripulado para la medición del Índice Normalizado de Vegetación NDVI. Los datos obtenidos en primer lugar fueron descritos a través de un análisis de tendencia central que evidencio, un comportamiento ajustado a la normalidad con parámetros de valores bajos, generando entonces la necesidad de analizar su comportamiento a través de diferentes etapas del proceso de fructificación de un cultivo de café y compararlos con las imágenes derivadas del sensor remoto. Aspectos en los cuales, se puede concluir que,

si bien la tendencia de comportamiento es igual, los datos obtenidos por cada sensor deben validarse en forma complementaria.

***Palabras clave:*** Teledetección, imágenes multiespectrales, Agricultura 4.0, percepción remota, agricultura de precisión.

## ABSTRAC

Today, agriculture is currently facing several challenges that challenge its sustainability and productivity. One of these is precisely the management of information at any stage of the production chain. any stage of the production chain. During the cultivation phase, decision-making During the cultivation phase, decision making is sometimes conditioned by the efficiency of the evaluation in the collection of baseline information. In this sense, remote sensing plays an important role, since it allows, through alternative tools, to obtain information for the information for the determination of management practices. Thus, this work Thus, the objective of this work was to establish a baseline of information derived from the relation derived from the relationship of variables such as NDVI in in situ estimations. For In this effect, the value of a contact sensor and a remote sensor coupled to an unmanned aerial unmanned aerial vehicle for the measurement of the Normalized Vegetation Index NDVI. Vegetation Index NDVI. The data obtained were first described by means of a central tendency analysis, which central tendency analysis, which showed a behavior adjusted to normality with low parameter values. normality with low parameter values, thus generating the need to analyze its behavior through different the need to analyze their behavior through different stages of the fruiting process of a coffee crop and to compare them of a coffee crop and compare them with the images derived from the remote sensor. sensor-derived images. Aspects in which it can be concluded that, although the tendency of behavior is the same, the data obtained by the remote behavior is the same, the data obtained by each sensor should be validated in a complementary way. in a complementary manner.

**Keywords:** Remote sensing, multispectral imaging, Agriculture 4.0, remote sensing, precision agriculture.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	6
<b>ABSTRACT</b> .....	8
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>OBJETIVOS</b> .....	18
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos.....	18
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	18
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	30
Área de estudio.....	30
Material Vegetal.....	31
Equipos.....	32
Captura de imágenes y obtención del NDVI.....	33
Análisis de la información.....	34
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	35
Análisis descriptivo.....	35
Análisis de distribución de frecuencias.....	40
Análisis comparativo imágenes multiespectrales.....	44

<b>CONCLUSIONES</b> .....	48
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	49
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	50

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Análisis de tendencia central primer momento de evaluación-sensor de contacto.....	36
<b>Tabla 2.</b> Análisis de tendencia central segundo momento de evaluación-sensor de contacto....	37
<b>Tabla 3.</b> Análisis de tendencia central tercer momento de evaluación-sensor de contacto.....	39
<b>Tabla 4.</b> Distribución de frecuencias índice NDVI primera evaluación.....	40
<b>Tabla 5.</b> Distribución de frecuencias índice NDVI segunda evaluación.....	42
<b>Tabla 6.</b> Distribución de frecuencias índice NDVI tercera evaluación.....	43

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de localización y delimitación parcela experimental.....	31
<b>Figura 2.</b> Análisis de imagen primer momento de evaluación-sensor remoto.....	37
<b>Figura 3.</b> Análisis de imagen segundo momento de evaluación-sensor remoto.....	38
<b>Figura 4.</b> Análisis de imagen tercer momento de evaluación-sensor remoto.....	39
<b>Figura 5.</b> Histograma distribución de frecuencias índice NDVI primera evaluación-sensor de contacto.....	40
<b>Figura 6.</b> Histograma distribución de frecuencias índice NDVI segunda evaluación-sensor de contacto.....	42
<b>Figura 7.</b> Histograma distribución de frecuencias índice NDVI tercera evaluación-sensor de contacto.....	43
<b>Figura 8.</b> Polígonos derivados del sensor remoto con representación gráfica NDVI.....	45
<b>Figura 9.</b> Polígonos derivados de la interpolación con datos del sensor de contacto con representación gráfica NDVI.....	46

## Glosario

**Percepción remota:** También llamada teledetección, según Villegas (2008) es la tecnología que engloba los procesos que permiten obtener una imagen de la superficie de la tierra desde el aire o el espacio, y su posterior tratamiento, esta permite la adquisición de informaciones sobre objetos, sin estar en contacto físico con ellos.

**Energía electromagnética:** Se transmite de un lugar a otro en dos campos de fuerzas: eléctrico y magnético.

**Flujo energético:** Se da gracias a la longitud de onda y la frecuencia, ambos inversamente relacionados.

**Longitud de onda:** Es la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda.

**Frecuencia:** Es el número de ciclos que pasan por un punto fijo en una unidad de tiempo.

**Sistemas sensores:** Son dispositivos sensibles a alguna forma de energía ambiental capaces de coleccionar información de objetos mediante la energía reflejada sobre estos.

**Rojo (RED):** Representan la longitud de onda dentro de ese segmento o bloque que representa a todo el rojo. toda la banda del rojo es de interés en la vegetación, está entre los 620 nm a 750 nm.

**RGB:** Hace referencia a la banda de color roja, verde y azul que en este caso captura la cámara de RGB de un sensor remoto.

**Infrarrojo cercano (NIR):** Representan la longitud de onda dentro de ese segmento o bloque que representa a todo el infrarrojo. Toda la banda del infrarrojo de interés en la vegetación (infrarrojo cercano y parte del medio) está entre los 750 nm a 2.800 nm.

**Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):** Según Soubry y colaboradores (2017) es un indicador que señala el verdor, densidad y salud de la vegetación en cada píxel de una imagen de satélite, basada en el contraste entre la máxima absorción al rojo debido a la clorofila y de la máxima reflectividad al infrarrojo que se genera a partir de la estructura celular de las hojas.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia la agricultura desempeña un papel fundamental en la sociedad al ser la principal fuente de alimentos. Sin embargo, actualmente la producción de cultivos de importancia social y económica tales como el café, arroz, maíz, yuca y pastos, entre otros, está disminuyendo y, por ende, para algunos de estos productos la importación se ha incrementado, poniendo en manifiesto que mejorar la productividad es un reto que se debe atender (Herrera, 2019). Es evidente que la gestión de procesos y proyectos que ayuden a enfrentar este importante desafío, requiere del concurso de prácticas innovadoras que involucren tanto acciones de intervención en los sistemas productivos, como también el acceso a la información necesaria para la realización de estos procesos. Es así, que este segundo aspecto, el uso de sensores remotos, vehículos aéreos no tripulados, minería de datos, entre otras herramientas se constituyen cómo un eje de gran importancia para ser considerados dentro de las ciencias agrarias como ejes temáticos para afrontar estos nuevos retos (Sishodia *et al.*, 2020).

El avance de la tecnología en las cámaras digitales y sensores ópticos, se constituyen como herramientas fundamentales a la hora de sensar o extraer información de lo que se desea observar a mayor detalle que la observación normal. En particular, en el caso de los sistemas de visión artificial, necesarios entre otros, para llevar adelante una navegación automatizada, es importante destacar que los mismos pueden clasificarse en sistemas directos e indirectos. Los primeros permiten trabajar en tiempo real (Rossius, 2012) y los sistemas indirectos aquellos cuyo procesamiento es posterior a la captura de datos obtenidos mediante imágenes o videos. (Schiaffino, 2006).

Dentro de estas alternativas en este campo, una de las tecnologías que ha venido incrementado su uso debido a su utilidad y eficiencia es el uso de la teledetección. Esta, ha resultado ser una herramienta de gran ayuda en procesos de control y monitoreo de cultivos, permitiendo

desarrollar y articular métodos agrícolas más eficientes (Cuervo, 2016) basándose en la captura y análisis de datos obtenidos desde plataformas aéreas o satelitales, que registran diferentes longitudes de onda de la luz reflejada por la superficie terrestre y sus elementos (Ángeles *et al.*, 2020).

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

No siempre es posible en estos casos, establecer una medición sistemática para analizar los cambios o variaciones de las plantas en respuesta a diferentes estímulos de tipo biótico a abiótico que limiten o promuevan su crecimiento y desarrollo, en la actualidad, para esta situación se han generado diversos índices de espectroscopia que se usan en la evaluación del comportamiento de algunos cultivos (López *et al.*, 2016). Para la utilización y estimación de estos índices, se recurre a equipos o sensores multiespectrales tradicionales que generan información compleja e incluso difícil de analizar debido al mecanismo de captura o lectura de información, es por esta razón que se ha difundido el uso y aplicación de cámaras modificadas para detección únicamente de bandas específicas que además de reducir su costo de implementación, permiten con mayor facilidad la estimación de índices particulares empleados en el seguimiento de cultivos con parámetros específicos (Zheng *et al.*, 2018). Por ejemplo en el cultivo de café, Rivera *et al.*, 2019 estudiaron a través del uso de imágenes multiespectrales en forma temprana, el estado nutricional de plantaciones en diferentes estados, consolidando para este caso un sistema de información que permitió el procesamiento de imágenes por medio

de un algoritmo que calcula el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), afirmando así que el uso de estos sensores permitió analizar su comportamiento e incluso derivado de esta información, se posibilitó el cálculo de índices adicionales como el índice de vegetación relación Simple (SR) y el índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), concluyendo de tal manera que el uso de sensores y el correcto procesamiento de los datos permite un diagnóstico adecuado del cultivo en forma eficiente y a corto plazo ya que con técnicas tradicionales la obtención de la misma información podría haberse dificultado, además valoraron la oportunidad de vincular el análisis del entorno en forma paralela sin costos adicionales.

Estas tecnologías han sido evaluadas y demostradas alrededor del mundo en diversos cultivos, con la limitante de que en ocasiones se ve restringida por sus costos de implementación y complejo manejo, de tal manera que en muchos casos es aplicable únicamente a cultivos de importancia económica o social. En Colombia se ha desarrollado principalmente en cultivos industriales como palma de aceite, y caña de azúcar y en otros alimenticios como lo es el plátano, arroz y café. Este último cultivo es uno de los más representativos e importantes económicamente en el departamento de Nariño (CNC, 2022), donde 41 de los 62 municipios son caficultores, derivando el sustento de más de 54.000 familias (FNC, 2022); por lo cual es importante para ser considerado dentro de trabajos pioneros que contribuyan a la formación de una línea base para el desarrollo de investigaciones en la temática, efectuadas bajo las condiciones ambientales del departamento.

Los ambientes de producción son variables y por ende los cultivos están sometidos a diferentes estímulos que intervienen en respuesta de crecimiento y desarrollo diferencial. El cultivo de café tiene un rango estrecho de condiciones en las cuales se desarrolla mejor. Las plantas están expuestas a una amplia fluctuación de condiciones ambientales como la luz, la temperatura, la

disponibilidad de agua y nutrientes, por lo cual se considera han tenido que aclimatar su actividad fotosintética (Jiménez y Massa, 2015). Por lo anterior, es necesario la implementación de tecnologías que permitan gestionar de mejor manera las problemáticas asociadas al cultivo, valorando la necesidad de validar estas herramientas que nos permitan detectar de forma temprana alteraciones que puedan repercutir de forma negativa en el desarrollo del cultivo, de manera que se logre tomar acciones preventivas correctamente. Permitiendo también el conocimiento de sus focos de atención, para poder tomar decisiones de tipo diferencial en aras de lograr una agricultura más específica por sitio, evitando la toma de mediciones en puntos aleatorios y la toma de decisiones para toda el área.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de dos sensores para obtención del índice vegetación normalizado (NDVI) en una fase fenológica del cultivo de café.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el comportamiento del NDVI obtenidos a través de dos tipos de sensores en un cultivo de café.
- Analizar la variación en el comportamiento del NDVI en diferentes estados de desarrollo de un cultivo de café.
- Correlacionar los valores NDVI obtenidos con el uso de un sensor de contacto foliar y uno acoplado a un vehículo aéreo no tripulado.

## **MARCO TEÓRICO**

### **Teledetección o percepción remota**

La teledetección o percepción remota es la tecnología que engloba los procesos que permiten obtener una imagen de la superficie de la tierra desde el aire o el espacio, y su posterior tratamiento, esta permite la adquisición de informaciones sobre objetos, sin estar en contacto físico con ellos (Villegas, 2008); siendo los sensores los equipos capaces de coleccionar las características superficiales mediante la energía radiante reflejada por estos materiales (Núñez, 2016).

La transferencia de datos del objeto al sensor, siempre es realizada a través de energía. Esto hace necesario tener en cuenta varios conceptos los cuales son de gran utilidad en el momento de llevar a cabo el análisis para una solución; en cuanto al tipo de energía utilizada en la transmisión de información encontramos la acústica, gravitacional y electromagnética; teniendo en cuenta que este último tipo de energía se propaga en el vacío con una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s, por lo cual es considerada la más útil en cuanto a las actividades de teledetección, constituyendo un medio de traspaso de información de alta velocidad, entre las sustancias y objetos de interés y el equipo sensor (Villegas, 2008).

Al existir numerosas fuentes de energía electromagnética, la teledetección limita su campo de estudio a las interacciones que acontecen en la superficie terrestre, esto implica que entre la superficie de la tierra y el sensor debe existir una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse (Villegas, 2008).

La teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior interpretación con una determinada aplicación, de esta manera se la define como una ciencia interdisciplinaria que permite la adquisición, manipulación e interpretación de imágenes, así como de otros datos físicos. Estos datos se

obtienen de diversas fuentes, incluidos sensores espaciales, sensores aerotransportados y mediciones in situ (López, 2023).

Para que la observación remota sea posible, es necesario que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción, llamado flujo energético, este se constituye en la forma de radiación electromagnética. Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz, y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí, el eléctrico y el magnético. La sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas o rangos entre valores específicos de longitudes de onda o frecuencias, se denomina espectro electromagnético (Villegas, 2008).

El espectro electromagnético comprende en un continuo, desde las longitudes de onda de todas las formas de radiación electromagnética, abarcando los rayos gamma, que poseen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas conocidas actualmente, identificadas por ser ondas de alta energía capaces de viajar largas distancias a través del aire y son las más penetrantes; los rayos X con longitudes de onda más largas que los rayos gamma pero más cortas que la radiación ultravioleta, poseen mayor energía que esta última, consisten en una forma de radiación ionizante. Los electrones situados fuera del núcleo emiten rayos X, mientras que los rayos gamma los emite el núcleo y la radiación ultravioleta (UV) se designa como el segmento del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible (Pérez, 2023).

De esta manera la luz visible, comúnmente conocida como espectro visible, es el segmento del espectro electromagnético que es discernible para el ojo humano; en general, el sistema visual humano detecta la radiación electromagnética, conocida como luz, dentro de un rango de

longitud de onda que va de 380 a 750 nanómetros (nm). Abarca una amplia gama de tonalidades. Dentro de los confines del arcoíris, la luz visible con una longitud de onda distinta produce varios tonos. La paleta de colores se compone, entre otros, de rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta, a pesar de la presencia de rosa y turquesa (Gudiña, 2023).

Es importante tener en cuenta la espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR), la cual es una técnica que aprovecha la parte infrarroja cercana del espectro electromagnético, que abarca desde aproximadamente 700 a 2500 nanómetros. Al medir la luz dispersada desde y a través de una muestra determinada, los espectros de reflectividad NIR se pueden utilizar para determinar de forma rápida y precisa las propiedades del material sin afectar a la propia muestra. Los datos obtenidos de la espectroscopia NIR son muy informativos y se pueden aprovechar para optimizar los procesos o avanzar en la investigación. Con la capacidad de analizar superficies irregulares con la misma eficacia que las muestras preparadas meticulosamente, la NIR no es destructiva y requiere una preparación mínima o nula de las muestras. Además, es capaz de analizar varios componentes en un solo análisis, lo que la convierte en una herramienta increíblemente versátil (De Marchi, *et. al*, 2011).

### **Tipos de teledetección**

La teledetección puede ser pasiva o activa. Los sistemas activos tienen su propia fuente de energía que rebota en un objeto para ser percibido; un ejemplo de sistema activo es el radar. Mientras tanto, los sistemas pasivos dependen de una fuente externa de iluminación natural (como el sol) para la teledetección, mayormente usados para la evaluación de recursos naturales (Martínez, 2005).

La fuente predominante de radiación en el sistema solar es, sin lugar a dudas, el Sol, cuya emisión, al reflejarse en la Tierra y los objetos que la rodean, se aprovecha de manera ubicua en la práctica de la teledetección, lo que permite nuestra percepción visual de las entidades

circundantes, lo que se conocería como teledetección pasiva, la cual se basa en la energía natural, como los rayos solares, para rebotar en el objetivo. En consecuencia, esta metodología solo se puede utilizar en condiciones de luz solar adecuadas, ya que de lo contrario no habría nada que reflejar. La técnica de teledetección pasiva emplea sensores multispectrales o hiperspectrales para cuantificar la cantidad de energía recibida, utilizando varias combinaciones de bandas. Las distinciones entre estas combinaciones vienen determinadas por el número de canales, que pueden constar de dos o más longitudes de onda. Estas bandas abarcan espectros tanto dentro como fuera de la visión humana, incluidos el visible, el infrarrojo IR, el infrarrojo cercano NIR, el infrarrojo térmico TIR, y el microondas (Kogut, 2021).

Otra alternativa factible implica la integración de un emisor de radiación, comúnmente conocido como radar, en el sistema de captura. Posteriormente, el sensor recoge el reflejo del radar en la superficie planetaria objeto de investigación, en la teledetección activa cada sensor de teledetección operativo emite su señal hacia el objeto y, posteriormente, verifica la cantidad recibida. La mayoría de los dispositivos utilizan microondas debido a su relativa insensibilidad a los fenómenos meteorológicos. Las técnicas empleadas en la teledetección activa varían según el tipo de medio de transmisión (luz u ondas) y los parámetros que se estén midiendo como la distancia, la altitud, las condiciones atmosféricas, entre otras (Obregón, 2021).

### **Interacción de la radiación electromagnética con la vegetación**

El catalizador para el proceso de la fotosíntesis es el pigmento llamado clorofila, un complejo de compuestos orgánicos que contiene hierro. Su función es la de absorber la radiación solar, para generar tal proceso. Esto se consigue mediante bandas de absorción cercanas a 0.45 y 0.68 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), en las partes azul y roja del espectro visible respectivamente; esta es la razón por la cual las hojas saludables son de color verde. Sin embargo, la clorofila es inestable por encima de cierta temperatura; para protegerla del daño termal, las plantas han desarrollado

métodos para balancear la energía. Esto se consigue mediante fuerte reflexión de la radiación en el infrarrojo cercano, que se logra mediante el recubrimiento brillante que suelen tener las hojas en la parte que exponen al sol, pero también mediante la disposición interna de sus células. Una hoja sana suele ofrecer una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.3  $\mu\text{m}$ ), en claro contraste con la baja reflectividad que muestra en el espectro visible, especialmente en la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible (Villegas, 2008).

El agua en las células absorbe alguna energía como dos bandas de absorción que dependen de su proporción. Entre estas bandas donde la absorción del agua es más clara, queda patente que la observación del espectro es de gran interés para conocer el estado de vigor de las hojas, en función de su contenido de humedad. Sin embargo, las plantas ante los sistemas de teledetección se presentan como hojas de diferentes formas y tamaños, espacios entre las mismas, tallos y a veces ramas, además de muchas otras variaciones (Villegas, 2008). Todas las interacciones individuales en estas estructuras complejas, pueden interferir y posteriormente ampliar el rango de las respuestas, porque el sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de las mismas que constituyen masas de vegetación, razón por la cual intervienen otros elementos adicionales que complican su detección, tales como el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; las características del suelo que sustenta la vegetación; la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, entre otros (Mather, 2004).

Es evidente que el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (en torno a 0.645  $\mu\text{m}$ ), y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ). De ahí que se pueda enunciar como principio genérico, que cuanto

mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta (Villegas, 2008).

### **Los sistemas sensores**

Los sistemas sensores son dispositivos sensibles a alguna forma de energía ambiental que puede ser luminosa, térmica, cinética, relacionando información sobre una cantidad física que necesita ser medida, como temperatura, presión, velocidad, corriente, aceleración, posición; clasificándose así en sensores de contacto, ópticos, térmicos, de humedad, magnéticos y sensores de infrarrojos (Wendling, 2010).

Este tipo de tecnología dentro de la agricultura favorece en la reducción del consumo de agua y pesticidas, contribuyendo a la preservación del entorno. Adicionalmente, pueden generar alertas sobre la llegada de heladas, inundaciones, incendios. Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el control de plagas y enfermedades. Por medio de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorizar parámetros tales como la temperatura y la humedad relativa del suelo, la temperatura y humedad de las hojas, la radiación solar, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiados (Fernandez *et al.*, 2009).

Se considera entonces, que un sensor es un dispositivo capaz de detectar distintos estímulos del exterior, transformándolos en impulsos eléctricos a través de un transductor que posteriormente serán interpretados por ordenadores o máquinas específicas, que las analizan, los procesan y transforman con el objetivo de generar una respuesta (Crosta, 1993). Dentro de la teledetección, cualquier proceso debe convertir sus datos no digitales (análogos) en números, cualquier imagen que no esté en este formato, debe digitalizarse para que pueda ser leída por un computador, y sea incorporada en una base de datos. La mayoría de los datos satelitales son comercializados en modo digital; sin embargo, suelen tenerse mapas, fotografías u otros datos

análogos que contienen información que desea incorporarse en un estudio. Los sistemas sensores pueden ser clasificados de diferentes maneras. Tomando como criterio la fuente de energía, pueden dividirse en pasivos y activos. Los primeros detectan la radiación solar reflejada o emitida por los objetos de la superficie. Dependen por lo tanto de una fuente de radiación externa, para que puedan operar; los mecanismos fotográficos son un buen ejemplo de este tipo de sensores. Los activos son aquellos que producen su propia radiación; el radar es un ejemplo de estos sistemas, dado que produce la energía que interactúa con los objetos de la superficie (Villegas, 2008).

Los sensores remotos pueden clasificarse en función de la región del espectro en que operan. Así podemos tener sensores que trabajan en la porción óptica del espectro (0.35 - 15.0um), y que se caracteriza por la utilización de componentes ópticos en su construcción, tales como espejos, prismas y lentes (Greenbaum, 1989). Los sensores de microondas, se diferencian de los anteriores, por operar en una región del espectro caracterizada por ondas de longitud entre 1mm y 1m (Villegas, 2008).

### **Vehículos aéreos no tripulados (VANT/UAV/RPAS)**

Los Vehículos Aéreos no Tripulados son aeronaves controlados autónomamente desde tierra utilizando planes de vuelo programados y se caracterizan por no llevar a bordo un operador humano; son capaces de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción (Trejo *et al.*, 2016).

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT), UAV (Unmanned Aerial Vehicle), más apropiadamente RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), comúnmente conocido como dron (Medina *et al.*, 2016) son una herramienta útil para optimizar los procesos de agricultura de precisión, pues brindan información real de las áreas de cultivo y reducen el tiempo y el esfuerzo necesarios para su monitoreo, permiten transportar cámaras o sensores que capturan imágenes

para optimizar el manejo de la variabilidad espacial y temporal del cultivo y sus factores de producción; estos pueden ser aéreos, terrestres o acuáticos. En cualquiera de los casos, estos equipos se encuentran en constante evolución y su aplicación se ha extendido a los diferentes campos del conocimiento humano, en las ciencias e ingenierías, especialmente, el tema que abordamos sobre la agricultura de precisión (Pino, 2019).

Candiago *et al.* 2015, afirmaron que las imágenes de alta resolución capturadas con ayuda de los VANT representan un recurso rápido, fiable y rentable para la evaluación de los cultivos y podrían incluso eliminar por completo la necesidad de realizar estudios sobre el terreno. Varios estudios han demostrado su potencial en la elaboración de mapas para coberturas vegetales, la mayoría de estos estudios de vegetación se han centrado en los campos de cultivo donde el área de escaneo es limitada y bien conocida (Salamí *et al.*, 2014). Agüera *et al.* 2011 midieron el estado de nitrógeno del girasol con un microdrone y compararon esas mediciones con los datos recogidos desde una plataforma terrestre, afirmando así que las imágenes de una cámara a bordo de un VANT pueden ser útiles para detectar deficiencias de nitrógeno en el campo.

Por otro lado, es importante mencionar que es más probable que esta tecnología complemente a la teledetección en vez de reemplazarla. Los productos VANT contribuyen con la validación de los modelos de la teledetección y ayudarán a llenar los vacíos espaciales (Sharma *et al.*, 2013).

### **Índices Espectrales de Vegetación**

Los índices espectrales de vegetación se consideran medidas cuantitativas, basadas en los valores de reflectancia, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Normalmente son resultado de operaciones aritméticas aplicadas a distintas regiones del espectro electromagnético con el objeto de obtener valores simples que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel (Fuentes *et al.*, 2019). Por lo tanto, un índice de vegetación, puede

ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Muñoz, 2013).

Altos valores de índices de vegetación generalmente identifican píxeles cubiertos por proporciones sustanciales de vegetación saludable (Fuentes *et al.*, 2019), por lo que permiten identificar superficies destinadas a cultivos, al caracterizar su distribución espacial, la estimación de la masa foliar, actividad fotosintética o incluso medir la evolución de su estado a lo largo de su ciclo, es por ello que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota (Balbontin *et al.*, 2016). La interpretación del índice debe considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución temporal y espacial causados por otros factores (Mayorga *et al.*, 2019). Candiago *et al.* (2015) señalan que el uso de estos índices ha sido un componente clave en la agricultura de precisión, por su uso para la obtención de la situación presente en el cultivo y evitando los costos asociados a una inspección de manera terrestre del área, permitiendo obtener información detallada de una manera más ágil.

Dentro del parámetro de sanidad del cultivo, el índice de Vegetación De Diferencia Normalizada (NDVI) es considerado el más conocido y utilizado debido a su fácil estimación y amplia aplicación (Soubry *et al.*, 2017); entre otros de los índices de vegetación más comunes encontramos el índice normalizado diferencial de vegetación en verde (GNDVI), el cual se enfoca en observar el contenido de la clorofila; el índice de vegetación ajustado al Suelo (SAVI), encaminado en determinar la vigorosidad y buen estado vegetativo, así como también la presencia de malezas, pastos bajos o elementos sin contenido clorofílico y el AMTCI denominado índice de clorofila terrestre adaptado (Zúñiga, 2018).

### **Índice de Vegetación De Diferencia Normalizada (NDVI)**

El Índice de Vegetación De Diferencia Normalizada es un indicador que señala el verdor, densidad y salud de la vegetación en cada píxel de una imagen de satélite, basada en el contraste entre la máxima absorción al rojo debido a la clorofila y de la máxima reflectividad al infrarrojo que se genera a partir de la estructura celular de las hojas (Soubry *et al.*, 2017).

Ha sido uno de los índices de vegetación más utilizados en la teledetección. La razón fundamental es su sencillez de cálculo y por disponer de un rango de variación fijo (entre  $-1$  y  $+1$ ), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Al conocer cómo funciona el NDVI, entenderemos cómo permite determinar qué tan saludable o insalubre es una planta (Muñoz, 2013).

La reflectancia espectral de un cultivo difiere considerablemente en la región del infrarrojo cercano ( $\lambda = 700-1300$  nm) y en el 31 rango visible en rojo ( $\lambda = 550-700$  nm) del espectro electromagnético, en donde el cultivo que se encuentra en un estado óptimo presentará una mejor reflexión en el infrarrojo cercano (valores más altos) (Hernández, 2015).

Magne (2015) señala que las plantas generalmente tienen baja reflectancia en la parte azul y roja del espectro visible debido a la absorción de la clorofila, con una reflectancia ligeramente superior en el verde; por lo que las plantas parecen verdes a nuestros ojos. La energía radiante del infrarrojo cercano se refleja fuertemente a partir de la superficie de la planta y la cantidad de esta reflectancia está determinada por las propiedades de los tejidos foliares, como es su estructura celular y las interfaces pared protoplasma-cloroplasto.

De acuerdo con Rouse *et al.*, (1974) el NDVI, ha sido utilizado ampliamente como indicador del vigor de la biomasa vegetal, en estudios relacionados a comportamiento de cultivos, así como de vegetaciones boscosas naturales.

Gonzaga (2014) realizó la evaluación de índices de vegetación derivados de imágenes adquiridas por dos sensores para análisis de coberturas vegetales, los índices de vegetación evaluados, NDVI, (MSI) índice de estrés hídrico y (SAVI) índice de vegetación ajustado al suelo derivados de imágenes Landsat 7 ETM+ y ASTER permitieron estimar el estado o vigor vegetal de las coberturas vegetales presentes en el área de estudio, aunque el SAVI en coberturas menos densas, a pesar de ser un índice que incorpora un coeficiente de corrección del efecto suelo, no discriminó mejor las coberturas que el NDVI.

### **Aplicación de índices de vegetación en cultivos**

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 como el de vegetación ajustado de suelo transformado (TSAVI) diseñado para estimar área foliar (Viña *et al.*, 2011), índice de vegetación mejorado (EVI) para estimar contenido de agua (Qiu, 2019), índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), índice de Clorofila Verde (GCI) e índice de vegetación relación Simple (SR) para estimar biomasa, densidad vegetal, biodiversidad, abundancia vegetal (Kumar, 2018)(Kross, 2015).

Los índices espectrales de vegetación han sido utilizados a través del tiempo en diversos aspectos y cultivos en el país. Debido a la falta de estrategias de manejo y en especial herramientas de diagnóstico y detección temprana de problemas fitosanitarios, se ha generado la necesidad de identificar técnicas de detección con aplicación potencial a nivel comercial. Actualmente se han venido desarrollando evaluaciones de estas herramientas de análisis de datos espectrales, de los cuales se destacan los trabajos de Betancourt, 2021 y Leon, 2023, en cultivos de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) y papa (*Solanum tuberosum*), los cuales permitieron la caracterización de las plantas sanas y enfermas por Marchitez Letal (ML) y

Madurez Temprana (MT), y una aproximación a la cuantificación de los niveles de severidad de estas enfermedades, logrando así, su diagnóstico en estos cultivos. Debido a la potencialidad que tienen las mediciones de reflectancia para diferenciar las plantas enfermas de las sanas, lograron definir protocolos para mejorar la detección de estas enfermedades, mediante estos métodos no destructivos, relativamente rápidos, de buena confiabilidad y que permiten tener una visión espacial completa de los lotes.

Por otro lado, 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 como es el caso de Revelo *et al.*, 2020, el cual evaluó tres índices de vegetación para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*), concluyendo así que el NDVI, GNDVI y NDRE son indicadores aceptables de las zonas de vegetación, caracterizándose con un gran potencial a la hora de caracterizar el estado de desarrollo del cultivo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Área de estudio.**

La zona de estudio se localizó en la finca Villa Lola en la vereda Paltapamba, municipio de Consacá, Nariño, con una altura aproximada de 1.830 msnm, una temperatura promedio de 22°C y humedad relativa promedio del 69% (Alcaldía municipal de Consacá, 2020), con coordenadas 77°28'00'' Oeste y 1°12'55'' Norte y con un área aproximada de 2806 m<sup>2</sup> (Figura 1).

### **Figura 1.**

*Esquema de localización y delimitación parcela experimental, elaboración propia*

## Ubicación del área de estudio en la finca Villa Lola



### Material vegetal

Con el objetivo de realizar la evaluación del índice propósito de este trabajo, se consideró un lote de café variedad registrada Cenicafé 1, con una edad de 18 meses y distancia de siembra de 2,0 m entre surco y 1,0 m entre plantas. Se tomaron como referencia tres momentos de evaluación; la primera iniciando el periodo de floración, la segunda 78 días después y la tercera 179 días después de la primera. De tal manera, que coincidan con las etapas I, II y IV de desarrollo del fruto de café del periodo correspondiente a la cosecha del primer semestre del año, de acuerdo con el Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFE (2014), esto debido a que la zona Sur del país se caracteriza por tener una fuerte concentración de floración en los meses de septiembre a octubre, con la evaluación se tuvo en cuenta cubrir una variación fenológica significativa garantizando, que al finalizar la evaluación el fruto se encontró fisiológicamente desarrollado y comenzando su maduración.

## Equipos

En esta investigación, como plataforma para el sensor, se usó el vehículo aéreo no tripulado Mavic Pro (<https://www.dji.com/mavic>) fabricado por la compañía DJI (<https://www.dji.com>), con tamaño diagonal (propellers excluido) de 335 mm, con un peso (batería y hélices incluidas) 1.64 Lbs (incluye cubierta de cardán); con una velocidad máxima de ascenso de 5 m/s y descenso de 3 m/s, velocidad máxima de 65 kph sin viento, altitud máxima de despegue 5000 m, tiempo máximo de vuelo 27 minutos y sistema de navegación global por satélite GPS/GLONASS, estabilización de 3 Ejes (pitch, roll, yaw), sistema de detección de obstáculos en dos direcciones (de frente y abajo) y la app para móviles para retransición de imagen DJI GO 4 para iOS y Android. Para la captura de imágenes aéreas se utilizó el sensor: High Precision Single Sensor NDVI (Red+NIR) y NDRE (Red Edge+NIR), fabricado por la compañía SENTERA (<https://sentera.com/>), con una resolución de imágenes de 12,48 píxeles horizontales / 950 píxeles verticales, y con captura de longitudes de onda, para NDVI (Red 625 nm CWL x 100 nm, NIR 850nm CWL x 40 nm) y NDRE (Red Edge 720 nm x 40 nm, NIR 840 nm x 20 nm). El software FieldAgent fue utilizado para la planificación de vuelos, trazando un polígono regular del área de influencia y se generó una grilla en donde el RPAS sobrevoló la zona.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), un indicador del contenido de clorofila en las plantas, se midió con un medidor NDVI (PlantPen NDVI 310) utilizando la diferencia de reflectancia en las longitudes de onda visible e infrarroja cercana:  $(R740 - R660) / (R740 + R660)$  (Tucker, 1979). Entendiendo toda la dinámica espectral sucedida en el proceso de interacción energética entre el sol y los vegetales se define como principal elemento de la estructura de cada individuo vegetal, a la hoja. Por esta razón y teniendo en cuenta la forma de trabajar del sensor de contacto se realizan tomas sobre el haz de cada una de las hojas de

muestreo sobre la parcela teniendo en cuenta que el sensor de contacto también posee un GPS de alta precisión con 1,5m de error aproximadamente. Es importante considerar que se evaluaron dos hojas por cada estrato de la planta, estimando así estrato bajo, medio y alto.

### **Captura de imágenes y obtención del NDVI**

Las fechas de vuelo se establecieron considerando la proyección de la curva de desarrollo del fruto mencionadas previamente y usando sensores que capturaron tres porciones del espectro electromagnético: Red, NIR y NDVI, que son reflejadas por las plantas. Se agendaron fechas cada tres meses aproximadamente y se estableció el mismo horario (10:00 am – 12:00 m), con el fin de garantizar una radiación fotosintéticamente activa homogénea.

Para el caso del sensor de contacto, se establecieron muestreos periódicos que coincidirían con los momentos mencionados y ejecutados a través de lectura directa sobre plantas marcadas en la ruta que posteriormente sería considerada en los planes de vuelo para el vehículo soporte del sensor remoto. Además, cada planta fue georreferenciada para posterior procesamiento gráfico y para que en cada momento se considere el mismo individuo. Si bien el sensor considera los valores del RED y del NIR en forma separada, procesa la información y arroja un NDVI calculado en forma inmediata, siendo este último dato considerado para el análisis de los mismos.

Para el sensor remoto, la planificación y ejecución del vuelo se desempeñaron conforme con los requerimientos de campo. Las actividades llevadas a cabo una vez reconocida el área de estudio, se determinó: 1) recorrido; óptimo para abarcar la totalidad de la superficie del cultivo, se tomaron dos metros extra sobre el área del lote, 2) dirección; las líneas de vuelo se planificaron en forma paralela con las líneas del cultivo (es importante conservar uniformidad entre estas) en este caso fue a 0°, 3) altura de vuelo mínima; de acuerdo con los obstáculos presentes en la zona a 25 metros, 4) puntos de inicio y finalización del vuelo 4) datos históricos

y en tiempo real de condiciones atmosféricas (precipitación, nubosidad, vientos, temperatura, humedad, etc.) especialmente dirección predominante y velocidad del viento.

De acuerdo con estos parámetros también se definió la altura de vuelo siendo, velocidad de ascenso y desplazamiento de 2 m/s, inclinación de la cámara, número de fotos (solape frontal y lateral) del 80%, precisión del sistema de posicionamiento, etc.

Empleando el software FieldAgent se trazó el polígono del área de influencia y la grilla del vuelo. Posteriormente, se escribió el vuelo programado en el computador/piloto automático del vehículo aéreo no tripulado para que este lo siguiera durante los vuelos. Se agendaron fechas y establecieron horas adecuadas (entre 10:00 am y 12:00 m) para capturar la mayor Radiación fotosintéticamente activa o PAR (photosynthetically active radiation). Ejecución del vuelo: el desplazamiento se llevó a cabo hasta las zonas de cobertura a evaluar, en función de los datos obtenidos en el reconocimiento y trazado del vuelo con el software FieldAgent, lo cual incluye: 1) encendido del vehículo aéreo no tripulado y revisión del adecuado funcionamiento de todos los componentes, 2) activación de la ruta de vuelo almacenada en el equipo y 3) verificación del centro de gravedad del dron. Así mismo, se programaron y configuraron las cámaras para la captura de imágenes en Red, NIR y NDVI. Finalmente se puso en funcionamiento todo el equipo preparado.

Para la georreferenciación de los ortofotomosaicos, es decir, los productos resultantes de la unión del conjunto de fotografías aéreas correspondientes a una zona de la superficie terrestre sin desviaciones de relieve y captura, se tomaron puntos de control en tierra lo que se conoce como sitios físicos en tierra de los cuales es conocida su posición respecto a un sistema de coordenadas. Estratégicamente distribuidos en la zona de interés; los cuales fueron identificados en las imágenes para otorgar mayor precisión a los productos generados.

## **Análisis de la información**

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

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este estudio, a través de la respuesta espectral del cultivo de café en las fases fenológicas mencionadas y determinando el índice de vegetación en diferentes etapas de desarrollo del fruto, el producto obtenido fue el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) a fin de, analizar y evaluar su comportamiento con dos sensores, que involucran longitudes de onda del rojo (RED) y del infrarrojo cercano (NIR).

### **Análisis descriptivo**

En primera instancia, la tabla 1 evidencia el análisis de tendencia central para los datos arrojados por el sensor de contacto. Estos mostraron a través de los parámetros calculados un comportamiento homogéneo, en primer lugar, se puede observar que parámetros como la desviación estándar, la curtosis, la varianza y el coeficiente de variación representaron valores muy cercanos a la media con rangos diferenciales cortos e indicando la normalidad de los datos presentados.

En el primer momento de evaluación, mediante el análisis de tendencia central en la primera fase (etapa de floración), se obtuvo una media de NDVI (0,62), moda (0,64), curtosis (1,959) y un coeficiente de variación (8,172) que, como parámetros base, representan no solo un estatus vigoroso y sano del cultivo en general, sino también un punto base para la determinación del proceso evolutivo del índice en los siguientes momentos.

**Tabla 1.**

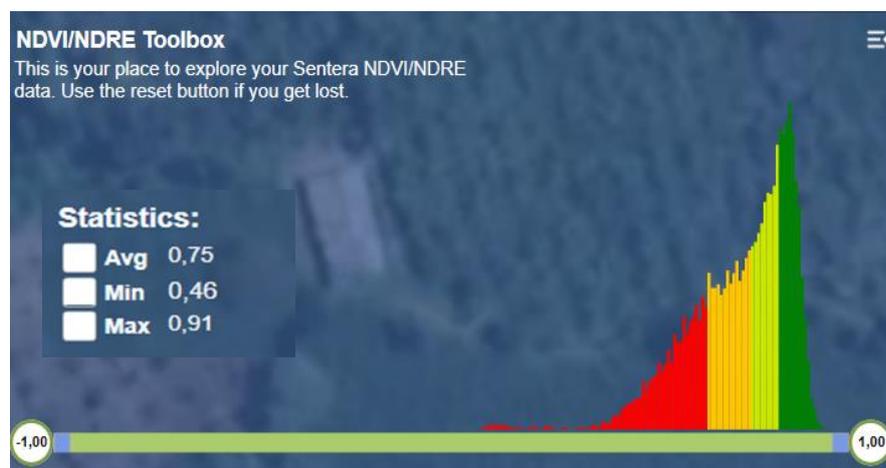
*Análisis de tendencia central primer momento de evaluación – Sensor de contacto*

<b>Estadístico</b>	<b>NDVI</b>	<b>Estadístico</b>	<b>NDVI</b>
Media	0,62	Coefficiente de asimetría	-1,160
Error típico	0,006	Rango	0,275
Mediana	0,62	Mínimo	0,434
Moda	0,64	Máximo	0,709
Desviación estándar	0,051	Cuenta	78
Varianza de la muestra	0,003	Coefficiente de variación	8,172
Curtosis	1,959	Nivel de confianza (95,0%)	0,011

En el caso del sensor remoto, el análisis de imagen obtenido de la evaluación NDVI mostró una media de 0,75, un valor mínimo de 0,46 y un máximo de 0,91. Cabe mencionar que, si bien la media y el valor mínimo son homogéneos con base en el sensor de contacto, el valor máximo está por encima del rango del primero. Esto, podría estar sustentado en que para el caso del sensor remoto pudieron reflejarse datos de plantas arvenses asociadas en el sistema productivo con NDVI superior, ya que la escala de visualización (área pixel), se podría superar el dosel de las plantas de café, en donde se tomó la lectura con el sensor de contacto (Figura 2).

**Figura 2.**

*Análisis de imagen primer momento de evaluación – Sensor remoto*



Respecto al segundo momento de evaluación a diferencia del primero momento en el sensor de contacto se obtuvo una media de 0,56 es decir, que el promedio de los datos de NDVI presentó un descenso. Esto posiblemente causado por un mayor gasto energético en el cultivo. Así mismo, se obtuvo una moda de 0,58 y una curtosis de 6,852, datos que aumentaron considerablemente y a pesar de que los datos conservan una atención normal, estos tuvieron una dispersión mayor versus la primera evaluación (Tabla 2).

**Tabla 2.**

*Análisis de tendencia central segundo momento de evaluación – Sensor de contacto*

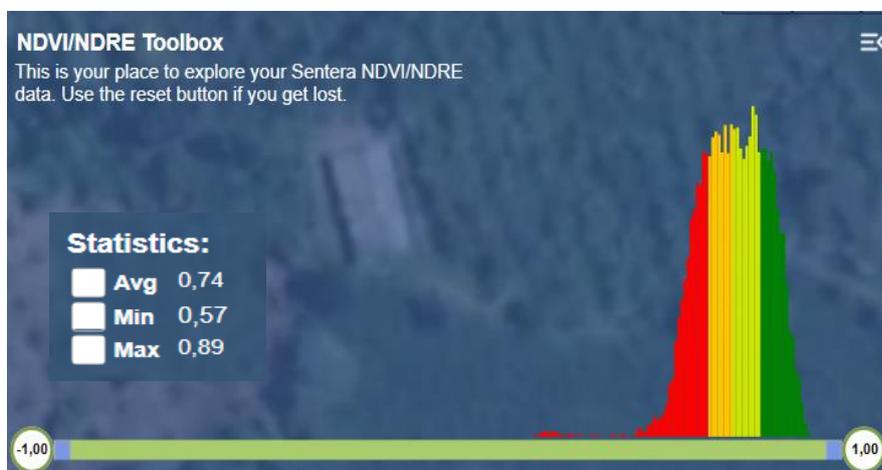
Estadístico	NDVI	Estadístico	NDVI
Media	0,56	Coefficiente de asimetría	-1,700
Error típico	0,005	Rango	0,294
Mediana	0,57	Mínimo	0,348
Moda	0,58	Máximo	0,642

Desviación estándar	0,044	Cuenta	78
Varianza de la muestra	0,002	Coefficiente de variación	7,731
Curtosis	6,852	Nivel de confianza (95,0%)	0,010

En el análisis de imagen derivado de la segunda evaluación realizada con el sensor remoto, se obtuvo una media de 0,74, un mínimo de 0,57 y un máximo de 0,89, observando que en este caso al igual que los valores de la evaluación con el sensor de contacto disminuyeron y fueron más dispersos con respecto al primer momento (Figura 3).

### Figura 3.

#### *Análisis de imagen segundo momento de evaluación – Sensor remoto*



En el tercer momento de evaluación con respecto al sensor de contacto, la tendencia presentó un comportamiento ascendente con un valor para la media de 0,63, una moda de 0,64, una curtosis de 8,403 y un coeficiente de variación de 7,3. Aspectos que al igual que en los momentos previos para el sensor remoto, tuvieron la misma tendencia (Tabla 3 y Figura 4). Este comportamiento fisiológicamente puede ser explicado por el hecho de que, en esta evaluación, el fruto de café se encuentra desarrollado fisiológicamente con un máximo crecimiento y acumulación de materia seca y entrando a una fase de maduración final, aspectos

que repercuten en que el área foliar de la planta recupere actividad fotosintética y por ende ofrezca mayores valores de reflectancia que en un cultivo sano se evidencian con mayor valor de NDVI.

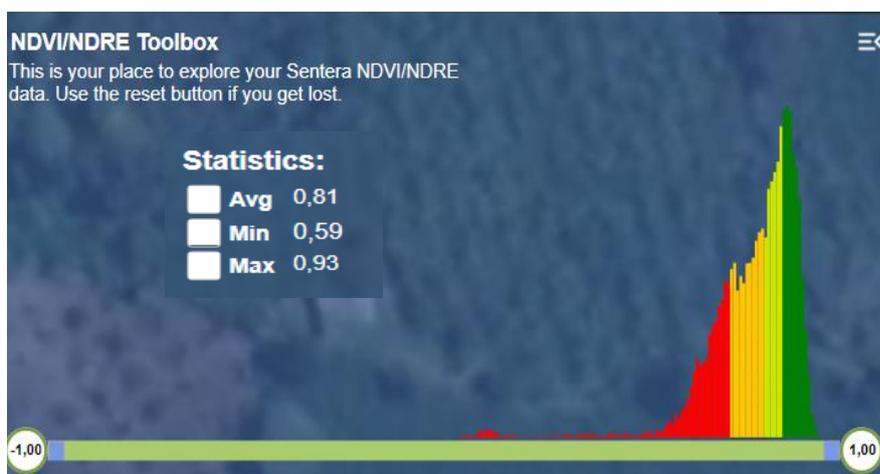
**Tabla 3.**

*Análisis de tendencia central tercer momento de evaluación – Sensor de contacto*

Estadístico	NDVI	Estadístico	NDVI
Media	0,63	Coefficiente de asimetría	-2,193
Error típico	0,005	Rango	0,302
Mediana	0,64	Mínimo	0,403
Moda	0,64	Máximo	0,705
Desviación estándar	0,046	Cuenta	78
Varianza de la muestra	0,002	Coefficiente de variación	7,300
Curtosis	8,403	Nivel de confianza (95,0%)	0,010

**Figura 4.**

*Análisis de imagen tercer momento de evaluación – Sensor remoto*

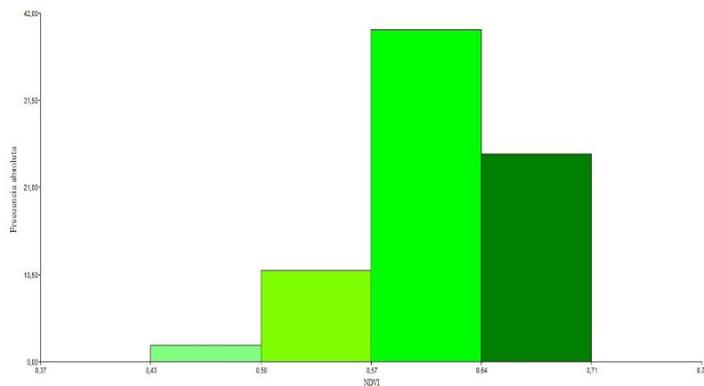


## Análisis de distribución de frecuencias

La figura 5 muestra el histograma de frecuencia del índice NDVI, en el primer momento de evaluación, en la cual se observa que, poseen el 82.05% de datos agrupados con valores superiores a 0,57.

**Figura 5.**

*Histograma distribución de frecuencias índice NDVI primera evaluación – sensor de contacto*



**Tabla 4.**

*Distribución de frecuencias índice NDVI primera evaluación*

Variable	Clase	LI	LS	MC	FA	FR	FAA	FRA
NDVI	1	0,43	0,50	0,465	2	0,026	2	0,026
NDVI	2	0,50	0,57	0,535	12	0,154	14	0,179
NDVI	3	0,57	0,64	0,605	42	0,538	56	0,718
NDVI	4	0,64	0,71	0,675	22	0,282	78	1

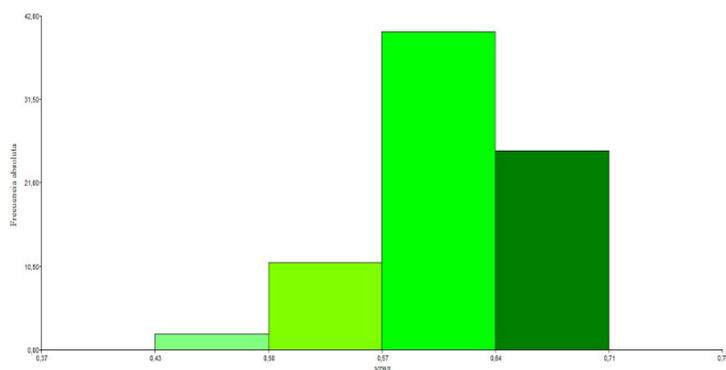
LI: limite inferior; LS: limite superior; MC: mediana de la clase; FA: frecuencia absoluta FR: frecuencia relativa FAA: frecuencia absoluta acumulativa; FRA: frecuencia relativa acumulativa

Al encontrar datos agrupados con valores superiores a 0.33, como valor límite mínimo a ser considerado como vegetación medianamente sana, se evidencia en el presente, una masa vegetal con una totalidad en estado sano y un aproximado de 25% de la totalidad de datos en un rango de vegetación muy sana (Tabla 4). Para efectos de interpretación en teledetección, indica plantas que absorben más luz roja y reflejan más luz infrarroja (IRC) que aquellas con problemas fisiológicos. Este patrón puede variar entre plantas vecinas, con la edad de la hoja, y con la época del año en que las hojas son producidas. En comparación con plantas vigorosas, los cultivos con alteraciones presentan problemas como amarillamiento, y cambios en las propiedades radiativas del follaje, que pueden ser detectadas y medidas (Martin *et al.* 2005, Samborski *et al.* 2009). De esta manera, los resultados del presente, evidencian un comportamiento acorde a esta interpretación ya que, el estatus sanitario del cultivo evidenciaba un manejo homogéneo y la medida con el sensor refleja ese comportamiento.

La figura 6, indica el histograma de frecuencia del índice NDVI, en el segundo momento de evaluación, encontrándose en la etapa II de desarrollo del fruto. Se observa una disminución en los valores del NDVI, los cuales representan la energía reflejada por las plantas de café. La totalidad de los valores se encuentra dentro de rangos de 0.35 a 0.64, en este caso el 100% de la vegetación se encuentra en un estado medianamente sano (Tabla 5). La magnitud de la energía disminuye y, en consecuencia, se considera mayor consumo energético por la alteración de la relación fuente vertedero. Una fracción considerable de la energía acumulada en el fruto proviene de las reservas contenidas en las hojas más próximas a ellos (Valarini *et al.*, 2005), durante esta etapa el fruto crece de manera acelerada y adquiere su tamaño final, así como también ocasiona la caída de las hojas, debido principalmente a la gran movilización de los nutrientes hacia los frutos, fenómeno que reduce su concentración en el tejido foliar (Chaves *et al.*, 1984). Aspecto que pudo haber disminuido el volumen energético reflejado al sensor.

**Figura 6.**

*Histograma distribución de frecuencias índice NDVI segunda evaluación – sensor de contacto*



**Tabla 5.**

*Distribución de frecuencias índice NDVI segunda evaluación*

Variable	Clase	LI	LS	MC	FA	FR	FAA	FRA
NDVI	1	0,35	0,42	0,386	1	0,013	1	0,013
NDVI	2	0,42	0,49	0,459	1	0,013	2	0,026
NDVI	3	0,49	0,57	0,531	35	0,449	37	0,474
NDVI	4	0,57	0,64	0,604	41	0,526	78	1

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

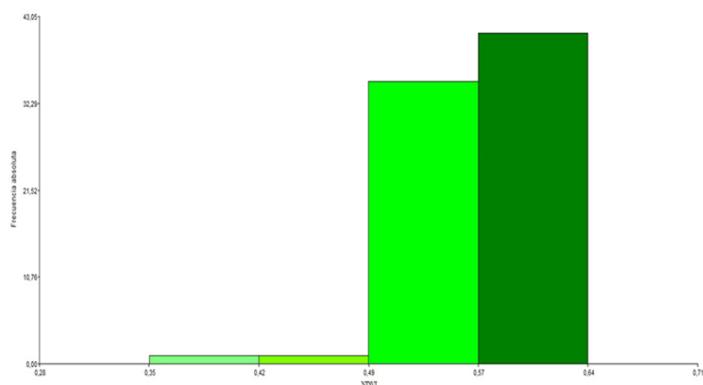
En el histograma de frecuencia del índice NDVI, en la IV cuarta etapa de fructificación (tercer momento de evaluación), se evidencia la homogeneidad nuevamente de los datos (Figura 7, Tabla 6). Esto posiblemente, debido a que las plantas recuperan su estatus energético ya que el fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado y comienza a madurar.

En las plantas de café, cuando las hojas terminan de crecer se convierten en fuentes potenciales de nutrimentos que son movilizados hacia los frutos y raíces, lo que conlleva a la reducción de

éstos en la hoja (Sadeghian y Salamanca, 2015), por lo tanto, en este caso donde el fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado y comienza a madurar, el proceso de distribución de fotoasimilados desde los órganos autótrofos fotosintéticos como son las hojas maduras o bien desarrolladas (Chang *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2019) hacia los órganos vertederos, en este caso los frutos, disminuye (Aluko *et al.*, 2021), recuperándose así poco a poco, parte del 80% de los fotoasimilados de las hojas que son transportados hacia los órganos vertederos en forma de azúcares solubles (Osorio *et al.*, 2014).

**Figura 7.**

*Histograma distribución de frecuencias índice NDVI tercera evaluación – sensor de contacto*



**Tabla 6.**

*Distribución de frecuencias índice NDVI tercera evaluación*

Variable	Clase	LI	LS	MC	FA	FR	FAA	FRA
NDVI	1	0,40	0,47	0,438	1	0,013	1	0,013
NDVI	2	0,47	0,55	0,513	3	0,038	4	0,051
NDVI	3	0,55	0,63	0,588	19	0,244	23	0,295
NDVI	4	0,63	0,70	0,663	55	0,705	78	1

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

Se encontraron en su totalidad nuevamente datos correspondientes a vegetación medianamente sana y muy sana, este último estado con un aproximado de 65% de la totalidad de datos, como se indica en la tabla 6.

### **Análisis comparativo imágenes multiespectrales**

De acuerdo con los datos tomados por el sensor remoto se obtuvieron polígonos para cada uno de los momentos de evaluación en donde se pueden diferenciar que parte del área del lote cubre cada clase NDVI, se determinaron cuatro clases representadas cada una por los colores rojo, naranja, amarillo y verde en valores de inferior a mayor respectivamente (colores contrastantes para definir las clases mas no representan cualitativamente el status sanitario del cultivo, si lo hace el valor como tal), los cuales estaban dentro de un rango determinado por los datos en cada evaluación (Figura 8).

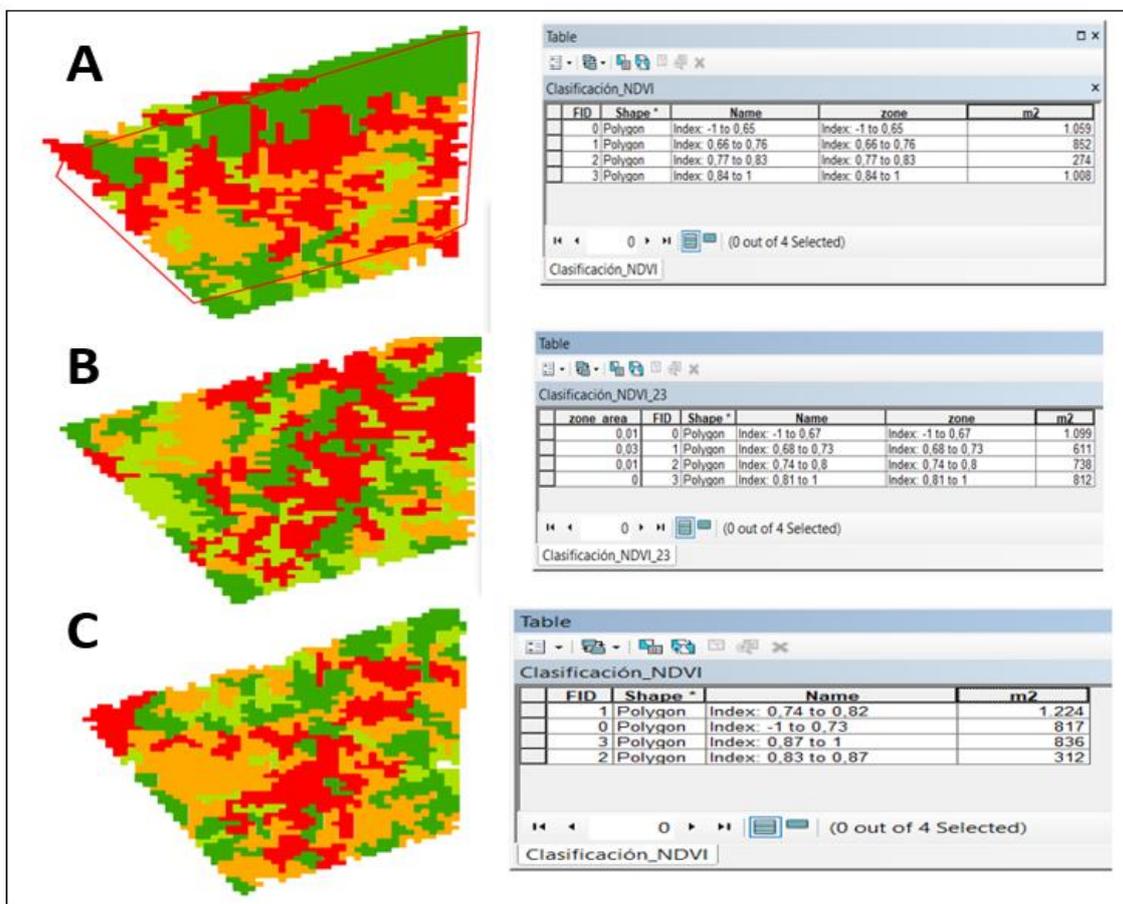
En el primer momento de evaluación (Figura 8A), se determinó la primera clase de NDVI en un rango de -1 a 0,65 representados en el polígono con el color rojo con un área de 1059 m<sup>2</sup>, la segunda clase de 0,66 a 0,76 con el color naranja con un área de 852 m<sup>2</sup>, la tercera clase de 0,77 a 0,83 con el color amarillo con un área de 274 m<sup>2</sup> y la cuarta clase de 0,84 a 1 con el color verde con un área de 1004 m<sup>2</sup>, con respecto a la evaluación cabe mencionar que los datos presentan relación con el análisis descriptivo en donde valores por encima de 0.6 de NDVI ocupan mas del 50% del área del lote.

En cuanto al segundo momento de evaluación (Figura 8B), se determinó la primera clase de NDVI en un rango de -1 a 0,67 representados en el polígono con el color rojo con un área de 1099 m<sup>2</sup>, la segunda clase de 0,68 a 0,73 con el color amarillo con un área de 611 m<sup>2</sup>, la tercera clase de 0,74 a 0,8 con el color naranja con un área de 738 m<sup>2</sup> y la cuarta clase de 0,81 a 1 con el color verde con un área de 812 m<sup>2</sup>.

En el tercer momento de evaluación (Figura 8C) se determinó la primera clase de NDVI en un rango de -1 a 0,73 representados en el polígono con el color rojo con un área de 817 m<sup>2</sup>, la segunda clase de 0,74 a 0,82 con el color naranja con un área de 1224 m<sup>2</sup>, la tercera clase de 0,83 a 0,87 con el color amarillo con un área de 312 m<sup>2</sup> y la cuarta clase de 0,88 a 1 con el color verde con un área de 836 m<sup>2</sup>.

**Figura 8.**

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

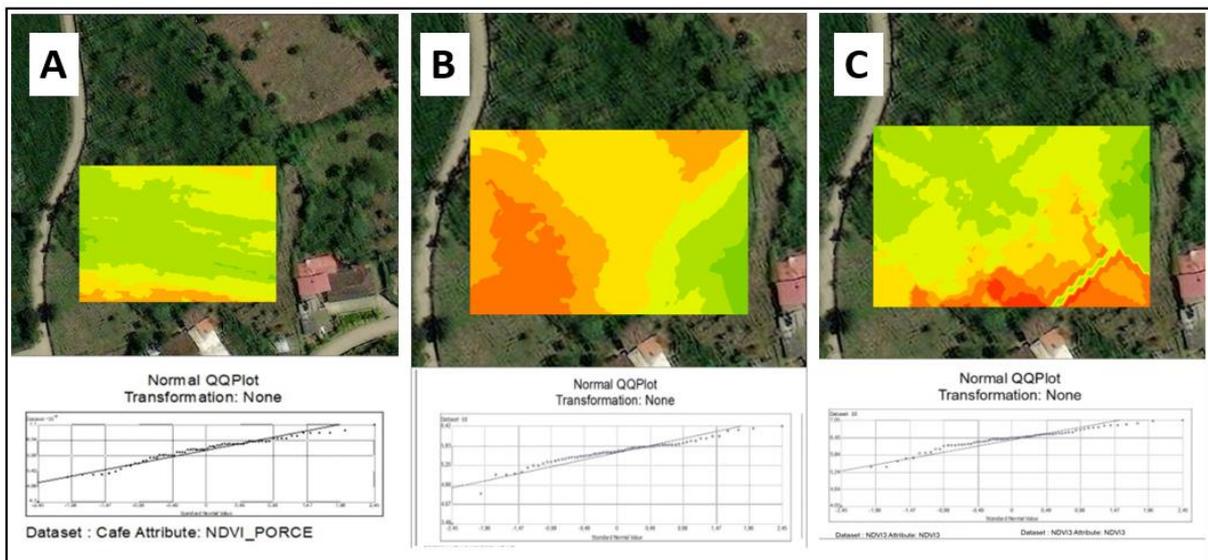


Por otra parte, el análisis de interpolación por el metodo de Voronoi para los datos derivado del sensor de contacto, evidenciaron en primer lugar que los datos para todos los momentos de

evaluación, fueron representados en forma adecuada a este metodo por su ajuste a la pendiente de la grafica generada (Figura 9). En este sentido, los mapas de interpolacion evidencian tendencias similares a las derivadas del sesnor remoto, pero con un area inferior de cobertura por rango de color debido a que en estas, se consideraron solo valores de NDVI en hojas y sus buffer derivados de la interpolación. Los valores correspondiente a cada color en la grafica son los decritos en las tablas uno, dos y tres en donde a aprtir de los valores base, se realizo la interpolacion.

**Figura 9.**

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



De esta manera etapas I y IV del desarrollo del fruto corresponden al nivel máximo de vigor vegetal; “el índice de NDVI, como se indicó más arriba, cuantifica a través de la reflectancia, la vigorosidad de las plantas utilizando la cantidad de energía roja que es absorbida por la clorofila” (Meneses *et al.*, 2016) y la cantidad de energía del infrarrojo cercano que es reflejada por la estructura celular de la hoja. Por lo tanto, una vez que las hojas de café finalizan su expansión, pasan a ser exportadoras potenciales de nutrientes. La degradación de compuestos

contenidos en las células foliares maduras conlleva a la migración de fotoasimilados y nutrientes minerales móviles hacia vertederos como raíces y frutos, con la subsecuente reducción de éstos en la hoja motivo por el cual se reduce la reflectancia de la energía y se incremento la absorción de la misma en la etapa II de la fructificación; de esta manera se concluye que conforme al desarrollo del fruto ocurren cambios en la concentración de los nutrientes en estos diferentes estadios del crecimiento y, por consiguiente, en su cantidad acumulada y la producción de la biomasa (Laviola *et al.*, 2007).

## CONCLUSIONES

La evaluación realizada, permitió establecer una homogeneidad relativa entre los dos sistemas evaluados. Sin embargo, la conclusión precisa del estatus fitosanitario del cultivo no podría derivarse únicamente de la percepción remota ya que, por la limitante representada en la escala de visualización, puede sesgarse por variaciones espaciales de cobertura.

Los sistemas de medición del NDVI evaluados, representan la oportunidad de diagnóstico relacionado con sanidad del cultivo. En este caso, a través de la reflectancia de las bandas espectrales que conforman el índice NDVI, el cual se mostró sensible a los cambios fenológicos de desarrollo de fruto.

## **RECOMENDACIONES**

En el estado de desarrollo tecnológico actual, es necesario para diagnósticos precisos, combinar la tecnología de sensores remotos y demás métodos de obtención directa de información. Esto con el fin de realizar un proceso metodológico para este caso, que permita utilizar el NDVI como indicador de alteraciones en los cultivos; con la plataforma aérea (Vehículo aéreo no tripulado) se podrá realizar un muestreo para la identificación de sectores críticos, de donde posteriormente se tomaría una muestra para ser utilizada mediante el sensor de contacto. Permittiéndonos así la caracterización de la sanidad de cultivos o estado fitosanitario de los mismos de forma más eficiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agüera, F.; Carvajal, F.; Pérez, M. (2011). Measuring sunflower nitrogen status from an unmanned aerial vehicle-based system and an on the ground device. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-33-2011>, 2011.
- Alcaldía municipal de Consacá, (2020). Plan de desarrollo municipio de Consacá 2020 – 2023. [https://alcaldiaconsacanarino.micolombiadigital.gov.co/sites/alcaldiaconsacanarino/content/files/000385/19246\\_plan-de-desarrollo-municipio-de-consaca-definitivo.pdf](https://alcaldiaconsacanarino.micolombiadigital.gov.co/sites/alcaldiaconsacanarino/content/files/000385/19246_plan-de-desarrollo-municipio-de-consaca-definitivo.pdf)
- Ángeles, R.; Geraldi, M.; Marini, F. (2020). Procesamiento digital de imágenes satelitales. Metodologías y técnicas 2020. <http://hdl.handle.net/11336/135234>
- Balbontin, C.; Odi, M.; Poblete, R.; Garrido, J.; Campos, I.; Calera, A. (2016). Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40534.pdf>.
- Betancourt, G. (2021). Evaluación del potencial de datos espectrales para el diagnóstico de Marchitez Letal (ML) en Palma de Aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81322>
- Candiago, S.; Remondino, F.; De Giglio, M.; Dubbini, M.; Gattelli M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. Remote Sensing. <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4026>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2014). La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones. <https://cenicafe.org/es/publications/avt0441.pdf>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2022). Informe Anual Cenicafé 2022. <https://doi.org/10.38141/10783/2022>
- Chang, T.; Zhu, X.; Raines, C. (2017). Source-sink interaction: A century old concept under the light of modern molecular systems biology. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx002>.

- Chaves, J.; Sarruge, J. Alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/15510>
- Crosta, A. (1993). Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas. [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1901009/mod\\_folder/content/0/1\\_Capa\\_Indice\\_Introducao.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1901009/mod_folder/content/0/1_Capa_Indice_Introducao.pdf)
- Cuervo, F. (2016). Utilización de imágenes multiespectrales para el análisis del comportamiento de la firma espectral del lago de tota y la influencia de los cultivos de cebolla. <http://hdl.handle.net/10654/15602>.
- De Marchi, M.; Penasa, M.; Battagin, M.; Zanetti, E.; Pulici, C.; Cassandro, M. (2011). Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS). Malvern Panalytical. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/spectroscopy/near-infrared-spectroscopy>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2022). Café de Nariño. Datos de interés. <https://narino.federaciondecafeteros.org/narino/>
- Fernandez, J.; Ordieres, F.; Martínez, A.; Gonzalez, F.; Alba, R.; Lostado, Lorza. (2009). Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica. [https://www.researchgate.net/publication/260265697\\_Redets\\_Inalambricas\\_de\\_sensores\\_teor%C3%ADa\\_y\\_aplicacion\\_practica](https://www.researchgate.net/publication/260265697_Redets_Inalambricas_de_sensores_teor%C3%ADa_y_aplicacion_practica).
- Fuentes, F.; Ortega, S.; Rivera, M.; Bardeen, M.; Moreno, M. (2019). Comparison of vegetation indices acquired from RGB and Multispectral sensors placed on UAV. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609861>
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador. <https://doi.org/10.35537/10915/34487>

- Greenbaum, D. (1989). Introduction to geological remote sensing. Course notes for students, British Geological Survey, Keyworth (Nottingham).  
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>
- Gudiña, V. (2023). Espectro visible. <https://definicion.de/espectro-visible/>
- Hernández, E. (2015). Uso de NDVI para determinar impactos ambientales en la vegetación ocasionados por la intervención del hombre mediante técnicas.  
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5864>
- Herrera, E. (2019). Razón pública. La revolución tecnológica. <https://razonpublica.com/como-promover-la-innovacion-tecnologica-en-el-campo-economia-naranja-rural-y-agrotech/>
- Jiménez, A.; Massa, P. (2015). Producción de café y variables climáticas: El caso de Espíndola, Ecuador. [http://iies.faces.ula.ve/Revista/Articulos/Revista\\_40/rev40JimenezT.htm](http://iies.faces.ula.ve/Revista/Articulos/Revista_40/rev40JimenezT.htm)
- Kogut, P. (2021). Teledetección: Tipos Y Aplicaciones De Los Sensores Remotos.  
<https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>
- Kross, H.; McNairn, D.; Lapen, M.; Champagne, C. (2015) “Assessment of Rapid Eye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops”. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.002>
- Kumar, A.; Sharma, R.; Thukral, A. (2018). “Comparison of different reflectance indices for vegetation analysis using Landsat-TM data”.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.013>
- Laviola, B.; Martínez, H.; Salomão, L.; Cruz, C.; Mendonça, S. (2007). Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes Cenicafé.  
<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/85FhTBS6rwYv4r8xJ54jTPq/?lang=pt>

- Leon, W. (2023). Evaluación de herramientas de análisis de datos espectrales para la identificación y cuantificación de la madurez temprana en papa. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84484>
- López, A. (2023). Percepción Remota. <https://www.centrogeo.org.mx/investigacion/percepcion-remota#:~:text=La%20Percepci%C3%B3n%20Remota%20es%20una,datos%20de%20mediciones%20in%20situ.>
- López, H.; García, J.; Barrientos, E.; Gómez, J.; Pérez, A. (2016). Método no destructivo para evaluar el vigor vegetal en especies forestales cultivadas en vivero. Sistema Internacional de Agronomía. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/1765>
- Magne, J. (2015). Diseño e implementación de un sistema controlable de imagen NDVI adaptable a una plataforma aérea remota. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10486>
- Martin, K.; Hodgen, P.; Freeman, K.; Melchiori, R.; Arnall, D.; Teal, R.; Mullen, K.; Desta, K.; Phillips, S.; Solei, J.; Caviglia, O.; Solari, F.; Bianchini, A.; Francis, D.; Schepers J.; Hatfield, J.; Raun, W. 2005. Plant-to plant variability in corn production. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2005.0129>
- Martínez, J. (2005). Percepción remota Fundamentos de Teledetección Espacial. <https://es.scribd.com/doc/130578537/Fundamentos-de-Teledeteccion-Espacial>
- Mather, P. (2004). Computer processing of remotely-sensed images. 2nd ed. John Wiley & Sons, GBR. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/10700/13288>

- Mayorga, D.; Pazos, M.; Uvidia, M. 2019. Uso del índice normalizado de vegetación para la elaboración de planos de cultivo. <http://200.14.53.83/index.php/opuntiabrava/article/view/760>.
- Meneses, V.; Velásquez, D.; Téllez, J. (2016). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones.
- Muñoz, P. (2013). Centro de Información de Recursos Naturales. Apuntes de teledetección: índices de vegetación. CIREN. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>
- Núñez, M.; Menéndez, M. (2016). El uso de los sensores remotos en los recursos naturales. <http://eprints.natura.unsa.edu.ar/id/eprint/10>
- Obregón, N. (2021). Geomatas. Tipos de teledetección. <https://geomatas.com/que-tipos-de-teledeteccion-existen/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/sustainable-agriculture/es/>
- Osorio, S.; Ruan, Y.; Fernie, A. (2014). An update on source-to-sink carbon partitioning in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 5, 516. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00516>.
- Parlamento Europeo. (2021). La inteligencia artificial y su uso. Construir un sistema alimentario sostenible: la estrategia de la UE. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200827STO85804/que-es-la-inteligencia-artificial-y-como-se-usa>
- Pérez, J. (2023). Espectro electromagnético. <https://definicion.de/espectro-electromagnetico/>
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34292019000100075](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292019000100075)

- Qiu, T.; Crow.; Wagner, W.; Zhao, T. (2019). "Effect of vegetation index choice on soil moisture retrievals via the synergistic use of synthetic aperture radar and optical remote sensing". <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.015>
- Revelo, D.; Mejía, J.; Montoya, B.; Hoyos, J. 2020. Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>
- Rivera, L.; Montoya, B.; Obando, F. (2019). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol22\\_num1\\_art:1578](https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578)
- Rodrigues, J.; Inzé, D.; Nelissen, H.; Saibo, N. (2019). Source-Sink Regulation in Crops under Water Deficit. *Trends in Plant Science*, 24(7), 652-663. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.04.005>.
- Rossius, S. (2012). Reconocimiento de objetos mediante Webcam en tiempo real. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/29009/Reconocimiento%20de%20objetos%20en%20tiempo%20real%20mediante%20WebCam.pdf>
- Rouse, J.; Haas, R.; Schell, J.; Deering, D.; Harían, J. (1974). Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022555/downloads/19740022555.pdf>
- Sadeghian K. S. y A. Salamanca J. (2015) Micronutrientes en frutos y hojas de café. <https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Micronutrientes.pdf>
- Salamí, E.; Barrado, C.; Pastor, E. (2014). UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing. <https://doi.org/10.3390/rs61111051>

- Samborski, SM; Tremblay, N; Fallon, E. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendation. *Agronomy Journal* 101(4):800-816.
- Schiaffino, M. (2006). Navegación autónoma basada en visión estereoscópica y lógica difusa. [https://tesis.blanque.com.ar/tesis/Home\\_files/Tesis\\_Paula\\_Schiaffino.pdf](https://tesis.blanque.com.ar/tesis/Home_files/Tesis_Paula_Schiaffino.pdf)
- Sharma, R.; Kajiwara, K.; Honda, Y. (2013). Automated extraction of canopy shadow fraction using unmanned helicopter-based color vegetation indices. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0822-4>
- Sishodia, R.; Ram, R.; Sudhir, S. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Soubry, I.; Patias, P.; Tsioukas, V. (2017). Monitoring vineyards with UAV and multi-sensors for the assessment of water stress and grape maturity1. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131807485>
- Trejo, L.; Aguasca, R.; Cabrera, J.; Galvan, B. (2016). Technology review, standards and applications of the UAV in engineering. <http://dx.doi.org/10.6036/8741>
- Tucker, C. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Valarini, V.; Bataglia, O.; Fazuoli, L. Macronutrientes em folhas e frutos de cultivares de café arábica de porte baixo. <https://www.scielo.br/j/brag/a/yqjJcLv8xqkCjDjP4NBCrtP/>
- Villegas, H. (2008). Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>
- Viña, A.; Gitelson, L.; Nguy, R.; Peng, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf are index crops, *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010>

Wendling, M. (2010).

Sensores. <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>

Zheng, H.; Cheng, T.; Li, D.; Zhou, X.; Yao, X.; Tian, Y.; Cao, W.; Zhu, Y. (2018). Evaluation of RGB, Color-Infrared and Multispectral Images Acquired from Unmanned Aerial Systems for the Estimation of Nitrogen Accumulation in Rice. <https://doi.org/10.3390/rs10060824>

Zúñiga, J. (2018). Application of remote sensors for analysis of the vegetative state of oil palm cultivation by means of the normalized difference vegetation index (NDVI) and spectral signatures by means of aerial photographs. <http://hdl.handle.net/10654/20387>