

Evaluación fenológica de un cultivo de papa, mediante índices de vegetación, a partir del uso de drones en el municipio de pasto, departamento de Nariño.

Vanessa Camila Rojas Huertas

Universidad de Nariño

Facultad de ciencias agrícolas

Programa de Ingeniería Agronómica

San Juan de Pasto, Colombia

2022

Evaluación fenológica de un cultivo de papa, mediante índices de vegetación, a partir del uso de drones en el municipio de pasto, departamento de Nariño.

Vanessa Camila Rojas Huertas

Director

David Andrés Calvache Muñoz m.sc.

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo

Universidad de Nariño

Facultad de ciencias agrícolas

Programa de ingeniería agronómica

San Juan de Pasto, Colombia

2022

### **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 Nariño.

**Nota de aceptación**

---

---

---

**David Andrés Calvache Muñoz m.sc**

**Director de tesis**

---

**Javier García Alzate**

**Jurado**

---

**Carlos Andrés Benavides Cardona**

**Jurado**

### **Agradecimientos**

La autora de este trabajo expresa sus agradecimientos al Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos de la Universidad de Nariño, al financiamiento por la vicerrectoría de investigaciones e interacción social, y en especial al presidente de este trabajo de grado, MSc. David Andrés Calvache.

A todos mis profesores por el tiempo dedicado, y las enseñanzas académicas, que llevaré conmigo en mi transitar profesional.

## **Resumen**

La escasa implementación de alternativas tecnológicas en el sur de Colombia, como son los (UAV) o drones en la agricultura, atrasan diferentes procesos de mejoría en rendimiento e inocuidad en la producción de alimentos de relevante importancia como la papa. Para esto, se buscó definir el uso de dispositivos sensoriales, que permitan obtener datos importantes sobre la salud de los cultivos, en menor tiempo y de forma precisa, logrando tomar decisiones que mejoren la rentabilidad de los agricultores. En este estudio se hizo uso de un sensor especializado, que captura imágenes multiespectrales a través de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y rojo visible (RED), a fin de evaluar la respuesta espectral de un cultivo de papa. Las imágenes obtenidas permitieron calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), con el fin de comparar zonas diferenciadas, que posteriormente fueron verificadas en campo, para establecer las causas de valores negativos en el cálculo de las bandas. Se encontró que en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, hubo zonas con índices bajos (-0.3 a -0.4), de acuerdo a la presencia de suelo desnudo o vegetación nula, y en etapas posteriores como floración y llenado, presencia de valores positivos (0.6 y 0.9) en casi toda la superficie estudiada, al igual que algunos valores negativos (-0.3 y -0.4), que evidenciaron problemas de desarrollo, o presencia de especies invasoras. Los resultados obtenidos demuestran que los índices de vegetación, permiten identificar características y problemas en el cultivo de papa, de tal forma que se evidencia la viabilidad técnica de esta herramienta tecnológica en los sistemas productivos.

**Palabras clave:** Infrarrojo cercano, Imágenes multiespectrales, NDVI, SAVI, sensor, rojo visible.

### **Abstract**

*The scarce implementation of technological alternatives in the southern Colombian region, such as Unmanned Aerial Vehicles (UAV) or drones in agriculture, delay various improvement processes in yield and safety in the production of foods of relevant importance such as potatoes. For this, it was sought to define the use of sensory devices, which allow obtaining important data about health of crops, in less time and accurately, making decisions that improve the profitability of farmers. In this study, a specialized sensor was used to capture multispectral images by Near Infrared Analysis (NIR) and visible red (RED) bands, to evaluate the spectral response of a potato cultivation. The images obtained allowed us to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), to compare differentiated areas, which were later verified in the field, to establish the causes of negative values in the calculation of the bands. It was found that in the early stages of crop development, there were areas with low indices (-0.3 to -0.4), according to the presence of bare soil or null vegetation, and in later stages such as flowering and filling, presence of positive values. (0.6 and 0.9) in almost the entire studied area, as well as some negative values (-0.3 and -0.4), which evidenced development problems, or the presence of invasive species. The results obtained show that the vegetation indices allow the identification of characteristics and problems in the potato crop, in such a way that the technical feasibility of this technological tool in productive systems is evidenced.*

**Keywords:** *Near infrared, Multispectral imaging, NDVI, SAVI, sensor, visible red.*

## **Contenido**

	<b>Pág.</b>
1. Introducción	14
2. Materiales Y Métodos	17
2.1 Localización	17
2.2 Diseño experimental	18
2.3 Equipos	18
2.4 Procesamiento de datos	20
2.5 Mapas de salud basados en índices de vegetación.	21
2.6 Análisis de la información	22
3. Resultados Y Discusión	24
3.1 Análisis estadístico NDVI y SAVI	30
3.2 Histogramas de frecuencia	32
4. Conclusiones	37
5. Recomendaciones	38
6. Referencias	40
7. Anexos	45



## **Índice de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características de ejecución de vuelo para cada etapa evaluada	19
Tabla 2. Estadísticas NDVI y SAVI, para cada etapa	31

## **Índice de figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ubicación del área de estudio, vereda Botana, corregimiento de Catambuco, Pasto, Nariño	17
Figura 2. Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de preparación	25
Figura 3. Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de brotación/retape	26
Figura 4. Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de floración	28
Figura 5. Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de llenado	29
Figura 6. Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de cosecha	30
Figura 7. Distribución NDVI y SAVI, etapa de preparación	33
Figura 8. Distribución NDVI y SAVI, etapa de brotación/retape	33
Figura 9. Distribución NDVI y SAVI, etapa de Floración	34
Figura 10. Distribución NDVI y SAVI, etapa de llenado y cosecha	35
Figura 11. SAVI basado en umbrales, etapas de floración, llenado y cosecha	38

## **Índice de anexos**

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Puntos georreferenciados tecnología GNSS – software Agisoft Photoscan	46
Anexo 2. Vista aérea del terreno, capturado por sensor Survey 2, plataforma aérea. Phantom 4 (UAV)	47

## **Glosario**

**Histograma de frecuencia:** Es la representación gráfica en forma de barras, que simboliza la distribución de un conjunto de datos o variable. Sirven para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o de la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua.

**Infrarrojo cercano:** es la región de longitud de onda más corta del espectro infrarrojo, situada entre la luz visible y el infrarrojo medio, aproximadamente entre 800 y 2.500 nanómetros, y está fuera espectro visible.

**Rojo visible:** Es la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz.

**UAV:** Vehículo aéreo no tripulado, hace referencia a una aeronave que vuela sin tripulación, la cual ejerce su función remotamente.

**Sensor:** Es un elemento «sensible» dentro de una cámara, aquello sobre lo cual se proyecta la luz dibujando una imagen que representa lo que la cámara proyecta.

**NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Es un simple indicador de la biomasa fotosintéticamente activa o, en términos simples, un cálculo de la salud de la vegetación.

**SAVI:** Índice de vegetación ajustado al suelo, que intenta minimizar las influencias de brillo del suelo.

**Vigorosidad vegetal:** Es el conjunto de propiedades que determinan la actividad y desempeño en el crecimiento favorable de lotes de semillas.

**Suelo desnudo:** Terreno agrícola sin residuos de plantas en la superficie, vulnerable a la

pérdida de nutrientes.

**Cobertura vegetal:** Capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomasas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales.

## **1. Introducción**

Actualmente en Nariño, la papa se cultiva en 38 de los 64 municipios que lo componen, de estos, representa especial importancia en 21 municipios descritos como área de influencia, en ellos, la presencia de un genotipo, variedad o cultivar particular, se ha basado principalmente en características asociadas a la comercialización a escala regional, restándole importancia a la innovación técnica. (Martínez et al., 2021, p. 21)

Debido a la gran demanda que tiene el cultivo de papa en el departamento de Nariño, y las diferentes necesidades sobre su manejo en cuanto a la presencia de problemas fisiológicos, se propone una nueva alternativa sostenible que abarca una renovación tecnológica, basada en el concepto de agricultura de precisión, considerada como una tecnología en desarrollo que modifica los sistemas existentes, y se une a otros nuevos para producir un conjunto de herramientas moderno y eficaz (Jojoa, 2017).

Es así como, las imágenes satelitales y fotografías aéreas, se han utilizado ampliamente a escala global, regional y local, arrojando resultados satisfactorios en estudios como: clasificación y mapeo de cultivos en tiempo real, identificación de etapas fenológicas y unidades térmicas de crecimiento, discriminación de variedades, monitoreo del riego y estrés nutricional, detección de daños por insectos plaga y enfermedades, etc (Raó, 2002).

En ese sentido, el uso de drones para el seguimiento del cultivo de papa y otros cultivos andinos, está ganando aceptación mundial, principalmente porque se reducen las limitaciones del sistema satelital, a la hora de capturar imágenes multiespectrales debido a que un dron equipado con cámaras especializadas permite obtener una mayor resolución de imagen y realizar vuelos en función de los cambios climáticos del área de estudio, y a la vez reducir el impacto ecológico negativo.

El monitoreo de la salud de los cultivos se puede realizar a través del análisis del coeficiente de reflexión o reflectancia, que es la relación entre la luz solar absorbida y la cantidad de energía solar reflejada por las plantas (Berger et al., 2019; Brenes, 2016). La reflectancia varía según las estructuras celulares, las características fisiológicas y la fase fenológica de los cultivos.

“El parámetro utilizado para relacionar la reflectancia de un cultivo con sus condiciones de salud se llama índice de vegetación, que es una combinación de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad a los cambios de vegetación” (Acosta y Mendoza, 2017, p. 14). Dicho índice se utiliza para detectar plantas sanas, afectadas o gravemente afectadas; el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) (Baihua y Burgher, 2015), puede medir la diferencia normalizada entre la respuesta espectral en el infrarrojo cercano y el rojo de las bandas de espectros visibles. Este índice permite caracterizar el cultivo a través de una escala de valores de -1 a 1, en la que los valores cercanos a -1 corresponderán a baja vigorosidad vegetal, y los valores cercanos a 1 a alta vigorosidad vegetal, dependiendo de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor.

El NDVI indica si la planta tiene buen vigor vegetativo y si dependiendo de ese factor, se encuentra el cultivo en óptimas condiciones de producción (Goel et al., 2002; García y Martínez, 2010; Lago et al., 2011).

La información recolectada a través del NDVI también permite generar mapas de condición de cultivo (Brenes-González, 2016), que son parcelas bidimensionales y georreferenciadas, con una escala de colores para la representación visual del índice de vegetación en una parte específica.

El mítico Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), presenta el inconveniente de ofrecer datos enmascarados por la reflectividad del suelo, en atención a lo cual, el índice SAVI se utiliza para corregir el NDVI por la influencia del brillo del suelo en áreas donde la cobertura vegetal es baja. Condiciones como la temperatura o la humedad pueden ejercer influencia en las bandas de trabajo analizadas y, por tanto, en los resultados ofrecidos por el indicador. En este caso, para evitar distorsiones en los valores de análisis cuando la vegetación se encuentra sobre suelos expuestos; el índice de vegetación SAVI tratará de evitar esta influencia del suelo sobre los resultados añadiendo un factor adicional (L) en la ecuación del NDVI que permitirá trabajar en escenarios donde el desarrollo vegetal sea incipiente (Marcial, 2017).

Con base en el contexto anterior, esta investigación tiene como objetivo, evaluar las diferentes fases del ciclo fenológico de un cultivo de papa, a través de imágenes derivadas de un sensor multiespectral, a partir de índices de vegetación, los cuales son (NDVI) y (SAVI).



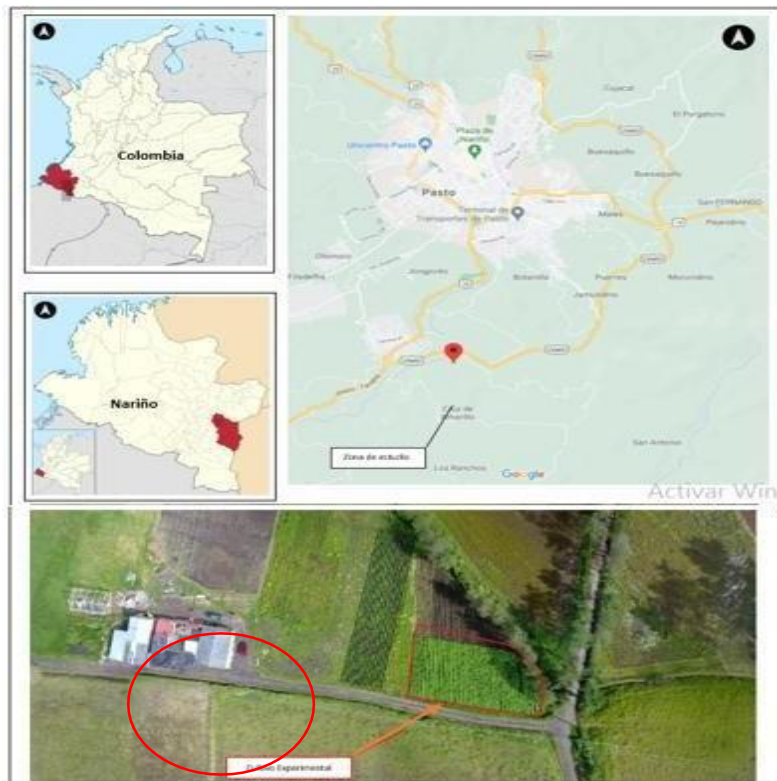
## 2. Materiales Y Métodos

### 2.1 Localización

El presente trabajo se realizó en la vereda Botana del corregimiento de Catambuco, en el municipio de Pasto (Nariño), en un predio localizado bajo las siguientes coordenadas: altitud de 2820 msnm, 01°09'12" LN y 77°18'31" LO, con una temperatura promedio de 12,6°C, 900 horas sol/año, humedad relativa del 79%, precipitación de 967 mm/año, evaporación promedio anual 994,4 mm y brillo solar promedio anual 1377 horas (IDEAM, 2018), sobre un lote comercial de papa criolla *Solanum tuberosum*, grupo Phureja, variedad Criolla Colombia (Figura 1).

#### Figura 1.

Ubicación del área de estudio, vereda Botana, corregimiento de Catambuco, Pasto, Nariño



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

## **2.2 Diseño experimental**

El diseño experimental que se utilizó en el ensayo fue totalmente descriptivo, debido a que se evaluaron variables independientes de acuerdo al contexto natural, para después ser analizados en campo, de acuerdo a las fórmulas brindadas por medio del sensor multiespectral, más el software Agisoft Photoscan. El área experimental del ensayo fue de 1000m<sup>2</sup>, con una densidad de siembra de 20.833 Plantas/ha.

## **2.3 Equipos**

En esta investigación, Como plataforma aérea para el sensor, se usó el vehículo aéreo no tripulado (UAV): “Phantom 4”, fabricado por la compañía DJI, con una velocidad de ascenso de 6m/s, altura máxima de hasta 500 m y un sistema de geolocalización GPS+GLONASS. Para la captura de imágenes aéreas se utilizó la cámara Survey2 - NDVI Red + NIR (<https://www.mapir.camera/products/survey2-camera-ndvi-red-nir>), fabricada por la compañía MAPIR (<https://www.mapir.camera/>), con una resolución de imágenes de hasta 16 megapíxeles, y con captura de longitudes de onda del sensor, para rojo visible de 660 nm e infrarrojo cercano de 850 nm.

Se empleó el software Mission Planner, para la planificación de vuelos, trazando polígonos del área de influencia y la grilla del vuelo, posteriormente se agendaron fechas y se establecieron horas adecuadas (entre 11:00 am y 1:00 pm) para capturar la mayor radiación fotosintéticamente activa. Las fechas de vuelo se establecieron considerando el ciclo fenológico del cultivo de papa: etapa de siembra, donde se prepara el suelo y se disponen las semillas escogidas en los surcos, la etapa de brotación y/o retape, que sucede cuando el tubérculo genera brotes, que crecen de forma vertical, atravesando la superficie del suelo.

En esta etapa se hace necesario volver a cubrir las plantas con sustrato nuevamente, como practica cultural de la zona, con el fin de generar mayor vigor en lo brotes que se están desarrollando. La etapa de floración que da origen al órgano floral, donde se aprecian botones florales y los primeros pétalos, los cuales darán origen a la inflorescencia. (Cadena, 2021, p. 34)

La etapa de llenado permite que las células de los tubérculos inicien su expansión por la acumulación de agua, nutrientes y carbohidratos, que tienen suma importancia para el desarrollo de los tubérculos, y, por último, “la etapa de cosecha, donde una vez alcanzada la floración del cultivo, el desarrollo del área foliar se detiene para luego comenzar a disminuir, dando paso a la maduración o senescencia del cultivo” (Cadena, 2021, p. 35). Las características de los vuelos realizados en cada etapa evaluada, se pueden apreciar en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Características de ejecución de vuelo para cada etapa evaluada*

<b>Etapa</b>	<b>Hora</b>	<b>Ángulo</b>	<b>Traslape</b>	<b>Altura</b>	<b>de GSD</b>	<b>Velocidad</b>
	<b>Captura</b>	<b>sensor</b>	<b>imágenes</b>	<b>vuelo (m)</b>	<b>cm/px</b>	<b>(m/s)</b>
<b>Preparación del suelo</b>	10:00	90°	75%	30	2,83	2
<b>Brotación</b>	/ 12:45	90°	75%	32	3,02	4
<b>Retape</b>						
<b>Floración</b>	13:05	80°	75%	35	3,30	3
<b>Llenado</b>	12:15	90°	75%	30	2,83	2
<b>Cosecha</b>	13:05	90°	75%	30	2,83	2

Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

## **2.4 Procesamiento de datos**

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se calculó para cada fase fenológica del cultivo, utilizando bandas espectrales roja e infrarroja cercana (NIR), siguiendo la metodología propuesta por Gates (1980) y optimizada por Senanayake et al. (2013).

Para mejorar los resultados gráficos del NDVI, se corrigieron las deficiencias derivadas de la contaminación del suelo y la presencia de áreas con alta biomasa que provocan saturación en la energía reflejada. Se aplicó un factor de ajuste, que caracteriza la cobertura vegetal, al NDVI (Xu et al., 2013), para mejorar la calidad informativa de las imágenes y obtener un índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). El NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) se calculó según la ecuación 1.

Ecuación 1.

$$\text{NDVI} = ((\text{NIR}-\text{RED})) / ((\text{NIR}+\text{RED}))$$

Donde: NIR: Reflectancia en luz infrarroja cercana. Red: Reflectancia en luz roja visible. (González, 2018, p. 10).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada presentó el inconveniente de ofrecer datos enmascarados por la reflectividad del suelo, en atención a lo cual, el SAVI se utiliza para corregir el NDVI por la influencia del brillo del suelo en áreas donde la cobertura vegetal es baja o nula. El SAVI (Índice de Vegetación de ajustado al suelo) se calculó según la ecuación 2. (GeoInova, 2021, párr. 1)

Ecuación 2.

$$\text{SAVI} = (((\text{NIR}-\text{RED})) / ((\text{NIR}+\text{RED}+\text{L}))) * (1+\text{L})$$

Donde: NIR: luz infrarroja cercana, Red: luz roja visible, L: factor de corrección del

brillo del suelo, definido como 0,5 para adaptarse a la mayoría de los tipos de cobertura terrestre, en este caso dependiendo de la densidad vegetal.

El factor L es el responsable de amortiguar la presencia del suelo a través de valores comprendidos entre 0 (para zonas con gran densidad vegetal) y 1 (para zonas con escasa densidad vegetal). “De esta forma, ante suelos con presencia de desarrollo vegetativo, el factor L pasa a valor 0, lo cual según” (Gisandbeers, 2021, párr. 1), no altera la ecuación y la hace equivalente a la ecuación del NDVI.

## **2.5 Mapas de salud basados en índices de vegetación.**

Las fotografías capturadas incorporan datos EXIF (Exchangeable image file format) con especificación para formatos de archivos de imagen usado por las cámaras digitales, en otras palabras, contienen metadatos que cubren un amplio rango de características de captura de cada imagen, a saber: fecha, hora, localización geográfica, configuración de la cámara, resolución y dimensiones de las fotografías, etc. Sin embargo, para establecer una mejor referencia espacial geográfica se asignaron puntos georreferenciados en campo mediante tecnología GNSS (5 en total) mejorando así la precisión de los productos finales.

Mediante el uso del software Agisoft PhotoScan se procesaron las fotografías, desplegando como producto final un mosaico orto-rectificado, esta herramienta también posibilitó la elaboración de un modelo digital de elevación (DEM), que permitió soportar el mapa base.

Una vez realizado el mapa base se procedió a utilizar herramientas informáticas basadas en modelos matemáticos orientados hacía procesos de triangulación de niveles digitales, que permiten asignar categorías para generar rangos, con lo que fue posible generar una colorimetría bajo una escala definida y valores establecidos en una referencia.

Finalmente, se generaron cinco ortofotos mosaicas de diferentes etapas del crecimiento del cultivo de papa (registrados en distintos periodos), las áreas de color verde claro representaron vegetación densa o sana, entre tanto, las zonas de color rojo y amarillo, simbolizaron vegetación dispersa, enferma o ausencia de vegetación. Asimismo, se evidenció que: las etapas de preparación, y brotación y/o retape, expusieron mayor superficie de suelo desnudo que otro tipo de cobertura, en consecuencia, se observaron colores rojos.

Entre tanto, las etapas de llenado y cosecha (en menor proporción la etapa de floración) exhiben mayor área de vegetación que otro tipo de cobertura, por lo tanto, se perciben colores verdes claros.

Cabe destacar que, en esta investigación, para el establecimiento del ensayo y por la naturaleza del mismo, no se empleó un diseño estadístico particular, por no considerarse la evaluación de respuesta a estímulos o tratamientos diferenciales sobre el cultivo objetivo.

En este caso, se buscó la caracterización del comportamiento de un factor a través de parámetros de medición temporal, por lo cual se realizó un análisis descriptivo, porque pese a identificar valores numéricos, estos corresponden a caracteres cualitativos mas no cuantitativos.

## **2.6 Análisis de la información**

Al efectuar los procesos estadísticos del proyecto de investigación, se tuvo en cuenta inicialmente la distribución de las variables estudiadas (índices de vegetación en diferentes etapas del cultivo), y en particular de los datos numéricos, tomando como referencia el comportamiento de cada una de las variables, de manera gráfica en el cultivo objetivo.

Para obtener datos más precisos, se usó medidas de tendencia central, los cuales indicaron el punto alrededor del cual se centraron los datos, para interpretar cualquier valor

en relación con los puntajes obtenidos de la captura de imágenes multiespectrales en cada etapa. También se elaboraron tablas de frecuencia, con el fin de analizar, sintetizar e ilustrar la información producida por los datos recopilados del estudio realizado, además de las herramientas y software mencionados para el proceso de toma y transformación de la información mencionada en ítems anteriores, los valores y datos numéricos necesarios para la interpretación numérica de las imágenes fueron procesados y analizados a partir del uso del software libre R Studio.

### **3. Resultados Y Discusión**

A través de la respuesta espectral del cultivo de papa, y determinando índices de vegetación en diferentes etapas fenológicas del mismo, se caracterizó el patrón espacio-temporal del sistema productivo ubicado en la vereda Botana, del municipio de Pasto. Dentro de los principales productos se obtuvo el Índice de Vegetación de diferencia Normalizada (NDVI), y el Índice de Vegetación ajustado al suelo (SAVI), a fin de analizar y comparar la influencia de la reflectancia del suelo en los índices espectrales de vegetación, que involucran longitudes de onda de las bandas del rojo visible (RED), y del infrarrojo cercano (NIR).

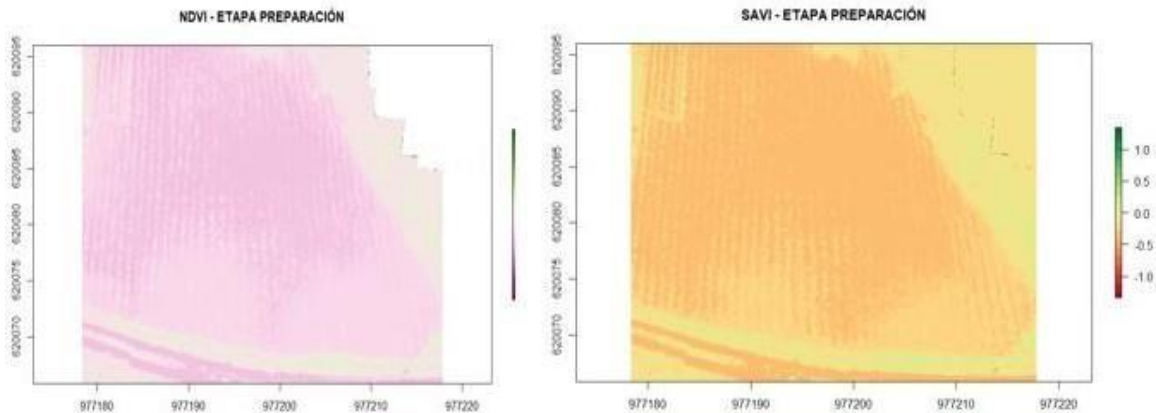
En las imágenes multiespectrales obtenidas se ilustra la distribución temporal de los índices NDVI y SAVI, simbolizando con color verde las zonas con mayor vigorosidad, y con colores morado amarillo y rojo, las áreas con deficiencias en nitrógeno, nutrientes o afectadas por algún factor, que no permiten el mayor valor de vigorosidad en toda la cobertura estudiada. Es importante mencionar que algunos valores de niveles digitales corresponden a superficies impermeables y suelo desnudo, que generan distorsión en la imagen y en los valores finales.

Tanto los resultados del NDVI como del SAVI en la etapa de preparación (cuando el suelo desnudo está expuesto), presentan de forma predominante valores negativos cercanos a -0.3 y -0.4 respectivamente. De la misma manera, se pueden apreciar algunos valores positivos, cercanos a 0, pero en zonas externas al sistema de producción de agrícola como se indica en la figura 2.



**Figura 2.**

*Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de preparación*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

Por otra parte, la etapa de brotación y retape (Fig 3), proceso que marca el inicio del estado de dominancia apical del cultivo, comienza después de que se coloca la semilla en los surcos y depende mucho de las condiciones climáticas y la variedad utilizada, en esta etapa se da la aparición de las primeras raíces y hojas sobre la superficie del suelo de forma acelerada, conduciendo una serie de cambios bioquímicos, especialmente por las demandas energéticas de los brotes en crecimiento. De acuerdo con esto en este estudio se llevó a cabo un manejo del cultivo conforme a las practicas guiadas por el mismo agricultor de la zona, donde se hizo el “retape”, práctica cultural reconocida, que consiste en volver a tapar la planta con sustrato, con el fin de propiciarle un valor agregado de vigorosidad a los brotes que se están desarrollando.

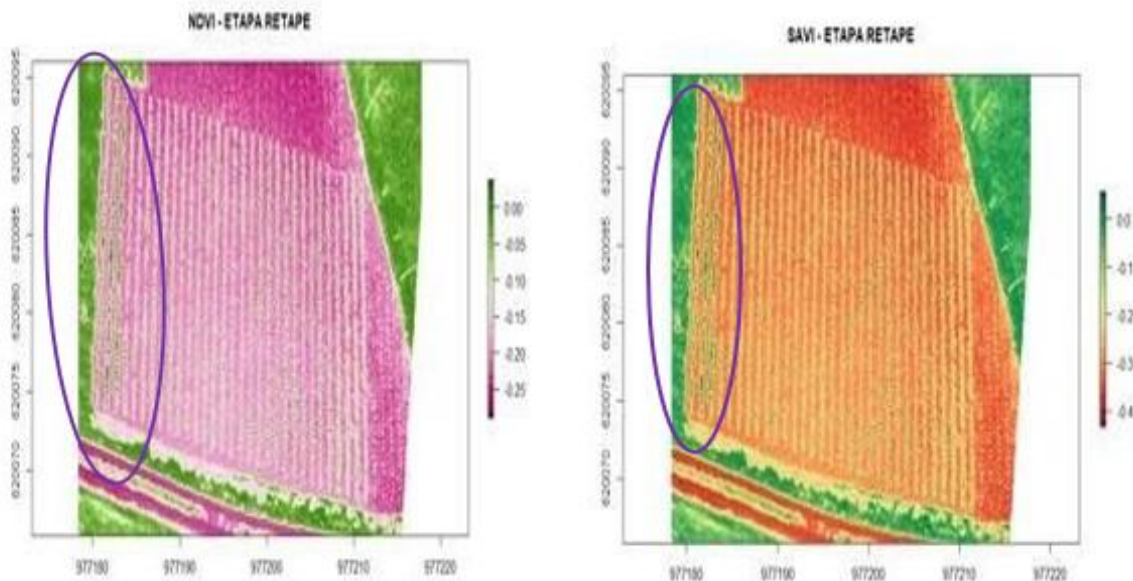
Los valores de los índices NDVI y SAVI para la etapa de brotación/retape, arrojaron valores negativos, (-0.2 y -0.4) respectivamente, esto debido a que el sensor capturó como suelo desnudo las plantas que fueron tapadas con sustrato nuevamente. Por otra parte, el cultivo de papa es altamente sensible a la competencia de malezas especialmente en las etapas tempranas de su desarrollo, por lo tanto se encontraron valores positivos en los bordes de

la zona estudiada, que indicaron presencia de malezas en el cultivo , entre ellas de la especie *Amaranthus hybridus* L, lo que puede ocasionar asfixia de las plantas en desarrollo, poniendo en riesgo los rendimientos e interfiriendo la labor de cosecha, además de tener en cuenta el efecto directo de las malezas por la competencia de agua y nutrientes, que son perjudiciales por ser hospederas de plagas y enfermedades.

Datos similares como el artículo llamado “Detección y control de malezas a través de parámetros normalizados”, publicado Mereti, et al. 2018, menciona que índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) , es eficaz para reconocer y controlar las malezas de cualquier cultivo , en sus primeros estados de desarrollo , lo que tiene como factores positivos, que le permitirá al usuario o agricultor, hacer una dosificación de herbicida más precisa e inteligente , ahorrando costos, y reduciendo el impacto ambiental negativo.

**Figura 3.**

*Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de brotación/retape*



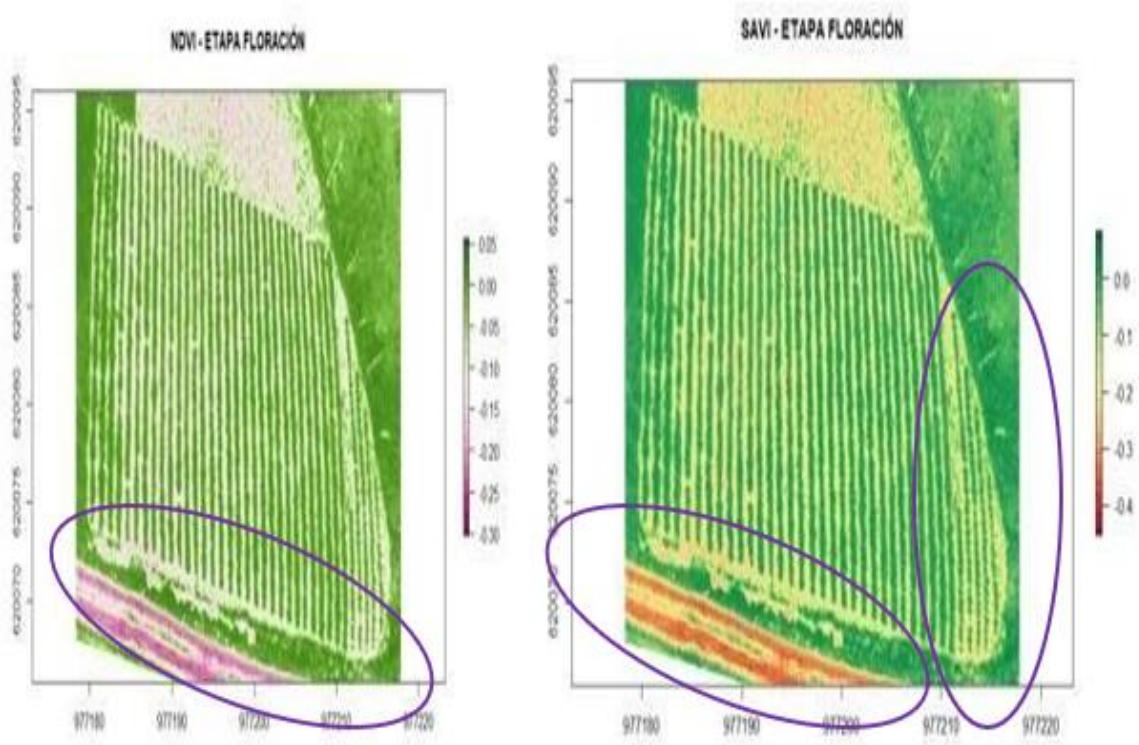
Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

La etapa de floración, es señal de que la semilla empieza a emitir estolones o que inicia la tuberización, y suele ocurrir en variedades precoces a los 35 días después de la siembra. En esta etapa interviene de forma preliminar el fotoperiodo, puesto que la luminosidad que reciben las plantas durante el día, incide en la función de los cloroplastos, desencadenando una serie de reacciones en las que interviene el dióxido de carbono y el agua, que ayudan a la formación de diferentes tipos de azúcares que pasan a formar parte de los tubérculos en desarrollo. Los valores de NDVI y SAVI, efectivamente arrojaron valores positivos en un 80% de la superficie evaluada (0.64 y 0.95) respectivamente, lo que señaló una buena respuesta espectral del cultivo, hacia las bandas del NIR capturadas por el sensor.

De igual manera también se obtuvieron valores negativos en los bordes del cultivo que evaluados en campo, correspondían a zonas con estrés hídrico, por problemas de encharcamiento, al igual que la presencia de malezas, entre las cuales predominaba la especie *Rumex crispus* L, conocida comúnmente con el nombre de “Lengua de Vaca”, altamente invasiva y resiliente que, al competir por nutrientes, vuelve vulnerable la aparición de plagas y enfermedades en el cultivo. Al comparar las zonas con problemas de malezas y mal drenaje, con las zonas en óptimas condiciones, se evidenció una clara diferencia en la fisiología de las plantas, en cuanto a desarrollo, crecimiento y floración (Fig. 4).

**Figura 4.**

*Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de floración*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

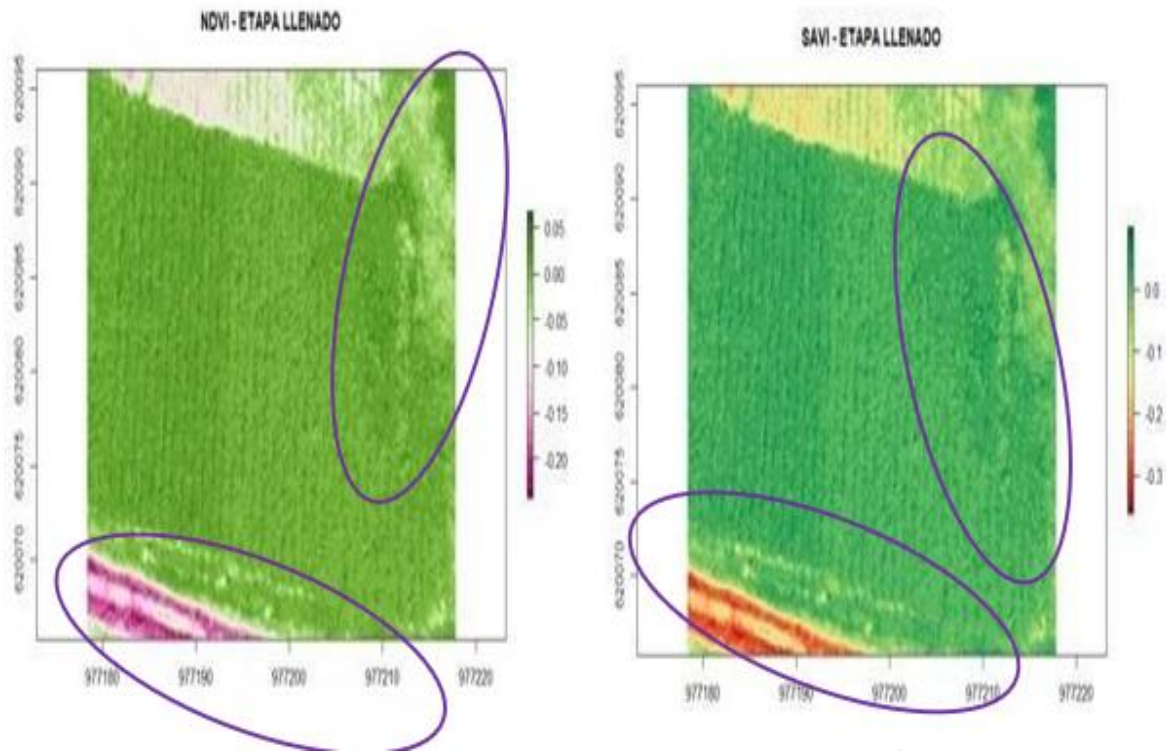
Los índices NDVI y el SAVI en la etapa de llenado, cuando el tubérculo alcanza su mayor madurez fisiológica, espacialmente, exhiben en mayor proporción y en toda la superficie del cultivo, valores positivos cercanos a 0.066 y 0.098 respectivamente. Lo que indica un porcentaje mayor en la vigorosidad de las plantas, así como un incremento en la tasa fotosintética de las mismas, debido a que comienza una rápida expansión foliar, gracias al desarrollo y crecimiento de hojas, siendo estas, las principales fuentes de foto asimilados, para el desarrollo del cultivo.

De igual manera se encontraron valores negativos cercanos a -1, en algunas zonas del cultivo que correspondieron a encharcamientos por mal drenaje, debido a precipitaciones que sobrepasaron los 35mm/semana, lo que puede causar daño a las raíces de las plantas, y lixiviar el nitrógeno debajo de la zona radicular poco profunda del cultivo, que se correlaciona directamente

con una expansión atrofiada del tubérculo. Haciendo la respectiva evaluación en campo, se vio reflejado que algunas plantas a pesar de haber emergido al mismo tiempo que las demás, presentaban un crecimiento tardío, de dos a tres entrenudos (Fig. 5).

**Figura 5.**

*Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de llenado*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

Finalmente, el NDVI y el SAVI en la etapa previa a la cosecha, cuando el tubérculo ha alcanzado el máximo potencial de expansión, se presentan valores positivos, en mayor proporción y en toda la superficie del cultivo, los más altos en comparación con las otras etapas, cercanos a 0.68 y 0.102 respectivamente (Fig. 6). Estos valores se presentan por la distribución de foto asimilados que empieza a bajar, y por lo tanto la planta presenta más fotosíntesis (incremento en la concentración de clorofila).

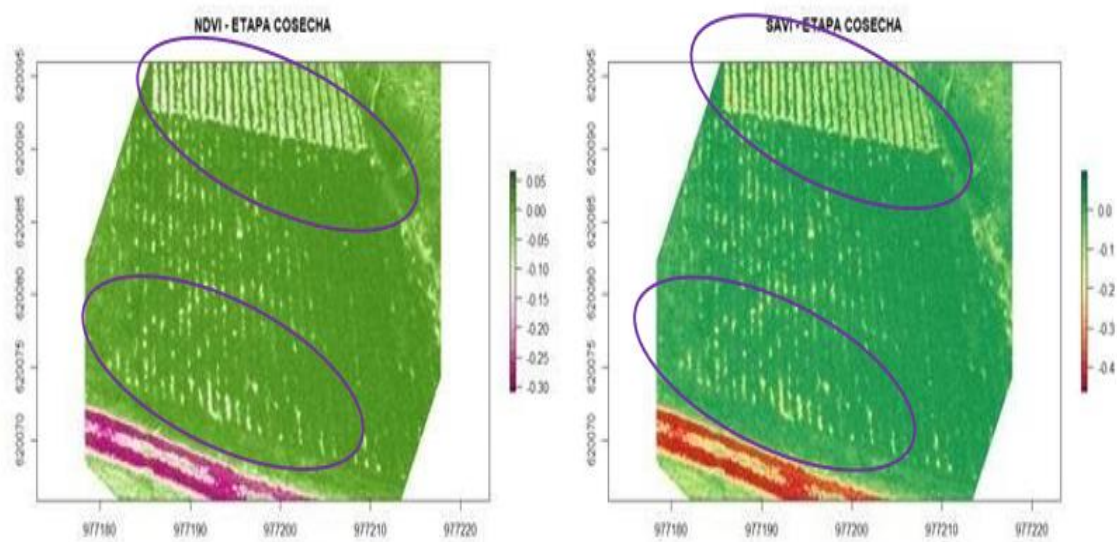


Cabe resaltar que también hubieron valores negativos en zonas específicas del cultivo, que provienen de saturaciones hídricas por precipitaciones constantes en el tiempo de evaluación, al igual que presencia de diferentes malezas, entre ellas, una gramínea como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), que según Pérez y Forbes (2011) compite por luz, agua y nutrientes; puede actuar como hospedantes de otras plagas; puede provocar diferentes anomalías en el cultivo y afectación en todo el desarrollo vegetativo por enfermedades.

El manejo del kikuyo implica rotación de cultivos, preparación del terreno, uso de variedades competitivas, y distanciamiento adecuado de siembra.

### Figura 6.

Índices de vegetación NDVI Y SAVI, etapa de cosecha



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

### 3.1 Análisis estadístico NDVI y SAVI

En la tabla 2, se ilustra un resumen de las estadísticas descriptivas de NDVI y SAVI (máximo, mínimo, promedio y desviación estándar). Estos índices tienen la misma tendencia a lo largo de las etapas de crecimiento del cultivo de papa; lo que está de acuerdo con diferentes

estudios que demostraron que la contribución del suelo disminuye, pero en cualquier caso podría permanecer significativa, dependiendo de la densidad de la planta, efectos de hilera, geometría del dosel, efectos del viento y fondo del suelo a lo largo del crecimiento del cultivo.

Otro punto importante por destacar es que el índice SAVI presentó tanto los valores máximos como los mínimos más altos, comparado con el NDVI en todas las etapas de crecimiento. Por último, la tabla 1 muestra que los valores de los índices de vegetación NDVI y SAVI fueron más altos en las etapas de llenado y cosecha que en otras etapas del crecimiento.

**Tabla 2.**

*Estadísticas NDVI y SAVI, para cada etapa*

	<b>Preparación</b>		<b>Brotación</b>		<b>Floración</b>		<b>Llenado</b>		<b>Cosecha</b>	
<b>Estadísticas</b>	<b>/Retape</b>									
	NDVI	SAVINDVI	SAVI	NDVISAVI	NDVI	SAVINDV	SAVI			
<b>Valor</b>	0.030	0.0400.038	0.056	0.0640.095	0.066	0.098	0.068	0.102		
<b>máximo</b>										
<b>Valor</b>	-0.300	-	-0.292	-0.437	-0.320-	-0.241	-	-	-	-
<b>mínimo</b>		0.400			0.479		0.361	0.317	0.473	
<b>Promedio</b>	-0.162	- 0.230-0.153	-0.230	-0.050-	0.076-0.004	- 0.006-	0.011-	0.016		
<b>Desviación estándar</b>	0.081	0.1290.078	0.116	0.0610.090	0.039	0.059	0.058	0.087		

Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

### **3.2 Histogramas de frecuencia**

La figura 7 muestra los histogramas de frecuencia de los índices NDVI y SAVI, en la etapa de preparación, en la cual se observa que, poseen (en mayor proporción) datos agrupados con valores inferiores a cero, en tan solo tres barras, lo que implica que hay poca variación (proporcionan insuficiente información) y; para efectos de interpretación en teledetección, indica planta muerta, ausencia de vegetación u objeto inanimado en la etapa de retape.

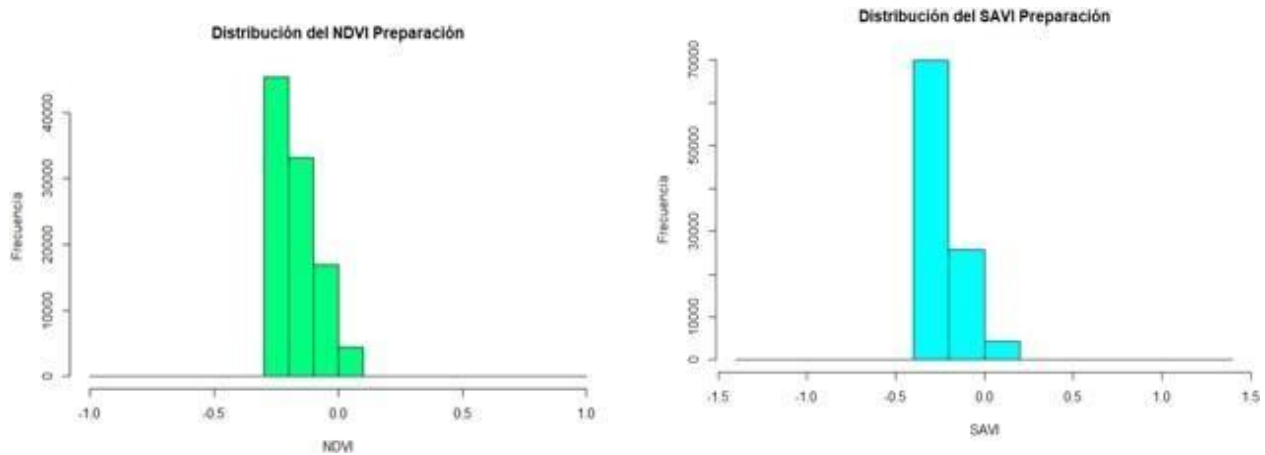
Se evidencia que, tienen (en mayor cantidad) datos agrupados con valores inferiores a cero. Sin embargo, en este caso existe mayor variación, lo cual advierte sobre las diferencias en el comportamiento de la energía reflejada por las coberturas presentes en el área de estudio. No obstante, los valores arrojados (por ser negativos) implican en teledetección planta cero vigorosa, ausencia de vegetación u objeto inanimado.

Los histogramas de frecuencia de los índices NDVI y SAVI, en la etapa de floración. Se nota que, si bien poseen datos agrupados con valores inferiores a cero (a causa de la contribución de la energía reflejada por el suelo), también contienen valores positivos (la mayor cantidad hasta el momento), que representan la energía reflejada por la flor de la planta de papa. En teledetección la magnitud de la energía reflejada aún es muy pequeña, por ende, se considera como vegetación dispersa o en etapas tempranas de crecimiento.



**Figura 7.**

*Distribución NDVI y SAVI, etapa de preparación*

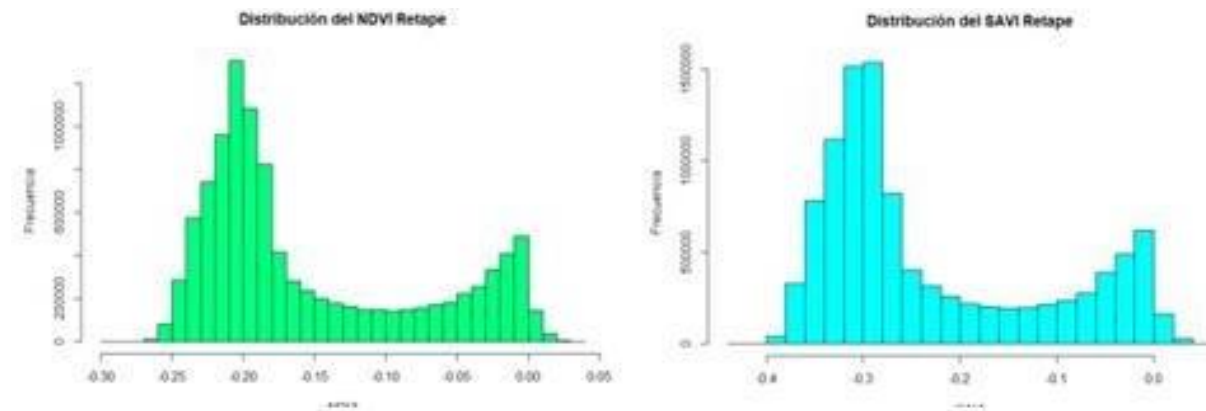


Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

La figura 8 y 9, muestra los histogramas de frecuencia de los índices NDVI y SAVI, en la etapa de retape y floración. Se evidencia que, tienen (en mayor cantidad) datos agrupados con valores inferiores a cero. Sin embargo, en este caso existe mayor variación, lo cual advierte sobre las diferencias en el comportamiento de la energía reflejada por las coberturas presentes en el área de estudio. No obstante, los valores arrojados (por ser negativos) implican en teledetección planta muerta, ausencia de vegetación u objeto inanimado.

**Figura 8.**

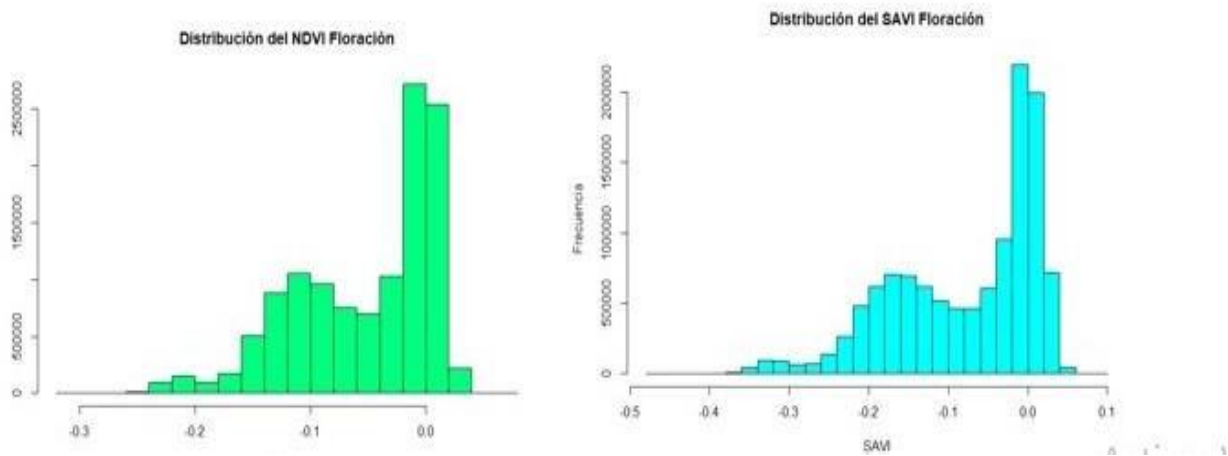
*Distribución NDVI y SAVI, etapa de brotación/retape*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

**Figura 9.**

*Distribución NDVI y SAVI, etapa de Floración*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

La figura 10 muestra los histogramas de frecuencia de los índices NDVI y SAVI, en la etapa de llenado. Se observa en mayor proporción valores positivos, que representan la energía reflejada por las plantas de papá; en cuanto a los valores negativos algunos están en el interior de la zona de estudio y la mayor cantidad en el exterior.

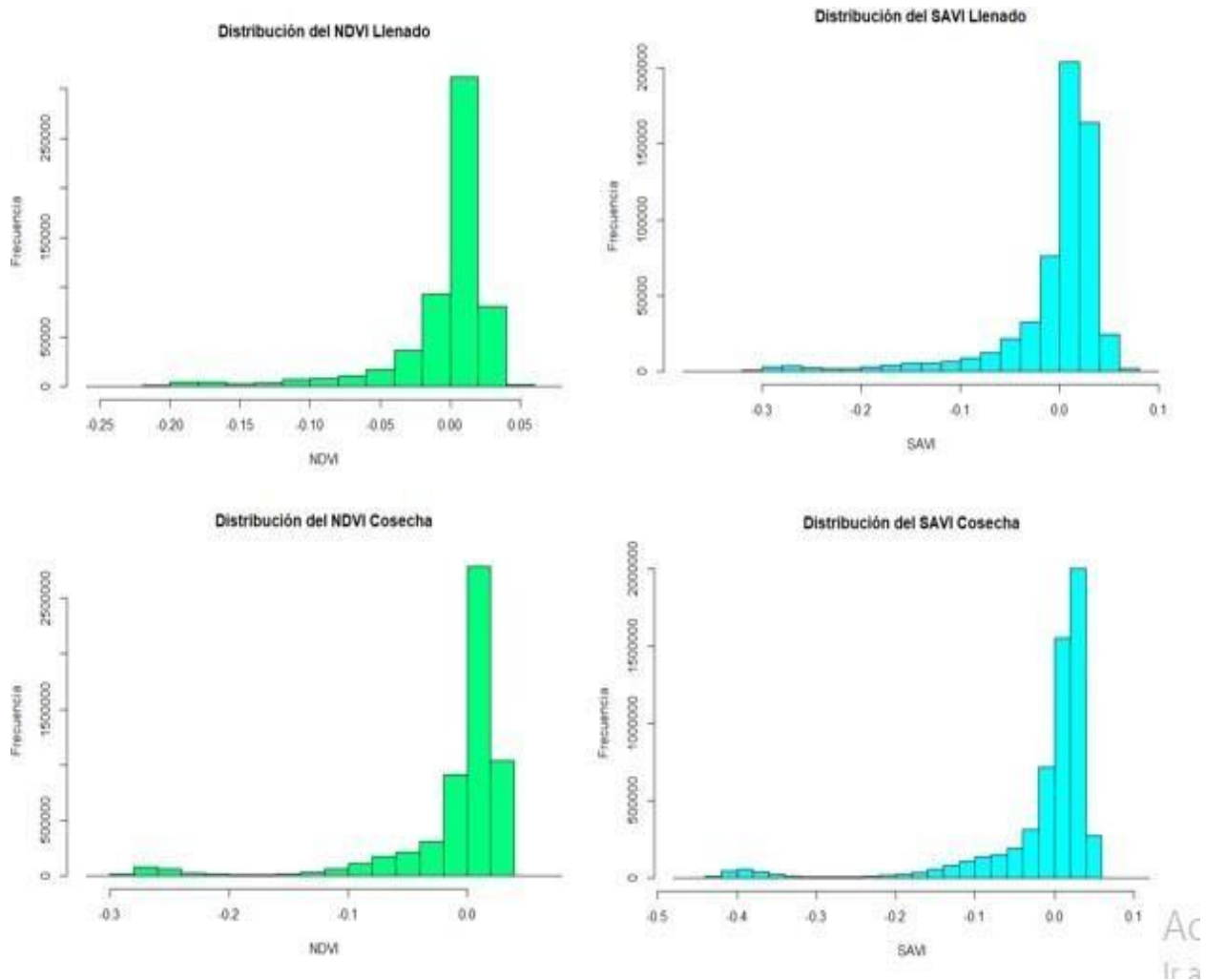
La magnitud de la energía reflejada sigue siendo muy pequeña, en consecuencia, se considera como vegetación enferma, dispersa o en etapas tempranas de crecimiento. En otras investigaciones para esta etapa del desarrollo del cultivo de papa se reportaron en promedio valores de 0.33 para NDVI y 0.30 para SAVI.

Los histogramas de frecuencia de los índices NDVI y SAVI, en la etapa de cosecha. Se evidencia en mayor proporción valores positivos, que representan la energía reflejada por las plantas de papá (la mayor cantidad al comparar con las otras etapas del desarrollo); en cuanto a los valores negativos algunos están en el interior de la zona de estudio y la mayor cantidad en el exterior.

La magnitud de la energía reflejada sigue siendo muy pequeña, en consecuencia, se considera como vegetación enferma, dispersa o en etapas tempranas de crecimiento. En otras investigaciones para esta etapa del desarrollo del cultivo de papa se reportaron en promedio valores de 0.29 para NDVI y 0.24 para SAVI.

**Figura 10.**

*Distribución NDVI y SAVI, etapa de llenado y cosecha*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

En resumen, dos etapas de crecimiento, a saber: preparación y retape exponen valores negativos de NDVI y SAVI, que de acuerdo con la literatura científica corresponden a vegetación escasa, enferma o con deficiencias en nitrógeno, nutrientes o agua. Por otro lado, tres etapas de

desarrollo, esto es: floración, llenado y cosecha presentan valores positivos de NDVI y SAVI, no obstante, el tamaño de estos índices no corresponde a vegetación sana, de 0.6 en adelante se reporta en la literatura, donde también se halló que los valores bajos de NDVI y SAVI “equivalen a cultivos secos, de baja productividad y altamente estresados; el factor climático y la distribución de la precipitación pluvial, junto al edafológico, limitan la productividad de la papa y determinan zonas de alta, media o baja productividad” (Olivares, 2019, p. 115).

Por contraste, las investigaciones reportan que, para cultivos de papa se han registrado datos de NDVI y SAVI en el rango de 0.4 a 0.8. Estos valores, deben permanecer estables o disminuyen ligeramente durante la etapa de maduración, debido a una declinación en el nivel de clorofila de las hojas que genera un cambio en la arquitectura del dosel y continúa hasta el final de la cosecha.

Las superficies de alta productividad y rendimiento corresponden al nivel máximo de vigor vegetal; “el índice de NDVI (y SAVI), 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, p. 2); y la cantidad de energía del infrarrojo cercano que es reflejada por la estructura celular de la hoja. Para la zona de estudio estos valores estuvieron en el rango de -0.050 y 0.102, cifras consideradas en la literatura como vegetación escasa o enferma.

Se recomienda confrontar la información espectral con datos de tratamiento del cultivo: clima, paisaje, suelo, nutrientes, nitrógeno, agua, etc. En vista de que, para cultivos de papa el NDVI (o SAVI) disminuye drásticamente cuando existen condiciones desfavorables o la disponibilidad de alguno de los elementos mencionados decrece; las plantas tienden “a absorber menos radiación solar, aumentando su reflectancia en el rango visible y absorbiendo más la radiación en la porción del infrarrojo cercano” (Olivares et al., 2019, p. 113).

#### **4. Conclusiones**

La teledetección y el uso de plataformas aéreas permiten optimizar el rendimiento del cultivo de papa, de forma precisa y eficiente, reduciendo el impacto ambiental, y los costos de producción, gracias a la información proyectada en imágenes multiespectrales que facilitan obtener series temporales para hacer seguimiento del estado fenológico del cultivo.

Los procesos fisiológicos previos a la cosecha presentan los valores más altos en la evaluación, debido a que, en la resolución temporal, el sensor utilizado captó mayor cantidad, calidad y desarrollo de vegetación; mientras que los valores más bajos se ven enmarcados en las etapas iniciales del cultivo, debido al poco vigor reflejado, lo que indica vegetación escasa, o baja intensidad de crecimiento vegetativo, debido a la presencia de malezas o estrés hídrico.

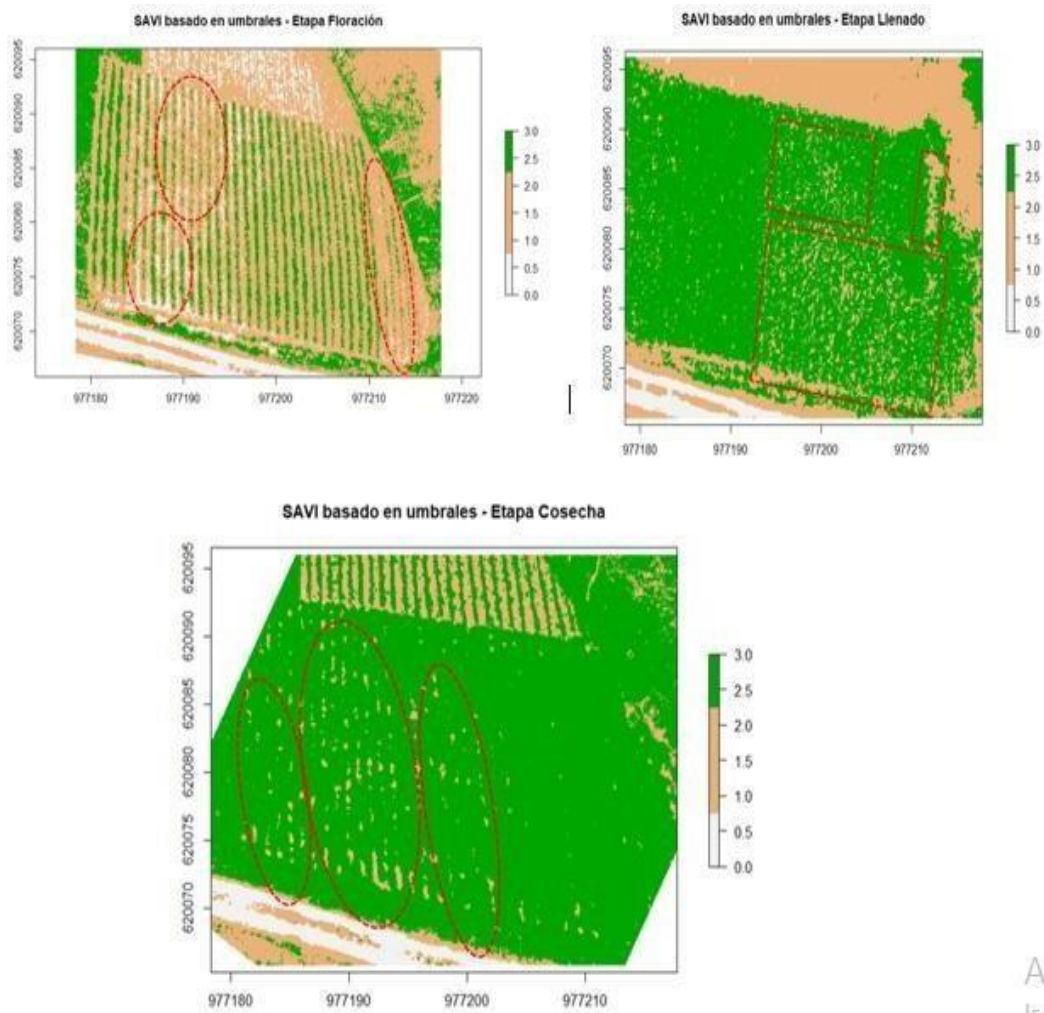
El uso de los índices de vegetación derivados de análisis sensorial de energía permite conocer la situación general del sistema de producción de papa, en el que se destaca el SAVI frente al NDVI, ya que discrimina de mejor manera la cubierta vegetal homogénea que se presenta en el cultivo de papa.

## 5. Recomendaciones

Este estudio ratificó que la percepción remota brinda una visión sinóptica de las zonas agrícolas, faculta un seguimiento temporal de las fases de desarrollo con objeto de zonificación del cultivo y posee un gran potencial para su uso en la papa. La figura 11, representa tres etapas del crecimiento: floración, llenado y cosecha, segmentadas y clasificadas en tres grandes categorías: ausencia de vegetación (0-1), vegetación enferma (1-2), vegetación sana (2-3).

**Figura 11.**

*SAVI basado en umbrales, etapas de floración, llenado y cosecha*



Nota. Fuente: la presente investigación-año 2023.

Los índices de vegetación se aplican para identificar puntos de respuesta espectral específica del cultivo. Por tal razón, en la figura 10, se ha identificado tres áreas que arrojaron diferente respuesta espectral, donde se recomienda efectuar evaluaciones en campo; “analizando las características del entorno, suelos, micro relieve, humedad del suelo y estado actual del cultivo para establecer posibles causas que expliquen las diferencias en la respuesta espectral” (Meneses et al., 2016, p. 7).

## 6. Referencias

- Abdel-Rahman, E. (2008). La aplicación de técnicas de teledetección a la producción de caña de azúcar ( *Saccharum* spp. Híbrido): una revisión de la literatura. *REv. International journal of remote sensing.*, 29(13), 3753–3767.
- Alcaldía municipal de Pasto (2014). *Plan de ordenamiento territorial de Pasto 2014 - 2027*.  
<https://www.pasto.gov.co/index.php/nuestras-dependencias/secretaria-de-planeacion/plan-de-ordenamiento-territorial>
- Alonso, D. (2020). *NDVI: Qué es y cómo calcularlo con SAGA desde QGIS - MappingGIS*.  
<https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>
- Austin, R. (2010). *El origen e historia de los drones*. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2015/03/Los-Drones-y-sus-Aplicaciones-a-la-Ingenieria-Civil-fenercom-2015.pdf>
- Bongiovanni, R. (2006). *Procisur40. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. <http://www.procisur.org.uy/agricultura-de-precision-integrando-conocimientos-para-una-agricultura-moderna-y-sustentable/es>
- Cadena, F. (2021). *Análisis del impacto económico del cambio climático en cultivos de quinua (Chenopodium quinua), en la provincia de Chimborazo*. Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.
- Camera, M. (2020). *Calibrating Images in QGIS with MAPIR Plugin*.  
<https://www.mapir.camera/pages/calibrating-images-in-qgis-with-mapir-plugin>



Canada., N. R. (2020). *Remote Sensing Tutorials*. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>

Canllahui, M. (2013). *Determinación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc)*. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Papa/El%20cultivo%20de%20la%20papa%20en%20Guatemala,%202002.pdf>

Compañía DJI. (2016). *Phantom 4 Visionary Intelligence.Elevated Imagination*. <https://www.dji.com/phantom-4/info>

Cortez, M. (2002). *Guía Técnica. Cultivo de La Papa. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal*. <https://docplayer.es/5817796-guia-tecnica-cultivo-de-la-papa.html>

Di Leo, N. (2015). *Drones: nueva dimensión de la teledetección*. Universidad Nacional de Rosario.

Egusquiza, R. (2000). *La papa: Producción, transformación y comercialización*. Convenio MSP.

Federación Nacional de Papa-FEDEPAPA. (2018). *Boletín de productividad en Nariño*. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2020/06/Bolet%c3%adn-regional-Nari%c3%b1o-2020.pdf>

Federación Nacional de Papa-FEDEPAPA. (2020). *Federación de papa. Boletín de papa Nariño*. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2020/05/Bolet%C3%ADn-regional-Nari%C3%B1o-2020.pdf>

Gómez, J. A., y Cadena, M. C. (2017). *Validación De Las Fórmulas De Evapotranspiración*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales– IDEAM.

- González, M., y Mayorga, Z. L. (2018). Normalized difference vegetation index for rice management in El Espinal, Colombia. *Rev. Dyna*, 85(205), 47-56.
- Hoyos, H. C. (1993). *Cultivo de la papa en la region Cajamarca*. Instituto Nacional De Investigación Agraria-INIA.
- International Potato Center-CIP. (2017). *Cipotato*. <https://cipotato.org/es/potato/potato-facts-and-figures/>
- Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias-INIAP. (2011). *Ficha técnica fripapa*. <http://eva.iniap.gob.ec/web/papa/>
- Jojoa, N. M. (2017). *Evaluación de diferentes dosis de fertilizantes de npk para el cultivo de arveja (Pisum sativum L.) en el Municipio de Puerres, Departamento de Nariño*. Universidad de Nariño.
- Marcial, M. (2017). *Determinación de variables agronómicas del cultivo de maíz mediante imágenes obtenidas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez, E., Insuasty, S., Benavides, C. A., Gómez, L. F., y Uribe, P. (2021). *Caracterización de los sistemas productivos de papa en Nariño 2015-2020: conocimiento para la toma de decisiones*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA
- Measuring, V. (2020). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>
- Meneses, V. B., Velásquez, D. Á., y Téllez, J. M. (2016). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. *Rev. Ambiental agua, aire y suelo*, 7(2).

MinAgricultura. (2016). *La eficiencia de uso de agua (eua) en el cultivo de papa*. Ministerio de Agricultura de Colombia.

MinAgricultura (2019). *Estrategia De Ordenamiento De La Producción*.  
<https://sioc.minagricultura.gov.co/Papa/Normatividad/Plan%20de%20Ordenamiento%20papa%202019-2023.pdf>

Montaldo, A. (1984). *Cultivo y mejoramiento de la papa*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-IICA.

Olivares, B., y López, M. (2019). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicada al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Rev. Cuadernos de Investigación UNED*, 11 (2), 112-121.

Pourrut, P. (1983). *Los climas del ecuador. Fundamentos explicativos*.

[https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers11-10/21848.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-10/21848.pdf)

Rao, K. (2002). *Springer Link*. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02942689>

Rueda, F., Peñaranda, L., Velásquez, W., y Diaz, S. (2015). Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientada a la estimación de la productividad decaña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). *Rev. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16 (1), 25-40.

Terranova. (1995). *Producción agrícola*. Terranova editores Ltda.

Uva, M. A. (2007). *AP-SIG: un SIG con funciones específicas para agricultura de precisión*. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Vega, J. A. (2013). Agricultura de precisión. *Rev. del ministerio de medio ambiente*, 16-27.

Xue, J., y Su, B. (2017). *Índices significativos de vegetación de teledetección: una revisión de desarrollos y aplicaciones*. <https://es.scribd.com/document/472144755/Xue-Su-Significant-Remote-Sensing-Vegetation-Indices-articulo2017-traducido#>

## **7. Anexos**

**Anexo 1. Puntos georreferenciados tecnología GNSS – software Agisoft Photoscan**



**Anexo 2. Vista aérea del terreno, capturado por sensor Survey 2, plataforma aérea.**

**Phanton 4 (UAV)**

