

Implementación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de café Castillo

“*Coffea arabica L.*” presente en la finca La Portada, vereda San Miguel,

Pandi- Cundinamarca.

Samuel Eduardo Lozano Mayorga

Carlos Andrés Torres Forero

Universidad De Cundinamarca

Facultad De Ciencias Agropecuarias

Tecnología En Cartografía

Fusagasugá

2019

Implementación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de café Castillo
“*Coffea arabica L.*” presente en la finca La Portada, vereda San Miguel,
Pandi- Cundinamarca.

Samuel Eduardo Lozano Mayorga

Carlos Andrés Torres Forero

Trabajo de grado para optar el título de Tecnólogo en Cartografía

Director

Edier Fernando Ávila Vélez

Ingeniero Catastral y Geodesta, Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Magister en Tecnologías de la Información Geográfica

Universidad De Cundinamarca

Facultad De Ciencias Agropecuarias

Tecnología En Cartografía

Fusagasugá

2019

Nota de aceptación

Edier Fernando Ávila Vélez

Director de Proyecto

Carlos Francisco Morantes

Jurado

José Tarsicio Quiroga Velásquez

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron a la realización de este proyecto.

A nuestro director Edier Fernando Ávila por las constantes jornadas de asesorías y consultas.

Al Ingeniero Maicol Beltrán y al Ingeniero Javier Lozano de quienes recibimos acompañamiento y ayuda cuando lo necesitamos.

A nuestros profesores que han dejado huella y caminos abiertos en el proceso de aprendizaje y formación.

Agradecemos al comité de cafeteros de Cundinamarca quienes complementaron nuestros conocimientos con sus asesores.

Al Señor Yeison Sánchez, quien apoyo nuestro proyecto y permitió realizar el estudio en sus cultivos.

A la Universidad de Cundinamarca por enriquecer nuestra formación con una planta docente de calidad, y nos facilitó el equipo de software y hardware con el cual se trabajó este proyecto.

A la Gobernación de Cundinamarca por dar el beneficio de formación profesional y tecnológica a muchos estudiantes del departamento.

A la Diseñadora Industrial Ana María Herrera por su disposición y ayuda.

Dedicamos a nuestros padres que nos guiaron con perseverancia y esfuerzo por el camino correcto, para así lograr los objetivos que nos propusimos a lo largo de este trayecto, sin ellos no habiéramos logrado ser las personas dedicadas y de admirar que somos hoy en día.

CONTENIDO

Resumen.....	21
1. Introducción.....	23
2. Planteamiento del Problema	25
3. Justificación.....	27
4. Objetivos.....	29
4.1. Objetivo General	29
4.2. Objetivos Específicos.....	29
5. Marco Referencial	30
5.1. Marco Contextual.....	30
5.1.1. Investigaciones Nacionales.....	30
5.1.2. Investigaciones Internacionales	34
5.2. Marco Conceptual	37
5.2.1. Agricultura de Precisión	37
5.2.2. Tecnologías utilizadas en cada etapa de la Agricultura de Precisión	38
5.2.3. Índices	44
5.2.4. Café Castillo “Coffea Arábica”	46
5.3. Marco Histórico.....	47
5.4. Marco Legal	49
5.4.1. Ley 29 de 1990.....	49

5.4.2.	Resolución Número 000327 del 30 De agosto 2018	49
6.	Diseño Metodológico	52
6.1.	Ubicación	52
6.2.	Metodología	55
6.2.1.	Diseño de Vuelo.....	56
6.2.2.	Procesamiento de Imágenes.....	57
6.2.3.	Análisis de Firmas.....	58
6.2.4.	Salidas Gráficas	58
6.3.	Equipos.....	59
6.3.1.	Parrot Bluegrass	59
6.3.2.	Sensor Multiespectral (Cámara multiespectral, Parrot Sequoia+).....	60
6.3.3.	Sensor Óptico Terrestre (Espectroradiómetro de Campo ASD Field Hand Held 2)	61
6.3.4.	Software Pix4Dmapper	62
6.3.5.	Software PIX4D Fields	62
6.3.6.	Aplicación Móvil PIX4D Capture	63
6.3.7.	Aplicación Móvil Ctrl + Parrot.....	63
6.3.8.	Software SAS Planet.....	64
6.3.9.	Software ArcGIS.....	65
6.3.10.	Software VIEWSPECPRO.....	65
6.4.	Costos	67
7.	Resultados.....	68

7.1. Índices de Vegetación	68
7.1.1. NDVI.....	69
7.1.2. GNDVI.....	72
7.1.3. RVI.....	77
7.2. Firmas Espectrales.....	80
7.2.1. Primera comparación de Firmas	80
7.2.2. Segunda comparación de Firmas	81
7.2.3. Tercera comparación de Firmas.....	83
7.2.4. Cuarta comparación de Firmas	84
7.2.5. Quinta comparación de Firmas	85
7.2.6. Sexta comparación de Firmas	86
8. Recomendaciones	87
9. Conclusiones.....	88
Bibliografía	90
Apéndices.....	95

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de la zona de estudio Finca La Portada.	52
Ilustración 2. Mapa de ubicación del área de estudio.	53
Ilustración 3. Gráfico de alturas.	54
Ilustración 4. Diagrama de Flujo Metodología.	55
Ilustración 5. Logo Pix4Dmapper.	62
Ilustración 6. Logo Pix4Dfields.	62
Ilustración 7. Logo Pix4DCAPTURE.	63
Ilustración 8. Logo Ctrl + Parrot.	64
Ilustración 9. Logo SAS Planet:	64
Ilustración 10. Logo ArcGIS.	65
Ilustración 11. Logo ViewSpecPro.	66
Ilustración 12. Mapa de cultivos presentes en la Finca la Portada.	68
Ilustración 13. Mapa de índice NDVI.	70
Ilustración 14. Cultivo de Café castillo 4 (5,5 años).	71
Ilustración 15. Cultivo de café castillo (4 años).	72
Ilustración 16. Mapa de índice GNDVI.	73
Ilustración 17. Cultivo de café castillo 4.	74
Ilustración 18. Cultivo de maíz aplicando el índice GNDVI. Ilustración 19. Cultivo de maíz aplicando el índice NDVI.	75
Ilustración 20. Comparación de cultivos de café.	75
Ilustración 21. Áreas de quema.	76

Ilustración 22. Mapa de índice RVI.....	78
Ilustración 23. Cultivo de café 4 aplicando el índice RVI. Ilustración 24. Café castillo aplicando el índice RVI.....	79
Ilustración 25. Cultivo de Maíz aplicando el índice RVI.	79
Ilustración 26. Gráfico de la primera comparación de firmas.	80
Ilustración 27. Gráfico de la segunda comparación de firmas.....	81
Ilustración 28. Gráfico de la tercera comparación de firmas.....	83
Ilustración 29. Gráfico de la cuarta comparación de firmas.	84
Ilustración 30. Gráfico de la quinta comparación de firmas.....	85
Ilustración 31. Gráfico de la sexta comparación de firmas.....	86

Lista de Tablas

Tabla 1. Diferencia de Alturas.....	54
Tabla 2. Especificaciones técnicas Dron Parrot Bluegrass.....	59
Tabla 3. Especificaciones técnicas cámara multiespectral, Parrot Sequoia+.....	60
Tabla 4. Especificaciones técnicas Espectroradiómetro.....	61
Tabla 5. Tabla de Costos del Proyecto.....	67

Glosario

Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): También denominados drones son vehículos sin tripulación, reutilizables, capaces de mantener una autonomía de vuelo controlado y sostenido, estos son propulsados por un motor de explosión, eléctrico o de reacción.

Cada vez son más los agricultores que confían en la agricultura de precisión y en la implementación de los drones gracias a sus capacidades de captar grandes cantidades de información de sus cultivos de manera precisa y ayudar a la toma de decisiones; la teledetección agrícola, entonces, permite obtener información de la vegetación sin necesidad de estar en contacto directo con ella. (González, Amarillo. G, Amarillo .M, Sarmiento, 2016)

Los drones tienen como finalidad en la agricultura de precisión agilizar y ayudar en los diversos procesos, apoyándose en la identificación y monitoreo de los terrenos de los cultivos, esto identificando los posibles riesgos que se puedan presentar en la cosecha del cultivo.

Sistema De Posicionamiento Global (GPS): Son generalmente un complemento de los SIG.

Conceptualmente es un “sistema de radionavegación de cobertura mundial operado por el departamento de defensa de los estados unidos, este consiste en una constelación de 24 satélites artificiales alrededor de la tierra y estaciones terrestres” (Garmin, 2017). Este sistema permite posicionar puntos en cualquier superficie de la tierra con una precisión que depende del equipo que se utilice.

Espectro Electromagnético: “El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce radiación electromagnética”. (Ordoñez, 2017, pag.18). Dicha radiación es utilizada para identificar la sustancia de manera similar a una huella dactilar.

El espectro electromagnético va desde las radiaciones de menor longitud, como los rayos gamma y los rayos x, pasando por los rayos ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas de mayor longitud tales como las ondas de radio.

Teledetección: “La teledetección o detección a distancia se basa en el registro de la radiación electromagnética utilizando sensores remotos de diferentes tipos que no están en contacto físico con los objetos que emiten la energía”. (Ardila, Quintero, 2013, pág. 59).

En la teledetección interviene un factor fundamental el cual es la energía emitida por el sol, la cual es absorbida y reflejada por los diferentes elementos de la superficie terrestre, dicha energía es capturada por los sistemas de recepción los cuales son sensores a bordo de un vehículo o plataforma aérea que almacenan de diversas formas la información para después realizar su respectivo análisis.

Firmas Espectrales: “La firma espectral se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético”. (Hernández, Montaner, 2009, p. 4). Gracias a que cada elemento geográfico transforma de forma diferenciada la energía que recibe del sol es posible identificar por medio de las firmas espectrales el tipo de objeto o área de estudio, además del estado en que se encuentra.

Resolución Radiométrica: “La resolución radiométrica hace referencia al rango dinámico o número de niveles digitales usados al digitalizar la información procedente del sensor (bits por píxel)” (Varela, s.f, pág. 20). Al tener un mayor número de niveles mayor será el detalle de la información esto en relación con la escala de grises la cual es la escala de niveles digitales disponibles para representar el detalle en una imagen, este número de niveles se expresa generalmente en términos binarios (bits), los cuales almacenan el valor de nivel de gris.

Resumen

El presente trabajo pretende mostrar la utilidad de la agricultura de precisión, implementando los VANT y los sensores remotos, además de la aplicación de los sistemas de información geográfica para el procesamiento de la información.

Para ello se realizó un análisis con los diversos índices de vegetación (NDVI, GNDVI, RVI), a partir de las imágenes aéreas tomadas con el VANT Parrot Bluegrass con cámara multiespectral Parrot Sequoia+ y las firmas espectrales tomadas por medio del Espectroradiómetro de campo ASD Field Hand Held 2.

Finalmente se determinó áreas del cultivo donde se presentaron déficit nutricional a partir de la implementación de los anteriores índices radiométricos, además, complementado la metodología con la implementación de técnicas de espectroradiometría de campo.

Palabras Clave: Agricultura de Precisión., Sensores Remotos, Imágenes Multiespectrales, Espectroradiometría, Índices de Vegetación, Firmas Espectrales.

Abstract

The present work tries to show the utility of the agriculture of precision, implementing the VANT and the remote sensors, in addition to the application of the geographic information systems for the information processing.

For this, an analysis was carried out with the different vegetation indices (NDVI, GNDVI, RVI), from the aerial images taken with the Parrot Bluegrass VANT with Parrot Sequoia + multispectral camera and the spectral signatures taken by means of the ASD Field Spectrometer Hand Held 2. Finally, areas of the crop were determined where nutritional deficits were presented from the implementation of the previous radiometric indices, in addition, complemented the methodology with the implementation of field spectroradiometry techniques.

Key Word: Precision Agriculture, Remote sensing, Multispectral Imaging, Spectroradiometry, Index of Vegetation, Spectral Signatures.

1. Introducción

La agricultura es una labor que ha llevado a cabo el hombre desde hace miles de años, sus diversos procesos han evolucionado con el paso del tiempo. Para los países que dependen de las actividades agrícolas, un crecimiento y desarrollo óptimo del sector agrícola es clave para su sustento. “Un análisis que abarca varios países muestra que el aumento del PIB debido a la agricultura es, en promedio, por lo menos dos veces más beneficioso para la mitad más pobre de la población de un país que el crecimiento generado por otros sectores” (FAO, 2009, pág. 4).

En Colombia, “actualmente la productividad del café, arroz, maíz, yuca y leche está disminuyendo y la importación de alimentos aumentando, lo que pone de manifiesto que mejorar la productividad es un reto inaplazable” (Herrera, 2019). Es indispensable la elaboración de procesos y proyectos que ayuden a mejorar la competitividad del sector agrícola, por lo tanto, el agro colombiano requiere de la incorporación de nuevas tecnologías que ayuden a alcanzar un mejor nivel.

Con base a lo anterior, la agricultura de precisión resulta ser una herramienta fundamental en los procesos de control y monitoreo de cultivos, permitiendo desarrollar y articular métodos agrícolas más eficientes. Su objetivo primordial es integrar la gestión espacial y temporal de la producción a través de sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG) y tecnologías de teledetección, esto con el fin de aumentar la rentabilidad y productividad de los agricultores mediante la generación de salidas gráficas y análisis en función a las condiciones fisicoquímicas del terreno.

La adopción de dichas tecnologías varía en función del cultivo, su ubicación geográfica y las condiciones que estén presentes. Considerando todo lo anterior surge la idea de implementar las

diversas técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de café castillo “*Coffea Arábica*” presente en la finca La Portada, vereda San Miguel, Sector el Mesón, Pandi- Cundinamarca, lo cual será llevado a cabo mediante la utilización de equipos como un Espectroradiómetro de campo ASD Field Hand Held 2, un dron Parrot Bluegrass con cámara multiespectral Parrot Sequoia+ y software para el procesamiento de imágenes e información espectral como Pix4Dmapper, ViewSpecPro y ArcGIS; Con estos equipos se realizarán los diversos procesos asociados a las técnicas de agricultura de precisión tales como captura de imágenes aéreas, toma de firmas espectrales, análisis de índices en relación con el estado de las áreas del cultivo y salidas gráficas por medio de las cuales se pueda ver con claridad el estado del cultivo.

2. Planteamiento del Problema

La producción de café en Colombia en los últimos años se ha visto perjudicada debido a la presencia de diversos problemas fitosanitarios. Buriticá (2009), afirma que la roya llega a Colombia en el año 1983 y que a partir de ese momento la enfermedad tendría características pandémicas tales como rápida invasión epidémica de nuevas y diversas áreas. Por lo general esta enfermedad y muchas otras se dan y expanden debido a un mal mantenimiento y control de los cultivos de café.

La calidad del cultivo dependerá, de cómo se mantenga el cultivo y se recolecten los frutos. En el caso de Colombia, “es necesario tener un manejo de arvenses especializado, esquemas de fertilización adecuados a las necesidades del cultivo, un control de enfermedades y plagas eficiente y oportuno” (Cenicafé, 2019).

La necesidad de implementar un sistema en el cual se puedan localizar las diversas variables presentes en el cultivo se hace cada vez más necesario, esto debido a que en la actualidad se presentan diversas molestias que afectan el desarrollo óptimo de la producción del cultivo.

Al analizar dos factores tales como el incremento poblacional y el rendimiento agrícola, uno dependiente del otro, se debe tener en cuenta que las civilizaciones se hacen cada vez más grandes y necesitarán de más recursos para su sostenibilidad. “Se prevé que la población mundial aumente en más de un tercio, o 2 300 millones de personas, entre 2009 y 2050. “(FAO, 2009, pág. 1).

La aceleración de un cultivo es satisfactoria para cumplir las necesidades alimentarias, como también es preciso optar por hacer a los cultivos del mundo más eficientes con métodos de observación de manera remota.

Por consiguiente, el problema a tratar será: ¿Cómo poder determinar de forma precisa el estado de las plantas de café castillo “*Coffea arabica*”, presentes en la Finca La Portada, Vereda San Miguel, Pandi- Cundinamarca a través de la aplicación de técnicas de agricultura de precisión?

3. Justificación

Uno de los problemas de la agricultura actual, es la falta de información y de formación para el desarrollo y control de problemas que se puedan presentar en el área de cultivo. Para lo cual, es necesario la implementación de técnicas de agricultura de precisión que puedan dar solución o permitan dar prevención a las problemáticas que se puedan presentar en los diferentes cultivos.

La técnica de investigación parte principalmente de un sobrevuelo con el VANT Parrot Bluegrass, el cual permite una perspectiva superior, para así lograr captar detalles en extensión que contribuyen a la obtención de un modelo de profundización más completo; en este proyecto el manejo del VANT es dado con una cámara Multiespectral Parrot Sequoia+ de 4 lentes de banda para obtener imágenes aéreas con RGB e Infrarrojo cercano. Numerosos países han logrado combatir las problemáticas de plagas y enfermedades presentes en sus cultivos por medio de la implementación de nuevas técnicas en la agricultura, esto gracias al aprovechamiento de las investigaciones realizadas por parte de universidades en asociación con empresas.

La agricultura de precisión se ha llevado a cabo en Colombia en las últimas décadas con el fin de combatir las problemáticas presentes en la producción de sus cultivos. El ministerio de agricultura y desarrollo rural colombiano (2008), reconoce las bondades de la implementación de la agricultura de precisión basándose en el hecho de que el sector agropecuario debe garantizar la alimentación para una población cada vez más concentrada en los núcleos urbanos y también debe contribuir a la conservación de los agroecosistemas y los ecosistemas vinculados, a las fuentes y a los soportes básicos de sus actividades productivas. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2008) (Citado en Ochoa, Forero, 2012, pág. 3).

En base a lo tratado anteriormente, es necesaria la implementación de las técnicas de agricultura de precisión al cultivo de café castillo presente en la Finca La Portada, Vereda San Miguel, Sector El Mesón, Pandi- Cundinamarca, con el fin de determinar las diversas variables presentes en el cultivo por medio de firmas espectrales e índices de vegetación, para posteriormente determinar qué áreas con exactitud del cultivo, tienen presencia de problemas fitosanitarios o déficit de mantenimiento, esto visto desde los rangos espectrales no visibles para el ojo humano.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Implementar técnicas de agricultura de precisión para determinar el estado de las plantas en el cultivo de Café Castillo “Coffea Arábica” presente en la Finca La Portada, Vereda San Miguel Pandi- Cundinamarca.

4.2. Objetivos Específicos

- Planificar un diseño de vuelo en la zona de estudio.
- Aplicar índices espectrales asociados a la agricultura de precisión, a las imágenes capturadas en el vuelo, con el fin de determinar el estado del proceso productivo en la finca la Portada.
- Obtener y analizar la firma espectral de las diferentes coberturas presentes en el área de la finca la Portada.
- Representar mediante salidas gráficas los resultados obtenidos en el terreno.

5. Marco Referencial

5.1. Marco Contextual

A continuación, se presentan diferentes investigaciones enfocadas en la agricultura de precisión. En donde se desea contextualizar las diversas experiencias que se han tenido con relación a la práctica de estas técnicas a nivel nacional e internacional.

5.1.1. Investigaciones Nacionales.

“Diseño de un modelo de agricultura de precisión utilizando drones y un sistema de captura, almacenamiento y análisis de datos que permita identificar a tiempo la generación de la pudrición del cogollo en cultivos de palma de aceite que se encuentran en los departamentos de Bolívar y Santander” (Medina, Niño, 2017).

En el año 2017, los estudiantes Pedro Mediana y Juan Carlos Niño de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital – Francisco José De Caldas, realizaron la presente investigación con el objetivo de formular un modelo de agricultura de precisión para el tratamiento de la enfermedad de la pudrición del cogollo en cultivos de palma que se encontraban ubicados en los departamentos de Bolívar y Santander. Se analizó la ventaja que trae la implementación de este método y se dedujo que gracias a este se podía realizar un seguimiento en tiempo real del estado de las plantas, pudiendo tomar decisiones con respecto a las medidas correspondientes para así evitar que otros cultivos se vieran afectados, ayudando a disminuir las pérdidas en producción que afrontaban los propietarios de los cultivos.

Para la realización del modelo propuesto, se ejecutó un diagnóstico de cómo se encontraba el cultivo en ese momento, teniendo en cuenta la importancia de la producción de aceite de palma en

la región. Luego se identificó la problemática principal la cual la pudrición del cogollo en los cultivos y se plantearon posibles soluciones para abordar esta problemática. Se abordaron las tecnologías a ser implementadas para el modelo de agricultura de precisión y finalmente se realizó la estructura organizacional para el desarrollo del proyecto y se realizó en modelo financiero para el desarrollo proyecto.

En el proyecto se concluyó lo siguiente: “es claro que mediante la implementación de proyectos de este tipo en Colombia se presenta una excelente oportunidad de crecimiento económico donde no solo ganan los productores sino también los proveedores de tecnología y las empresas de servicio” (Medina, Niño, 2017, pág. 51).

“La aplicación de la agricultura de precisión en el proceso de fertilización: un caso de estudio para el sector bananero del Urabá-Antioqueño” (Alcaraz, Jiménez, 2018).

En el año 2018, los estudiantes John James Alcaraz Restrepo y Juan Gonzalo Jiménez Trespalacios del Programa de Maestría en Economía Aplicada de la Universidad EAFIT, realizaron la presente investigación que tuvo como objetivo principal realizar un análisis del efecto que causaría la aplicación de la agricultura de precisión en el programa de nutrición de una finca bananera y comparar su resultado con los procesos de la agricultura tradicional, esto enfocado a la reducción de costos en uso de insumos de fertilización química. En la metodología se comparó los dos flujos de efectivo, uno negativo que es la inversión inicial (costo del análisis del suelo utilizando sensores directos y remotos) y otro positivo que es el resultado de la inversión (ahorro en costos del programa de fertilización). Aplicando agricultura de precisión, en la finca donde se realizó el

estudio, se presentó un ahorro del 5% en el programa de fertilización comparando con el sistema convencional.

Gracias a la aplicación de la agricultura de precisión en el área de cultivo se presentó una disminución en el uso de fertilizantes lo cual generó una disminución de costos y efectos ambientales positivos. En el proyecto se concluyó que “la estrategia de adopción de mejores prácticas de producción, como utilizar nuevas herramientas tecnológicas, permite obtener una producción más sostenible en comparación con la agricultura convencional” (Alcaraz, Jiménez, 2018, pág. 79).

“Aplicación de imágenes satelitales para el desarrollo de una firma espectral en la producción de maíz (*Zea mays* L.) bajo las condiciones de trópico medio colombiano” (Ávila, Escobar, Morantes, 2019)

En el año 2019, los docentes Edier Fernando Ávila Vélez, Natalia Escobar Escobar y Carlos Francisco Morantes Chocontá docentes de la Universidad de Cundinamarca, realizaron la implementación de técnicas de teledetección a un cultivo de maíz que presentaba una extensión de 9,5 ha el cual se encontraba presente en el municipio de Funza – Cundinamarca.

Dicha investigación se enfocó en el análisis de firmas espectrales capturadas en distintas etapas del crecimiento del maíz (2 meses, 2,3 meses y 4,3 meses). Para la investigación se realizó una metodología distribuida en cuatro fases: georreferenciación del cultivo, selección de imágenes satelitales, calibración radiométrica de las imágenes y el desarrollo de las firmas espectrales. El resultado obtenido fueron las firmas espectrales del cultivo de maíz en las longitudes de onda

visibles y en la del infrarrojo cercano, con las cuales se pudo determinar los cambios significativos en cuanto a crecimiento del cultivo de maíz.

Finalmente se concluyó que, mediante el desarrollo de una firma espectral temporal de un cultivo, se pueden calcular volúmenes de cosechas, además de crear alertas tempranas basadas en el nivel de reflectancia de los cultivos, permitiendo así tener un control más preciso del crecimiento del cultivo (Ávila, Escobar, Morantes, 2019, pág. 262).

“Agricultura de precisión para el cultivo de algodón en el municipio de el Molino, la Guajira” (Loaiza, Cardona, 2017).

En el año 2017, los estudiantes Naval José Loaiza Jiménez y Javier De Jesús Cardona Payar de la Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales de la Universidad Piloto De Colombia, realizaron dicho proyecto con un objetivo, Implementar y evaluar un prototipo industrial de un sistema de agricultura de precisión el cual incrementara la productividad del sector algodonero del Departamento de la Guajira. A lo cual se desarrolló una plataforma UAV (vehículo aéreo no tripulado) la cual tenía integrado el hardware necesario para la captura de imágenes multispectrales útiles para la aplicación de la agricultura de precisión, además se desarrolló y validó el software respectivo para el procesamiento de los datos obtenidos en campo y por último se realizó un demostrador de productividad y disminución de uso de plaguicidas.

Como conclusión del proyecto Loaiza, Cardona, (2017) afirman que “Gracias al uso de cámaras multispectrales y sensores se pueden detectar las plagas que rodean a las cosechas de cultivo de Algodón en el Municipio de El Molino, La Guajira” (pág. 130). Se puede afirmar que gracias a investigaciones como la presente se sigue reafirmando cada vez más en Colombia que la

agricultura de precisión se destina a ser el futuro de la agricultura, ya que la implementación de estas técnicas trae grandes aportes al incremento de producción y además trae consigo beneficios al medio ambiente.

5.1.2. Investigaciones Internacionales

“Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión” (Díaz, 2015).

En el año 2015, Juan Díaz aspirante a Máster en tecnologías de la información geográfica de la universidad Complutense de Madrid, efectuó dicha investigación con el objetivo de mostrar la utilidad de los UAS/ RPAS, (Sistemas aéreos no pilotados/ sistemas aéreos pilotados remotamente) en los trabajos de agricultura de precisión, y además poder demostrar la utilidad de los sistemas de información geográfica en el post proceso de la información capturada en campo.

En este estudio se aplicaron los diferentes índices de vegetación NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG), a las imágenes capturadas por las cámaras multiespectrales montadas sobre los UAS/ RPAS. Por medio de análisis geoestadístico, se determinó el índice que presentaba mayor correlación con el NDVI.

En dicho proyecto se concluyó que “los UAS/RPAS son una herramienta de gran utilidad para obtención de datos relacionados con agricultura de precisión, en áreas reducidas, ya que permiten testear determinadas áreas de grandes extensiones de terreno y extrapolar esta información al resto de la superficie” (Díaz, 2015, pág. 67).

“Metodología para la evaluación económica de un proyecto de Agricultura de Precisión” (Baños, Goenaga, 2003).

En el año 2003, el licenciado en economía Ariel Baños y el ingeniero civil Tomas Goenaga junto con el Instituto Universitario IDEA realizaron la presente investigación con el fin de proveer una metodología de evaluación económica para determinar si la agricultura de precisión traía con su aplicación beneficios económicos. Este proyecto se desarrolló en la república de Argentina y su metodología se enfocó en dos variantes: una de éstas era una empresa la cual realizó la inversión y operación del sistema de agricultura de precisión y la otra era el caso en que la inversión y operación del sistema se encontraban divididas entre la empresa que explotaba el campo y los contratistas que ejecutaban las labores. En dicho estudio se realizó la relación correspondiente al área de trabajo en la cual se justificaba la aplicación de del sistema de agricultura de precisión, además se estimaron los valores máximos y mínimos que podría tener la contratación de servicios de agricultura de precisión.

De este proyecto se concluye que la implementación de técnicas y equipos de agricultura de precisión trabaja con un factor fundamental, este factor es la extensión de terreno ya que no se justifica la implementación de equipos y técnicas de un costo considerablemente alto para un área de cultivo que no presenta una extensión de terreno relativamente grande. Por lo cual los más beneficiados con la implementación de la agricultura de precisión son las empresas que poseen áreas de cultivo cuya extensión es inmensa y es aquí donde se puede apreciar en verdad los beneficios que trae la aplicación de equipos y técnicas de agricultura de precisión.

“Sistemas UAV para identificación de parámetros en agricultura” (Eobin, 2013).

En el año 2013, el Instituto de Ciencias, el Departamento de ingeniería Aeroespacial y el Instituto Mansarovar de Ciencia y Tecnología todos de la India, realizaron aproximaciones de vuelo con vehículos aéreos no tripulados para establecer las variables de vuelo necesarias para la agricultura de precisión. Dicho estudio permitió identificar que los vehículos aéreos no tripulados son un medio muy eficaz para obtener por medio de los sensores que llevan consigo los datos de la plantación.

En el desarrollo del estudio se estableció que “en la toma de imágenes aéreas desde un UAV’s se debe seguir un proceso que inicia con la captura de la imagen, seguido de la extracción de la imagen y finalmente con la identificación de parámetros de la imagen” (Eobin, 2013).

En este estudio se concluyó que los UAV’s son una alternativa de gran potencial, aún más que los satélites de órbita media, esto debido a que la resolución espacial de las imágenes capturadas por medio de los UAV’s es muy superior, esto gracias a que la captura de información se da de forma más cercana a las variables, lo cual permite tener un mayor detalle de la plantación.

La implementación de los UAV’s ha dado una mejor alternativa a los granjeros para poder evaluar su cultivo en tiempo real, además de poder detectar de forma temprana la presencia de plagas, la humedad que se presenta en el terreno y los nutrientes necesarios en el terreno, gracias a esto se justifica la implementación de estos equipos en las actividades agrónomas.

5.2. Marco Conceptual

A continuación, se presentan los conceptos relevantes para comprender el trabajo expuesto, los cuales se irán presentando en el desarrollo del presente proyecto. Los conceptos que se van a encontrar a continuación van relacionados a la Agricultura de Precisión.

5.2.1. Agricultura de Precisión

“El concepto general de la agricultura de precisión consiste en el manejo y administración del suelo en los cultivos, esto mediante el monitoreo georreferenciado de variables que influyen en el desarrollo y rendimiento adecuado del cultivo” (Gómez, Velásquez, Jiménez, 2016, pág. 2). La agricultura de precisión enfoca su propósito en tener en cuenta aspectos tales como la variabilidad espacial y temporal dentro del terreno del cultivo para decidir sobre el espacio, la localización, cantidad necesaria y el tipo de insumo que hay que administrar, esto para minimizar costos, impacto al medio ambiente y poder maximizar la producción.

(Zhang, N., Wang, M., y Wang, N), (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 2), afirman que las variables que más influyen en la producción en seis grupos:

- Variabilidad de rendimiento: distribuciones espaciales y temporales de rendimiento.
- Variabilidad de campo: aspecto físico del terreno, características topográficas.
- Variabilidad del suelo: características físicas (textura, densidad, humedad, conductividad eléctrica, entre otras) y químicas (niveles de nutrientes minerales y orgánicos, salinidad, pH, entre otras).

- Variabilidad del cultivo: altura y densidad del cultivo, estrés del cultivo por déficit de nutrientes y agua. Propiedades biofísicas como radiación fotosintéticamente activa, índice de área foliar, contenidos de clorofila, entre otras.
- Variabilidad de factores anómalos: malezas, enfermedades, plagas daño por factores climáticos, etc.
- Variabilidad en administración: manejo de áreas y densidad de siembra, prácticas agrícolas, administración de insumos, patrones de riego, entre otras.

Teniendo en cuenta la necesidad de medir y controlar las anteriores variables, las tecnologías implementadas en cada etapa de la agricultura de precisión se adaptan para ofrecer soluciones integradas materializadas en la maquinaria, equipos de medición, software especializado y métodos de manejo orientados al desarrollo eficiente de esta actividad.

5.2.2. Tecnologías utilizadas en cada etapa de la Agricultura de Precisión

5.2.2.1. Sistemas de Geoposicionamiento

Gómez, et al., (2016) afirman que “La agricultura de precisión surgió en parte gracias a la disponibilidad creciente del sistema de navegación satelital GPS” (pág. 3).

Esto gracias a que el sistema de navegación satelital GPS permiten sectorizar las variables presentes en los cultivos mediante la georreferenciación de las mediciones de rendimiento, monitoreo y nutrientes ayudando así a generar los respectivos mapas de variabilidad. Los avances presentes en estos sistemas de geoposicionamiento se basan en el aumento de su precisión esto mediante sistemas y técnicas tales como GPS (Sistema de Posicionamiento Global) diferencial y RTK (Navegación Cinética Satelital en tiempo real), los cuales benefician los sistemas de

navegación de los vehículos que transportan los sensores de muestreo de variables, los vehículos de transporte de insumos y los vehículos aéreos no tripulados.

5.2.2.2. Percepción Remota

En la agricultura de precisión uno de los principales requerimientos es la adquisición programada en tiempo real de variables presentes en el terreno agrícola, esto para obtener los datos que describan el estado actual del cultivo. Esto se lleva a cabo con instrumentos que no entran precisamente en contacto directo con el área o fenómeno de estudio.

Tales instrumentos son llamados sensores remotos, los cuales son transportados por vehículos terrestres o aéreos y realizan la conversión de magnitudes físicas a señales eléctricas, las cuales se adecúan, se digitalizan y almacenan junto con información de geolocalización para su procesamiento mediante software especializado. (Gómez, et al., 2016, pág. 3).

5.2.2.3. Sistemas de Información Geográfica y Análisis de Datos

Para el análisis y organización de los datos capturados mediante sensores especializados se implementan los mapas de variabilidad, los cuales son manejados mediante el uso de software de procesamiento cartográfico y geoestadístico, estos almacenan la información en bases de datos espaciales, para así poder realizar análisis y generar información nueva.

5.2.2.4. Administración de Variables de Insumos Agrícolas

Tian, Lei, (2002) afirman que al implementar las tecnologías antes mencionadas se hace viable la realización de aplicación controlada de insumos en el área de cultivo, esto en las partes que sea necesario y en las cantidades adecuadas (citado en Gómez, et al., 2016, pág.3), dicha aplicación se efectúa por medio de maquinaria hecha especialmente para la fumigación de cultivos. En ciertas

ocasiones dicha maquinaria al combinarse con las tecnologías antes mencionadas hace posible la detección de malezas y su erradicación inmediata implementando sistemas de aplicación selectiva de herbicidas.

La implementación conjunta de las tecnologías de la agricultura de precisión garantiza el éxito de su ciclo, esto se hace más evidente en cultivos de gran extensión presentes en países de gran desarrollo, ya que debido a su alto costo de inversión es muy difícil presenciarlo en países en vía de desarrollo.

5.2.2.5. Imágenes Multiespectrales

Entre las tecnologías de percepción remota presentes en la agricultura de precisión existe la obtención de imágenes de la cobertura de las áreas cultivadas.

La captura de dichas imágenes se realiza en varios rangos del espectro electromagnético denominado bandas, y la necesidad de su adquisición radica en las propiedades espectrales (reflectancia, transmitancia y absorbancia, entre otras) presentes en el suelo y las plantas en sus diferentes etapas de desarrollo, las cuales van ligadas a factores como actividad fotosintética, cantidad de agua, clorofila, biomasa, entre otros. (Gómez, et al., 2016, pág. 3).

“Estas imágenes han sido utilizadas con éxito en agricultura de precisión, ejemplo de ello es su análisis para estimar contenido de carotenoides en hoja de viñedos” (Tejada, Hernández, González, 2013) (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 3), su utilización para determinar estrés hídrico en la plantas (Douthe, et al., 2015) (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 3), y la generación de modelos de superficie para estimación de rendimiento en cultivos de maíz (Geipel, Link, Claupein, 2014), (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 3).

Los procesos de obtención y procesamiento de estas imágenes en agricultura se efectúan a través de un sistema de teledetección; el cual tiene como fuente de energía electromagnética el sol, como cubierta terrestre el suelo del cultivo, como sistema sensor un satélite terrestre o aerotransportado, además de un sistema de recepción si es el caso de que las imágenes son transmitidas en tiempo real, y finalmente un sistema de tratamiento digital y de análisis, el cual permite interpretar y dar un significado informativo a los datos obtenidos.

Las coberturas en la agricultura cuentan con unas firmas espectrales típicas, estas generalmente son curvas de reflectividad espectral que se encuentran en los rangos de longitudes de onda del espectro de la luz visible (~400nm a ~700nm) y el infrarrojo cercano, medio y térmico (~700nm a ~1400nm).

“En el caso de las coberturas vegetales, las diferencias entre las firmas espectrales de la vegetación sana y estresada son notables y su análisis cuantitativo es posible mediante diversas técnicas como el cálculo de índices vegetacionales” (Gómez, et al., 2016, p.4). Finalmente, con los resultados de dichos análisis se pueden realizar diagnósticos en base a la productividad del cultivo.

5.2.2.6. Sistemas de captura de Imágenes Multiespectrales

Los sistemas de captura de imágenes son tecnologías que se han venido tratando en la agricultura de precisión, estos consisten en el registro de la interacción entre la radiación electromagnética que emite el sol y las coberturas vegetales, esto implica a su vez, el análisis y procesamiento de las características de la imagen obtenida, tales como su reflectancia en distintas bandas espectrales, la forma y las dimensiones de los objetos. Las diversas aplicaciones de estos sistemas son la evaluación de áreas cultivadas, la detección de zonas afectadas, el análisis de suelos y la generación de cartografía.

“Los sistemas de captura remota de imagen se componen básicamente del sensor y la plataforma que lo transporta. Las características de resolución espacial, radiométrica, temporal y espectral de las imágenes capturadas dependen de características técnicas y operacionales de estas partes”. (Gómez, et al., 2016, pág. 4).

5.2.2.7. Vehículos de uso en Fotografía Multiespectral

Gracias al gran desarrollo que ha tenido la industria aeronáutica y aeroespacial en los últimos años, se ha ampliado el campo de versatilidad de los vehículos que transportan los equipos, tales como los sensores de barrido y las cámaras multiespectrales implementadas para la captura de información.

“El monitoreo de los cultivos a partir de la recolección de datos de imágenes se ha realizado utilizando sensores aerotransportados mediante plataformas tripuladas y no tripuladas” (Guo, Kujirai, Watanabe, 2012), (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 4), presenta ciertas ventajas frente a la implementación de imágenes satelitales, ya que estas no cuentan con la resolución espacial y temporal que requiere el monitoreo de un cultivo, además de que las imágenes satelitales están propensas a presentar falencias a la hora de enfrentarse a factores atmosféricos que dificultan la toma de información.

En la actualidad existen en el mercado dispositivos de vuelo que permiten la incorporación de sensores, sistemas de posicionamiento global y una programación de misiones de vuelo autónomo.

“Con el uso integrado de estas tecnologías de precio asequible se permite replantear el alcance de los aeromodelos” (Bautista, Parra, Murcia, 2011), (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 4), la implementación de los UAV (vehículos aéreos no tripulados), cuya composición física de construcción va desde ala fija a multirrotores, ha permitido el transporte de dispositivos de captura

de imágenes útiles en la agricultura de precisión, ya que estos se han optimizado para obtener tiempos de vuelo y capacidades de carga superiores manteniendo un tamaño pequeño.

5.2.2.8. Sensores de Imagen

La búsqueda y evolución de sensores de imagen que permiten una aproximación a productos generados por plataformas satelitales ha beneficiado de gran manera a la agricultura de precisión, ya que gracias a la incorporación de cámaras multi e hiperspectrales que permiten la captura de imágenes en la banda del infrarrojo cercano, se ha permitido la captura de información por demanda en los proyectos de agricultura de precisión. Dichos dispositivos se utilizan en temporadas de cosecha y postcosecha para la estimación de rendimiento, clasificación por colores, segmentación automática de defectos y clasificación en línea (Agüera, Carvajal, Pérez, 2011), (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 5).

El sensor de imagen puede ser diferenciado con base a la altura de la plataforma, su resolución radiométrica, la frecuencia de rendimiento mínimo para formación de imágenes secuenciales y la resolución espacial, factores que afectan el valor píxel de la zona y por tanto establecen las limitantes técnicas específicas de cada sistema. (Mulla, 2013), (citado en Gómez, et al., 2016, pág. 5).

En la actualidad existe diversidad de cámaras multiespectrales diseñadas para su uso específico para agricultura y monitoreo vegetal con UAVs; la inclusión de un sensor por banda espectral evita que se produzcan traslapes al implementar filtros que restringen las longitudes de onda, lo cual se asemeja a las bandas de plataformas satelitales de captura de imágenes multiespectrales como Landsat 8 y Sentinel-2. Como ejemplo de líneas de cámaras se tiene la Tetracam®, RedEdge™ de MicaSense® y Sequoia™ de Parrot®.

5.2.3. Índices

5.2.3.1. Índice NDVI

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI Normalized Difference Vegetation Index). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974), (citado en Díaz, 2015, pág. 42).

Este índice se basa en el comportamiento radiométrico de las plantas con relación a los procesos de fotosíntesis y su estructura foliar, por medio del cual se puede determinar el estado de vigorosidad de las plantas. Los valores del NDVI se presentan en función de la energía que es absorbida y emitida por la planta, por tanto, se sabe que una planta está sana cuando presenta un claro contraste entre el espectro visible más específicamente la banda roja, y el infrarrojo cercano. Para tenerlo más claro mientras que en el espectro visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el infrarrojo cercano las paredes de las células de las hojas que generalmente se encuentran llenas de agua reflejan la mayor parte de la energía, por lo tanto cuando la vegetación es atacada por algún tipo de plaga y sufre un estrés debido a esto la cantidad de agua disminuye en las paredes de la célula por lo cual la reflectividad de la vegetación reduce en el infrarrojo cercano y aumenta en el rojo al tener menos absorción de clorofila. Dicha diferencia es la que permite identificar la vegetación sana de las otras que están siendo atacadas. La fórmula para calcular el NDVI consta de dos variables que son la banda roja (RED) y el infrarrojo cercano (NIR).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores. (Díaz, 2015, pág. 43)

5.2.3.2. Índice GNDVI

Este índice es una variante del NDVI en donde se reemplaza la banda roja por la banda verde, esto teniendo en cuenta que “hay cultivos que responden mejor a unas bandas que a otras y en cultivos de arroz o en maíz, en ocasiones el índice GNDVI da mejores resultados” (Agromática, 2019).

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

Este índice es uno de los más implementados a la hora de querer determinar la capacidad de nitrógeno y agua de un cultivo.

Los valores que arroja este índice comprenden un rango entre -1 y 1, para lo cual valores entre -1 y 0 se asocian con suelos desnudos o cuerpos de agua, y generalmente es aplicado en la intermedia y final del ciclo de cultivo.

5.2.3.3. Índice RVI

El índice Relativo de Vigor (RVI), según Indigo, (2017) “se define como una transformación espectral diseñada para mejorar la contribución de las propiedades de la vegetación y permitir intercomparaciones espaciales y temporales confiables de la actividad fotosintética terrestre y las variaciones estructurales del dosel”. Este índice a diferencia del NDVI solo se enfoca en vegetación, ignorando el resto de materia orgánica.

$$RVI = \frac{NIR}{RED}$$

Este índice básicamente es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando enfocado en la diferencia espectral de la vegetación en las longitudes de onda del rojo y el infrarrojo cercano.

5.2.4. Café Castillo “Coffea Arábica”

El Coffea arábica es una planta originaria de los altiplanos de Sudan, Kenia y Etiopia. El nombre del género deriva del italiano *caffè*, a su vez derivado del turco *Kahvé* y el árabe *qahwa*, la cual originalmente indicaba una bebida fermentada de color rojo oscuro. El termino latino “arábica” de arabia, hace referencia al que se pensó era su lugar de origen (Puccio, s.f).

Esta planta se podría determinar como un arbusto o árbol pequeño, el cual presenta una altura entre los 5-7 metros, este presenta hojas de forma elíptica de una tonalidad verde brillante con un largor de hasta 15 cm y un ancho de 7 cm. Los frutos presentes son drupas ovoides de cerca de 15 mm que durante su maduración cambian de una tonalidad verde a rojiza y finalmente negra.

“Los estudios genéticos llegan a la conclusión que la Coffea arábica descende de un cruzamiento entre dos especies diploides del mismo género, especies que ha sido individualizadas en la canephora (progenitor masculino) y la eugenoides (progenitor femenino) ambas auto estériles” (Puccio, s.f).

Coffea arábica es una de las dos especies que más se cultivan a nivel mundial abarcando casi el 70% de la producción mundial (la otra es *C. canephora*, comúnmente llamada Robusta) (Puccio, S.f). La arábica es, la especie dominante en la región, tenida en cuenta para producir la mejor calidad de la bebida. Lo interesante de esta planta es que se compone de muchas variedades y métodos distintos de cultivación.

Esta planta es la única del género *Coffea* que cuenta un centenar de especies, es decir, si una especie aloploide está formada por dos genomios distintos, se llama alotetraploide ($G_1 G_1 G_2 G_2$), (una especie diploide posee cada cromosoma en doble copia) por un total de 44 cromosomas, además, contrariamente a casi todas las otras especies del género, es auto fértil (Puccio, s.f).

La variedad Castillo surgió del cruce de dos progenitores de la clase Arábica, la variedad Caturra y el híbrido de Timor, recursos genéticos ampliamente conocidos (Cenicafé, 2005, pág. 2).

La variedad castillo es un compuesto que permite su utilización exitosa en diversidad de ambientes. Ya que su conformación fue de índole genética se tiene garantía de que esta variedad es resistentes a diversas enfermedades como la roya o la enfermedad de la cereza del café (CBD). Cabe resaltar que esta planta en regiones de gran altitud demuestra su gran potencial de productividad, gracias a su excelente granulometría y a la inmunidad que hasta ahora presenta contra diversas enfermedades.

5.3. Marco Histórico

Las primeras investigaciones relacionadas a la agricultura de precisión se dieron en los países de gran desarrollo como Estados Unidos, Canadá, Australia y algunos países de Europa Occidental a mediados de los años 80. La implementación de monitorización y mapeo de variables en el suelo se impulsó en países como Australia por medio de campañas publicitarias, esto para estimular el uso de sistemas de agricultura de precisión debido a que su uso no es muy frecuente. “Existen algunos estudios que sugieren que el patrón de adopción de la Agricultura de Precisión puede ser lento y disparejo, comparado con otras tecnologías agrícolas” (Lowenberg-DeBoer, 1998), (citado en Ochoa, Forero, 2012, pág.7).

La agricultura de precisión en América Latina se dio principalmente en Argentina y Brasil en la década de los 90 con la idea de incorporar nuevas tecnologías para optimizar el manejo de los suelos de cultivo. Durante los años 2001/2002, Argentina comenzó a avanzar en el desarrollo de su tecnología en la agricultura, “en 2005 disponía de todas las herramientas para implementar AP: software, sensores remotos, sistemas de guía, sensores en tiempo real, sensores de nitrógeno, entre otros” (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina, 2010), (citado en Ochoa, et al., 2012, pág. 7). En los últimos años la adopción de la agricultura de precisión ha aumentado con la georreferenciación de las muestras del suelo y la aplicación de dosis controladas de insumos en los cultivos.

En Colombia, hace más de quince años se estudian e implementan tecnologías de agricultura de precisión en los principales cultivos de productos agrícolas en el país tales como el café, arroz, caña de azúcar, palma africana, banano, plátano, flores, maíz y arveja. Estas iniciativas se han dado gracias a investigaciones realizadas por universidades y entidades públicas y privadas del sector agrícola del país.

“La (SAC) ha puesto un gran empeño en ofrecer la nueva agricultura, involucrando los adelantos tecnológicos de la AP, ya que la considera como una necesidad tanto para el agricultor como para el consumidor” (Sociedad de Agricultores de Colombia, 2009), (citado en Ochoa., 2012, pág. 9).

Uno de los proyectos que más sonaron en el país en los últimos años en relación con la agricultura de precisión fue Bioenergy, dicho proyecto busco implementar una refinería para biocombustibles utilizando la caña de azúcar. “Sin embargo para que la adopción de la agricultura de precisión crezca en el país debe existir un proceso que no solo involucre a los que la adoptan sino también al resto de sociedades e instituciones” (Ochoa, et al., 2012, pág. 9).

5.4. Marco Legal

Normas de Orden Nacional

5.4.1. Ley 29 de 1990

La presente ley se enfoca en dictar disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico en los sectores productivos del país. A lo cual el congreso de Colombia en ejercicio de las facultades otorgadas por el artículo 76 de la constitución decreta los siguientes artículos.

Artículo 1º. Dicho artículo indica que le corresponde al estado promover y orientar el adelanto científico y tecnológico, por lo cual está obligado a incorporar los diversos avances tecnológicos y científicos al desarrollo social y económico del país.

“Así mismo, deberá establecer los mecanismos de relación entre sus actividades de desarrollo científico y tecnológico y las que, en los mismos campos, adelanten la universidad, la comunidad científica y el sector privado colombianos” (Minagricultura, 2019).

Artículo 2º. El presente artículo expone que el estado se enfocara en crear condiciones favorables para la aplicación y desarrollo de las ciencias y la tecnología, para así estimular la capacidad innovadora del sector productivo.

5.4.2. Resolución Número 000327 del 30 De agosto 2018

Decreto Número 1470 de 2018

En el presente decreto se nombran diversos artículos de la constitución política enfocados en la implementación y desarrollo de tecnologías en el campo de producción del país. Dichos artículos son:

Artículo 65 de la constitución política. Dicho artículo señala que se le otorgará prioridad al desarrollo de las actividades agrícolas, pecuarias, pesqueras, forestales y agroindustriales, por lo cual el estado promoverá la adquisición e investigación de nuevas tecnologías para una mayor producción en el campo agropecuario. “ARTÍCULO 65. La producción de alimentos gozará de la especial protección del Estado. Para tal efecto, se otorgará prioridad al desarrollo integral de las actividades agrícolas, pecuarias, pesqueras, forestales y agroindustriales, así como también a la construcción de obras de infraestructura física y adecuación de tierras. De igual manera, el Estado promoverá la investigación y la transferencia de tecnología para la producción de alimentos y materias primas de origen agropecuario, con el propósito de incrementar la productividad”. (Minagricultura, 2018).

Artículo 3 del decreto 1985 de 2013. Adicionado por el artículo del decreto 2369 de 2015, En el cual se establece como función principal del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural la función de promover la protección y el aprovechamiento óptimo de los recursos vegetales y animales del país en relación con la ley 165 de 1994.

Que los artículos 8 y 9 del convenio sobre la diversidad biológica establecen para las partes contratantes, en la medida de lo posible y según proceda, deberes de conservación in situ y ex situ de los recursos biológicos, y que se establecerán y mantendrán instalaciones para la conservación ex situ y la investigación de plantas, animales y microorganismos.

El numeral 24 del artículo 3 del Decreto 1985 de 2013 establece como función del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Promover la protección y el correcto aprovechamiento de los recursos genéticos vegetales y animales del país, de acuerdo con lo previsto en la Ley 165 de 1994,

que sean de interés para el sector Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural”, función que fue adicionada por el artículo 1 del Decreto 2369 de 2015. (Minagricultura, 2018).

El decreto 2141 de 1992, por medio del cual se reestructuró el Instituto Colombiano Agropecuario – ICA, dispone en el numeral 6 de su artículo 3, como una de las funciones a cargo de esa entidad, la de “procurar la preservación y el correcto aprovechamiento de los recursos genéticos vegetales y animales del país, dentro de las actividades de ciencia y tecnología que desarrolle”. De la misma forma, en posterior reestructuración del ICA, el numeral 8 del artículo 6 del Decreto 4765 de 2008 ratificó la citada función y dispuso: “procurar la preservación y el correcto aprovechamiento de los recursos genéticos vegetales y animales del país, en el marco de sus competencias”. (Minagricultura, 2018).

Justificación técnica dada en Bogotá D.C., a los 6 días del mes de agosto de 2018.

6. Diseño Metodológico

6.1. Ubicación

El área de estudio está situada en la finca La Portada, presente en la vereda San Miguel, del Sector El Mesón del Municipio de Pandi – Cundinamarca, el cual tiene presencia de producción de Café Arábica de la región, éste con carácter comercial local y regional.

En la zona se pueden visualizar cultivos de café, cultivos secundarios de plátano, maíz, aguacate y banano, estructuras civiles donde residen los agricultores, vegetación boscosa y senderos o límites que sectorizan la vereda.

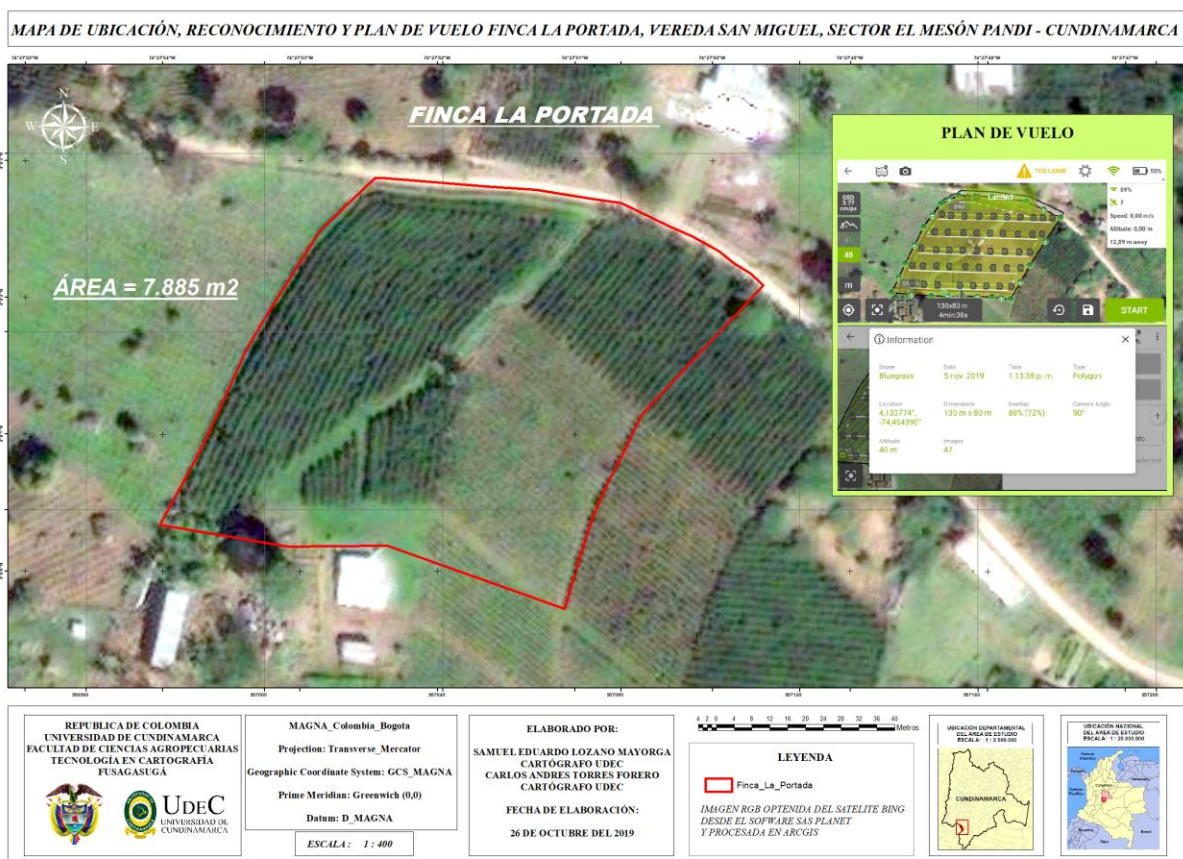
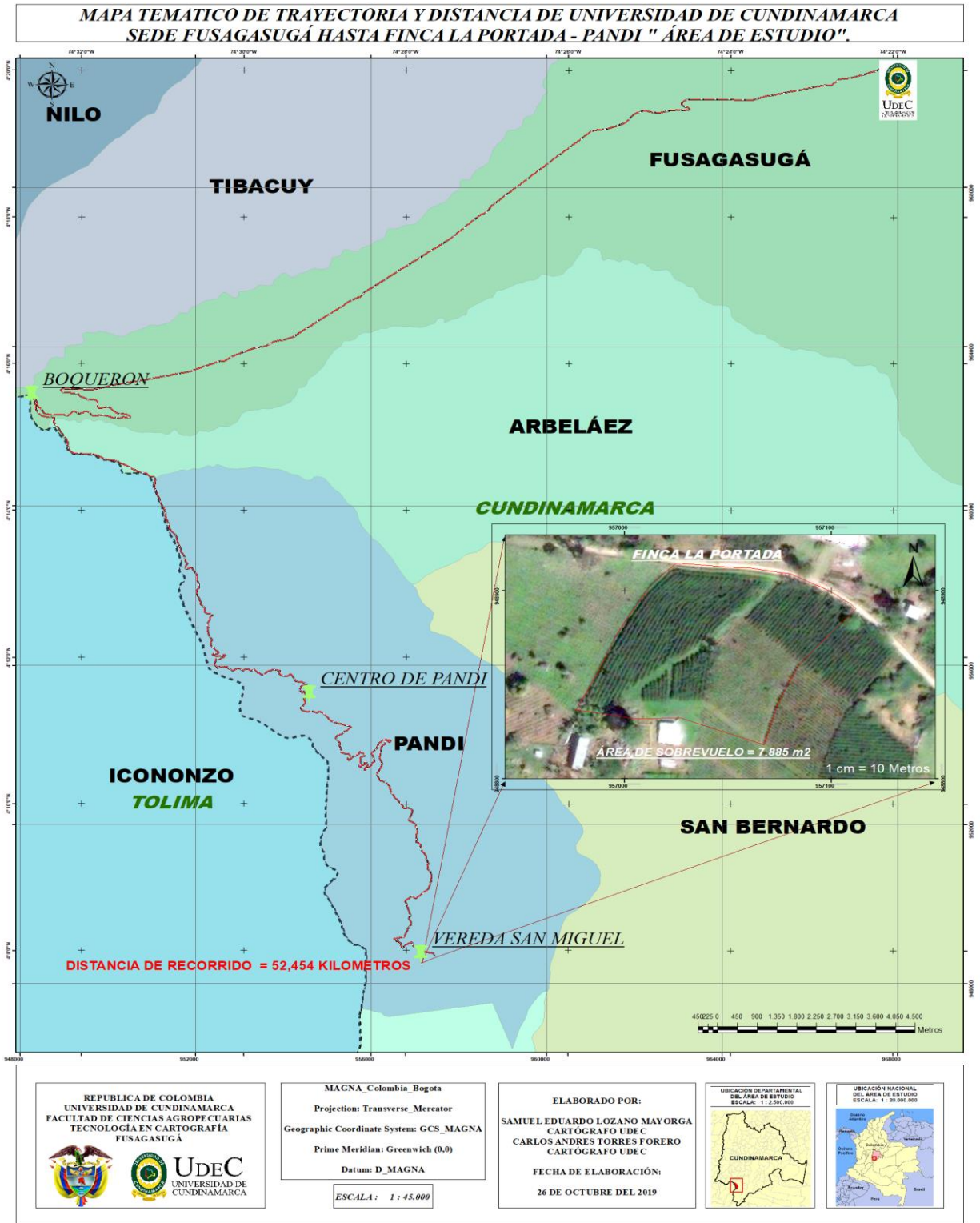


Ilustración 1. Mapa de la zona de estudio Finca La Portada.

Fuente: Propia



**Ilustración 2. Mapa de ubicación del área de estudio.
Fuente: Propia.**

La siguiente ilustración presenta un modelo de perfiles de cota de los distintos municipios que marcan la ruta desde la universidad de Cundinamarca sede Fusagasugá hasta el sector del estudio, vereda San Miguel Pandi-Cundinamarca.

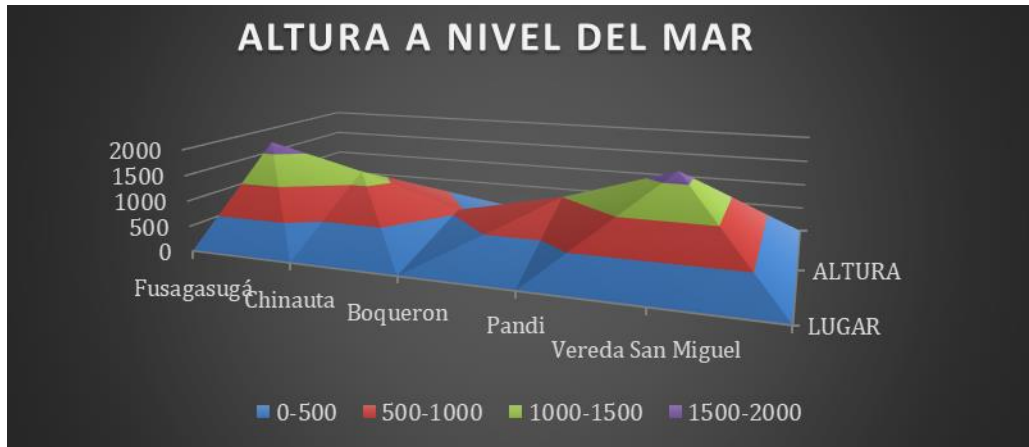


Ilustración 3. Gráfico de alturas.

Fuente: Propia.

LUGAR	ALTURA MSNM
Fusagasugá	1700
Chinauta	1200
Boquerón	550
Pandi	1000
Vereda San Miguel	1683

Tabla 1. Diferencia de Alturas.

Fuente: Propia

6.2. Metodología

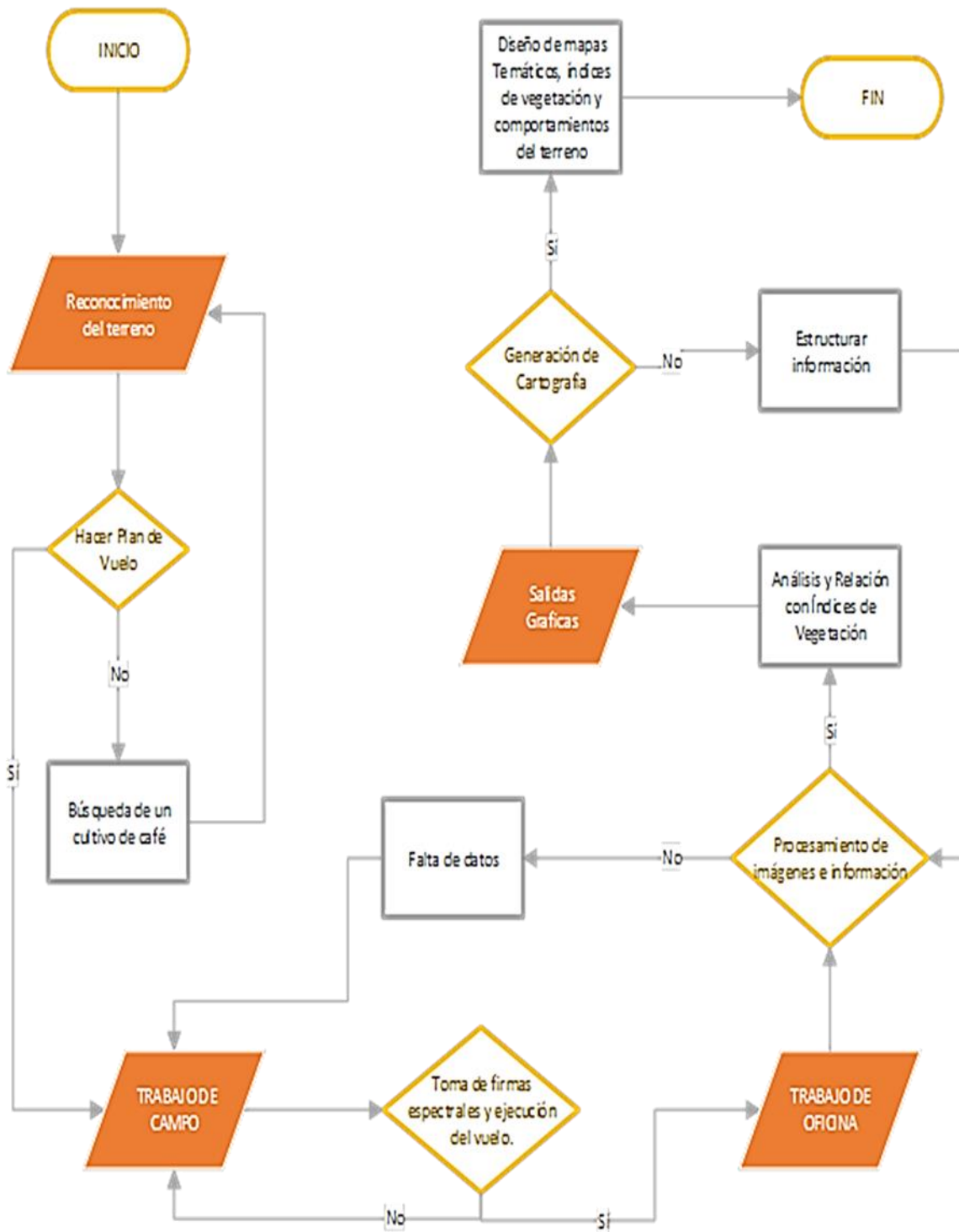


Ilustración 4. Diagrama de Flujo Metodología.

Fuente: Propia.

6.2.1. Diseño de Vuelo

En la primera fase se realizó un reconocimiento del cultivo, en el cual se fotografiaron todas las características del terreno y se capturaron algunas coordenadas de los linderos del cultivo con el fin de establecer el área de estudio. “Estos proyectos se georreferencian mediante una geometría de punto a través del establecimiento de un waypoint en el terreno donde se localiza el proyecto. Se debe tener en cuenta lo siguiente: i) El funcionario se ubica con su dispositivo GPS en el sitio donde se desarrolla el proyecto. ii) Una vez el equipo tenga comunicación con un número suficiente de satélites que le permitan generar las coordenadas de la actual ubicación” (UNODC, s.f, pág. 2)

Una vez concluido el reconocimiento, el siguiente paso que se realizó fue la descarga de una imagen satelital georreferenciada de la zona donde se encontraba la finca La Portada, esto se realizó a través del software SAS Planet, por medio del satélite Bing con una imagen descargada y puntos GPS geolocalizados y tomados en campo. Con ello se especificó finalmente el área de estudio donde se realizaría el vuelo.

Para la realización del plan de vuelo, se utilizó el software Pix4Dcapture en el cual, a partir de un archivo kml; en este caso la imagen georreferenciada de SAS Planet, se modeló el área donde se realizaría la toma de imágenes, una vez obtenida el área de vuelo se ajustó la orientación de las líneas de vuelo, esta se modificó en dirección oeste – este ya que la diferencia de alturas en la finca la Portada era mayor en este sentido. Una vez modificada la orientación del vuelo se ajustó la altura del VANT con respecto al punto en donde se inició la misión de vuelo, secuencialmente el software automáticamente ajustó el GSD (predeterminado en centímetros por pixel), finalmente se ajustó la velocidad del VANT y el traslape de las imágenes. Una vez se completaron las especificaciones

del plan de vuelo el siguiente paso que se ejecutó fue la verificación de los requisitos de vuelo en donde se calibró el VANT con los distintos giros sobre sus ejes y se calibro la cámara multispectral con la tabla de referencia, una vez fijadas las especificaciones del vuelo y los chequeos se ejecutó finalmente el vuelo.

La ejecución del vuelo fue supervisada por el docente Edier Fernando Ávila Vélez el cual dispone de una amplia experiencia y cuenta con la licencia para el manejo de los vehículos aéreos no tripulados.

6.2.2. Procesamiento de Imágenes

Una vez ejecutado el vuelo se trasladaron las imágenes tomadas a un ordenador donde se realizó el procesamiento de estas por medio del software Pix4Dmapper, el procesamiento consistió en la creación de un mosaico de las imágenes multispectrales, en el cual se combinaron todas las imágenes capturadas en el vuelo y se les dieron coordenadas, esto con la finalidad de generar una orto imagen en la cual se pudiera visualizar en las diferentes bandas (verde, roja, infrarrojo cercano y borde rojo) la totalidad del cultivo donde se realizó el estudio.

Una vez generada la ortoimagen en las distintas bandas por medio de la aplicación de fórmulas se realizó la generación de los diversos índices (NDVI, GNDVI Y RVI), con los cuales se realizó el análisis de las condiciones que presentaban las distintas coberturas capturadas en el vuelo.

6.2.3. Análisis de Firmas

Seguidamente de la ejecución del vuelo se realizó la captura de las firmas espectrales de las diversas coberturas presentes en la finca La Portada, esto utilizando el espectroradiómetro de campo ASD Field Hand Held 2.

Posteriormente se utilizó el ViewSpecPro para el análisis, pues esta herramienta modela el comportamiento espectral de cada elemento existente dentro de la zona de estudio y enumerado para determinar su variabilidad con respecto a los demás objetos que se capturaron dentro de la zona de estudio, obteniendo información enriquecedora puesto que las longitudes de onda dentro de la banda de cada objeto varía según su capacidad de absorber o reflejar luz solar, en este caso, medible en niveles digitales.

Cabe resaltar que para el presente proyecto se realizó la captura tanto de imágenes multiespectrales como de firmas espectrales, ya que, al analizar estos dos tipos de información de un área en específico, se puede determinar de forma más precisa el estado y comportamiento de las diversas coberturas presentes en el área de estudio.

6.2.4. Salidas Gráficas

Una vez generados los índices en el software Pix4Dmapper, por medio del software ArcMap se realizó la generación de las salidas graficas cargando las imágenes .tiff y generando la clasificación de los valores de los índices, en donde finalmente se realizó la plantilla donde se presentaron los resultados de los índices y análisis trabajados.

6.3. Equipos

6.3.1. Parrot Bluegrass

Los equipos que se implementaron para la realización del presente trabajo fueron un VANT Parrot Bluegrass perteneciente a la Universidad de Cundinamarca, con el cual se realizó la toma de imágenes aéreas, este VANT, presenta una duración de batería de 25 minutos, una capacidad de despegue y aterrizaje vertical además incorpora tecnología avanzada, que permite estabilizar y volar mediante la incorporación de GPS. Además, este equipo trae incorporado un sensor multiespectral líder en la industria Parrot Sequoia y una cámara frontal RGB de 14 MP.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Generalidades	Peso: 1850 g. Tamaño: 355 mm x 407 mm x 140 mm. Hélices desmontables para transporte fácil.
Wifi y Transmisiones	Alcance: Hasta 2 Km con el Parrot Skycontroller 2, en una zona sin interferencias ni obstáculos. Wifi tipo AC, 2 antenas doble banda (2,4 y 5 GHz)
Batería de alta capacidad	Duración de la batería: 25 min. Batería de polímero de litio de 6700 mAh.
Sensores	GPS + GLONASS integrados. Sistema de navegación inercial (INS). Altimetro. Ultrasonidos. Cámara vertical de flujo óptico.
Camara frontal	Foto: Cámara gran angular de 14MP. Video: 1080p Full HD. Transmisión de video: 360p / 720p. Memoria interna de video: DE32 GB.
Características generales	Tamaño: 59x41x28 mm. Peso: 72 g. Modo foto: hasta 1 fps. Almacenamiento interno: almacenamiento integrado de 64 Gb. Unidad de medición inercial (IMU) y magnetómetro. Potencia: 5 W (máx. ~12 W).
4 Cámaras, una banda de obturador global.	Resolución: 1,2 Mpx, 1280x960 píxeles. HFOV: 61.9° VFOV: 48.5° DFOV: 73.7°
4 Bandas separadas	Verde: 550 nm +/- 40 nm. Rojo: 660 nm +/- 40 nm. Red Edge: 735 nm +/- 10 nm. Infrarrojo cercano (NIR): 790 nm +/- 40 nm.
Cámara RVA	Resolución: 16 MP, 4608x3456 píxeles. HFOV: 63.9° VFOV: 50.1° DFOV: 73.5°
Sensor de luz solar	Tamaño: 47x39,6x18,5 mm. Peso: 35 g. 4 sensores espectrales (filtros idénticos al cuerpo) GPS. Unidad de medición inercial (IMU) y magnetómetro. Ranura para tarjeta SD. Potencia: 1 W.



Tabla 2. Especificaciones técnicas Dron Parrot Bluegrass.

Fuente Propia.

6.3.2. Sensor Multiespectral (Cámara multiespectral, Parrot Sequoia+)

El VANT trae incorporado este sensor multiespectral el cual ofrece una solución adaptable y compatible con todos los drones. Este sensor fue el implementado para la generación de las imágenes en las distintas bandas (verde, rojo, infrarrojo cercano y borde rojo).

Las imágenes capturadas en el espectro infrarrojo, junto con el espectro visible, son muy útiles generalmente en la agricultura de precisión, esto gracias a que por medio de estas imágenes es posible visualizar la cantidad de clorofila presente en las hojas además de la tasa fotosintética, por medio de dichos factores es posible detectar procesos en los cultivos tales como el estrés en la vegetación, la presencia de enfermedades o plagas, falta de nutrientes o falta de agua.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
CÁMARA RGB 16 MPIX	Definición: 4608x3456 pixeles. HFOV: 63.9° VFOV: 50.1° DFOV: 73.5°
DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS	59 mm x 41 mm x 28 mm. 72 g (2,5 oz). Hasta 1 fps. Almacenamiento incorporado de 64 GB. IMU & magnetómetro. 5 W (pico ~12 W).
4 CÁMARAS CON OBTURADOR GLOBAL DE UNA SOLA BANDA DE 1,2 MPIX	Definición: 1280 x 960 pixeles. HFOV : 61.9° VFOV : 48.5° DFOV : 73.7°
SENSOR SOLAR	4 sensores espectrales (los mismos filtros que el cuerpo) GPS. IMU & magnetómetro. Ranura para tarjeta SD. 47 mm x 39,6 mm x 18,5 mm. 35 g (1,2 oz). 1 W.
4 BANDAS DISTINTAS	Verde (550 BP 40). Rojo (660 BP 40). Borde rojo (735 BP 10). Infrarrojo cercano (790 BP 40).



Tabla 3. Especificaciones técnicas cámara multiespectral, Parrot Sequoia+.

Fuente: Propia

6.3.3. Sensor Óptico Terrestre (Espectroradiómetro de Campo ASD Field Hand Held 2)

El SOT (Sensor Óptico Terrestre) que se utilizó en este proyecto fue un Espectroradiómetro ASD Field Hand Held 2, perteneciente a la Universidad de Cundinamarca, con el cual se realizó la captura de las firmas espectrales de las diversas coberturas presentes en el área de estudio.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Rango 325 nm – 1075 nm.	
Velocidad de integración variable.	
Ordenador y teclado integrados. Pantalla VGA color.	
Peso 1,3 kg.	
Memoria interna más de 20 000 espectros.	
Conectividad: 2 puerto USB; 1 puerto mini USB.	
Software propio ara post proceso (RS3 y ViewSpec).	
Accesorios y calibraciones.	

Tabla 4. Especificaciones técnicas Espectroradiómetro.

Fuente: Propia

Este equipo, al ser utilizado como un sensor pasivo, utiliza la radiación solar reflectada por la cubierta en el espectro visible e infrarrojo cercano, por lo tanto, se debe tener en cuenta que, al realizar prácticas con este equipo, las condiciones atmosféricas y de iluminación del momento de la obtención de la firma espectral influyen bastante. Por lo cual no es recomendable usar este equipo en presencia de alta nubosidad.

6.3.4. Software Pix4Dmapper

Este es un software especializado en fotogrametría para mapeo profesional con drones, el cual trabaja con imágenes RGB, térmicas y multiespectrales, con resultados como: Nube de puntos a todo color (.las, .laz, .ply, .xyz), Ortomosaicos (GeoTiff “.tif”, .kml), DSM-Modelos digital de superficie(GeoTiff “.tif”, .xyz, .las, .laz), Mallas Texturizada en 3D(.ply, .fbx, .dxf, .obj, .pdf), Mapas índices (GeoTiff “.tif”, .shp) y Mapas Térmicos (GeoTiff “.tif”) (SA, 2019). La Universidad de Cundinamarca tiene en disponibilidad 25 licencias de las cuales para este proyecto se hizo uso de una de ellas.



Pix4Dmapper

Ilustración 5. Logo Pix4Dmapper.
Fuente: (SA, 2019).

6.3.5. Software PIX4D Fields

Este software convierte las imágenes multiespectrales en mapas precisos de índices de vegetación, esto lo hace implementando imágenes RGB y multiespectrales para generar ortomosaicos y mapas de alta resolución. La licencia con la cual se trabajó en este proyecto pertenece a la Universidad de Cundinamarca.



Pix4Dfields

Ilustración 6. Logo Pix4Dfields.
Fuente: (SA, 2019).

6.3.6. Aplicación Móvil PIX4D Capture

Por medio de esta aplicación móvil se puede diseñar el plan de vuelo, ajustando todos los parámetros que se van a fijar para la realización de éste. Permite estructurar de forma sencilla el área de trabajo, ajustar las líneas de vuelo, el traslape de las fotos, la altura de vuelo, el GSD calculado en centímetros por píxel, la velocidad de la aeronave y el tiempo de misión. Esta aplicación permite la generación de varios proyectos, además se pueden cargar mapas bases en el caso de estar conectado a una red de internet o permite cargar archivos KML para guiarse en tal caso de no tener conexión red de internet. Para el proyecto se hizo la descarga de esta aplicación sin ningún problema pues esta aplicación se obtiene en la play store de forma gratuita.



Ilustración 7. Logo Pix4DCAPTURE.
Fuente: (SA, 2019)

6.3.7. Aplicación Móvil Ctrl + Parrot

Es el controlador de VANT Parrot Bluegrass, es el complemento de conexión del dron con el software Pix4Dcapture, en el cual se puede visualizar y predeterminar variables como la altitud, coordenadas, estado de la batería y la conectividad vía wifi del dron con la aplicación PIX4D CAPTURE, quien es la que modela el sobrevuelo.



Ilustración 8. Logo Ctrl + Parrot.

Fuente: (SA, 2019).

6.3.8. Software SAS Planet

Este programa puede ser implementado como un visor geográfico desde el cual se pueden realizar mediciones y visualizar capas temáticas, además este programa permite descargar en diferentes formatos ráster los datos de los mapas base empleados en visores y navegadores entre las capas de visualización y descarga se encuentra una amplia gama de imágenes de satélite como lo son Google, Yahoo, ESRI, OSM, Nokia, Bing, etc. Para el presente proyecto se hizo la descarga de este programa para la descarga de imágenes georreferenciado del área de estudio.



Ilustración 9. Logo SAS Planet:

Fuente: (SIG TERRA, 2018)

6.3.9. Software ArcGIS

ArcGIS es el nombre general de un conjunto de softwares enfocados en los sistemas de información geográfica, estos son creados y comercializados por la empresa ESRI. Dentro de esta gama podemos encontrar diversas aplicaciones como ArcGIS Server o ArcGIS Móvil, pero la más conocida es ArcGIS Desktop, el conjunto de aplicaciones SIG de escritorio que está conformada por las diversas herramientas que son ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe. Este conjunto de herramientas permite la generación y edición de información geográfica por medio de su interfaz, permitiendo trabajar tanto con archivos vector (punto, línea, polígono) o archivos ráster (imágenes). Para el proyecto se implementaron las licencias temporales proporcionadas por la Universidad de Cundinamarca.



Ilustración 10. Logo ArcGIS.
Fuente: (ArcGIS, 2019)

6.3.10. Software VIEWSPECPRO

El ViewSpecPro es el software predeterminado para el Espectroradiómetro ASD Field Hand Held 2, con el cual se hace la visualización de las firmas espectrales según sus niveles digitales de longitudes de onda, dentro de los cuales se grafica en un plano con los niveles de longitudes de

onda desde 0 nanómetros hasta 1100 nanómetros, pero las bandas donde es posible visualizar realmente el espectro de cada objeto es a partir de los 400 hasta los 900 nanómetros, siendo la longitud de 400 a 500 la perteneciente a la banda azul; de 500 a 600 la longitud de la banda verde; de 600 a 700 de la banda roja; la banda de borde rojo de 700 a 750 aproximadamente y la banda del infrarrojo cercano dentro de la longitud de los 750 hasta los 800 nanómetros.

Este software permite subir cierta cantidad de firmas espectrales para predecir los comportamientos de la vegetación o de cualquier cuerpo existente dentro del área de estudio, permitiendo representar las firmas espectrales en ND (niveles digitales, valores de reflectancia, valores de radiancia - irradiancia, entre otros valores de medición).



Ilustración 11. Logo ViewSpecPro.
Fuente: (ASD, 2017)

6.4. Costos

COTIZACION AGRICULTURA DE PRECISION					
Nº	COMISION				
	TIPO	NOMBRES	VALOR DIA UNIDAD	TOTAL, DIAS	TOTAL
1	Cartógrafos	Samuel Eduardo Lozano Mayorga	\$ 80.000	8	\$ 640.000
		Carlos Andrés Torres Forero	\$ 80.000	8	\$ 640.000
2	Piloto UAV	NO APLICA	NO APLICA	1	UDEC
3	Ingeniero Agrónomo	NO APLICA	NO APLICA	1	CDCC
VIATICOS					
4	Transporte	Automóvil Comisión	\$ 120.000	3	\$ 360.000
5	Alimentación	Almuerzo y Refrigerio	\$ 12.000	19	\$ 228.000
EQUIPO					
HARDWARE					
6	UAV	Dron Parrot Bluegrass con cámara multiespectral Parrot Sequoia+	NO APLICA	1	UDEC
7	Espectroradiómetro	ASD Field Hand Held 2	NO APLICA	1	UDEC
8	Navegador GPS	GPS GARMIN	NO APLICA	3	UDEC
SOFTWARE					
9	Pix4D	NO APLICA	NO APLICA	8	UDEC
10	ArcGIS 10.6	NO APLICA	NO APLICA	8	UDEC
11	Paquete Office 365	NO APLICA	NO APLICA	1-Año	\$ 189.999
12	Google Earth	NO APLICA	NO APLICA	8	\$ 0
13	Pix4Dcapture	NO APLICA	NO APLICA	8	UDEC
TOTAL					\$ 2.057.999

Tabla 5. Tabla de Costos del Proyecto.

Fuente: Propia.

7. Resultados

A continuación, se reflejan los resultados obtenidos con base a los objetivos planteados de la presente investigación.

7.1. Índices de Vegetación

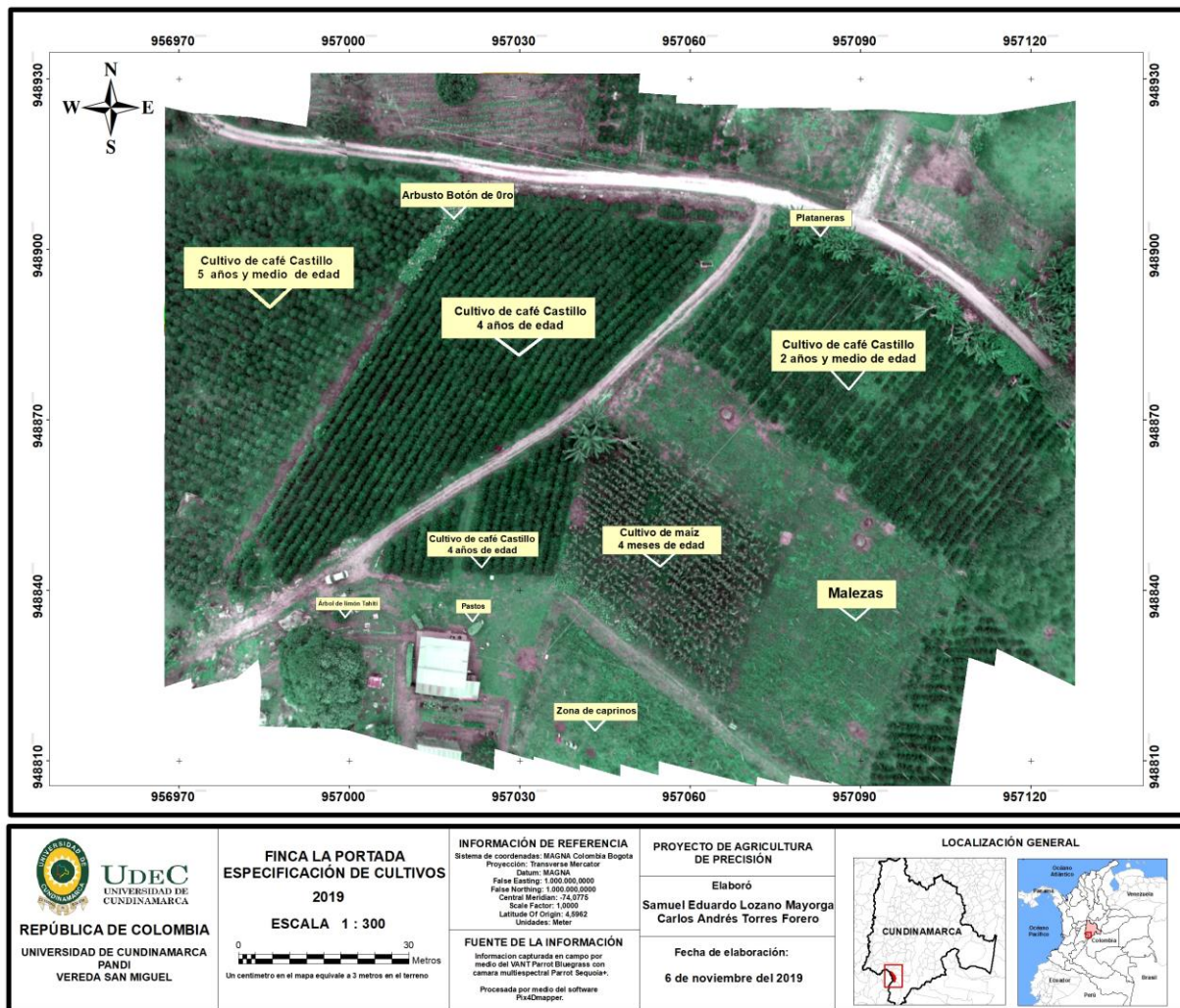


Ilustración 12. Mapa de cultivos presentes en la Finca la Portada.

Fuente: Propia

A partir de los valores obtenidos de cada banda, mediante el post proceso de las imágenes obtenidas en campo por medio del software Pix4Dmapper, elaboramos los cálculos correspondientes a cada índice cuyos resultados se mostrarán a continuación:

7.1.1. NDVI

El primer cálculo elaborado correspondió al índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), para la obtención de este índice se trabajaron las bandas del infrarrojo cercano y la banda roja, la fórmula que se aplicó para generar este índice en el software Pix4Dmapper fue:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Este índice se basa en el comportamiento radiométrico de las plantas con relación a los procesos de fotosíntesis y su estructura foliar, por medio del cual se puede determinar el estado de vigorosidad de las plantas (Díaz, 2015). Teniendo en cuenta que en el índice NDVI en el infrarrojo cercano las paredes de las células de las hojas que por lo general están llenas de agua son las que reflejan la energía, se determinó que al estar la planta bajo el ataque de una plaga o al presentar ineficiencias en su mantenimiento dicha reflectividad disminuye por lo tanto la reflectividad en el infrarrojo cercano disminuye y aumenta en la banda roja, esta diferencia es la que permite identificar una planta sana de una que se encuentra en malas condiciones.

Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores. (Díaz, 2015, p.43)

Con énfasis en lo anteriormente especificado, se realizó el análisis con relación al índice NDVI de los resultados obtenidos en la zona de muestra donde se llevó a cabo el vuelo.

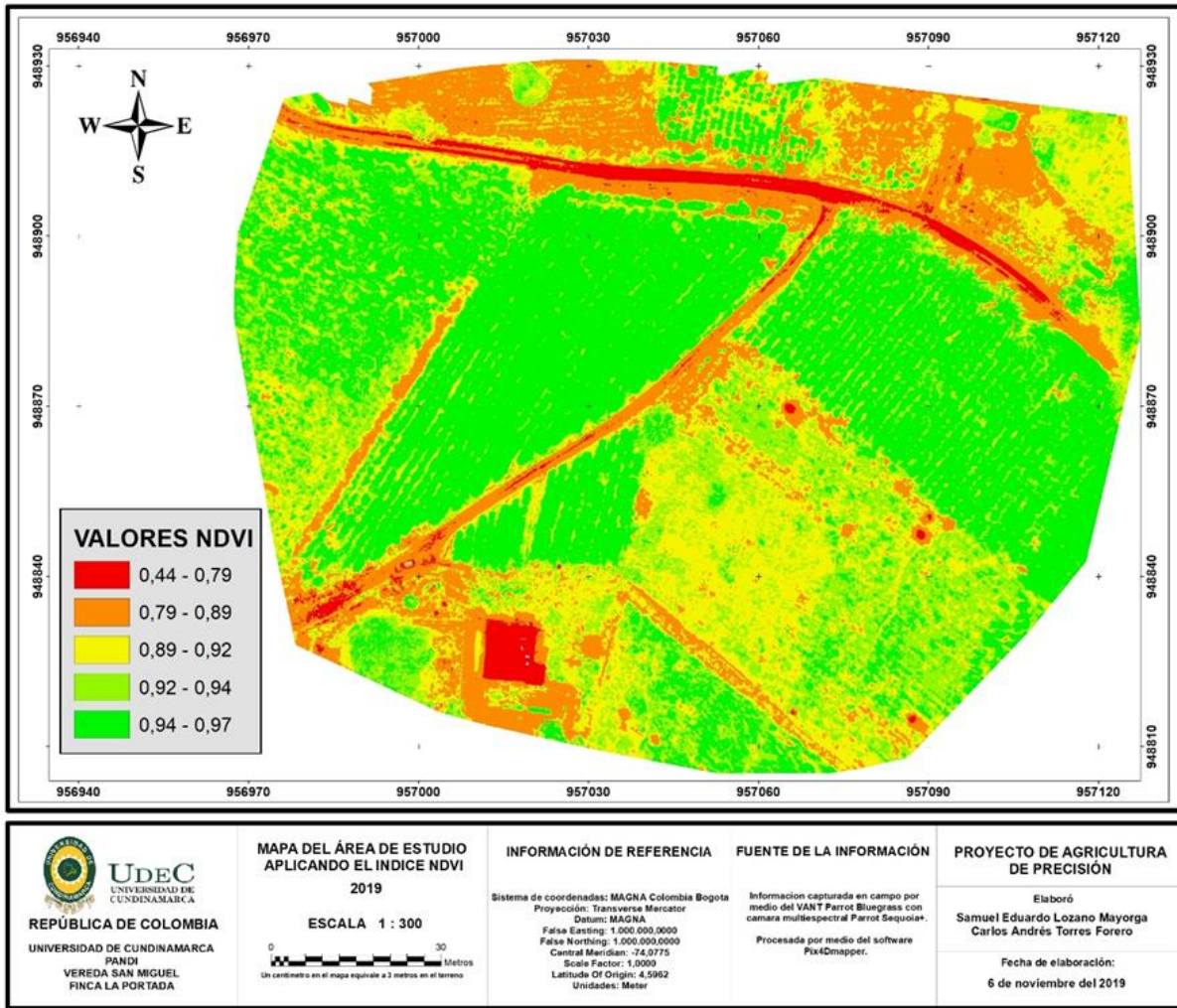


Ilustración 13. Mapa de índice NDVI.

Fuente: Propia.

Según los rangos de resultados obtenidos del índice NDVI se dedujo:

- Se pudo apreciar que los valores más bajos presentes en la imagen correspondieron a superficies que no presentan o presentan muy poca vegetación como lo es el caso de la vía y la edificación.
- El primer análisis en cuanto a vegetación determino que el cultivo de maíz está presentando deficiencias en cuanto a procesos de mantenimiento (se tiene constancia de

que en la finca no hay presencia de plaga en este cultivo), esto en base a que en la zona se están presentando tonalidades amarillas correspondientes a valores no tan altos, los cuales dan a entender que la planta no se encuentra en óptimas condiciones.

- En relación con el cultivo de preferencia para este proyecto correspondiente al café castillo “Coffea Arábica”, se pudo determinar por medio de este índice que el cultivo que tiene alrededor de 4 años al igual que el de 2,5 años presentan condiciones óptimas ya que los valores indican un alto nivel de vigorosidad.
- Enfocándonos en una comparación entre el café categorizado como café castillo 4 de 5,5 años presente al lado oeste de la imagen y el café castillo de 4 años el cual limita con este se presenció una clara diferencia entre los dos partiendo de las tonalidades amarillas presentes en gran parte del café 4 lo cual indica valores de vigorosidad con déficit que hacen alusión a un mal mantenimiento del cultivo.

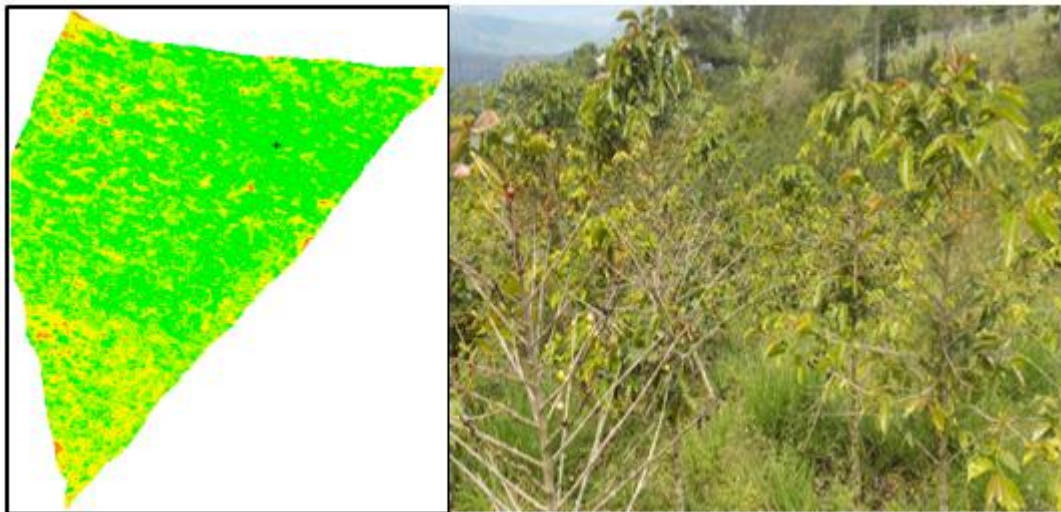


Ilustración 14. Cultivo de Café castillo 4 (5,5 años).

Fuente: Propia



Ilustración 15. Cultivo de café castillo (4 años).

Fuente: Propia.

- Las tonalidades correspondientes a valores bajos en la parte septentrional señalan zonas en las cuales recientemente se están generando plagas por la deficiencia de Nitrógeno y potasio en sectores del cultivo, en lo cual la cubierta de vegetación no es tan llamativa y destaca más la superficie de tierra.

7.1.2. GNDVI

El segundo índice aplicado fue el GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde), este es, una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo (Kemerer, 2007), (citado en Díaz, 2015). La fórmula implementada para generar este índice en Pix4dmapper fue la siguiente:

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

El índice GNDVI por lo general, es uno de los más implementados a la hora de determinar la capacidad de nitrógeno y agua de un cultivo (auravant, 2019). Los valores que arroja este índice comprenden un rango entre -1 y 1 y 0, a lo cual valores entre -1 y 0 corresponden a suelos desnudos, superficies de agua o plantas con déficit de nitrógeno y rangos entre 0 y 1 a cubiertas con vegetación en condiciones estables u óptimas.

Con énfasis en lo especificado anteriormente se realizó el análisis de los resultados obtenidos con la aplicación del índice GNDVI en el área de muestra donde se realizó el proyecto.

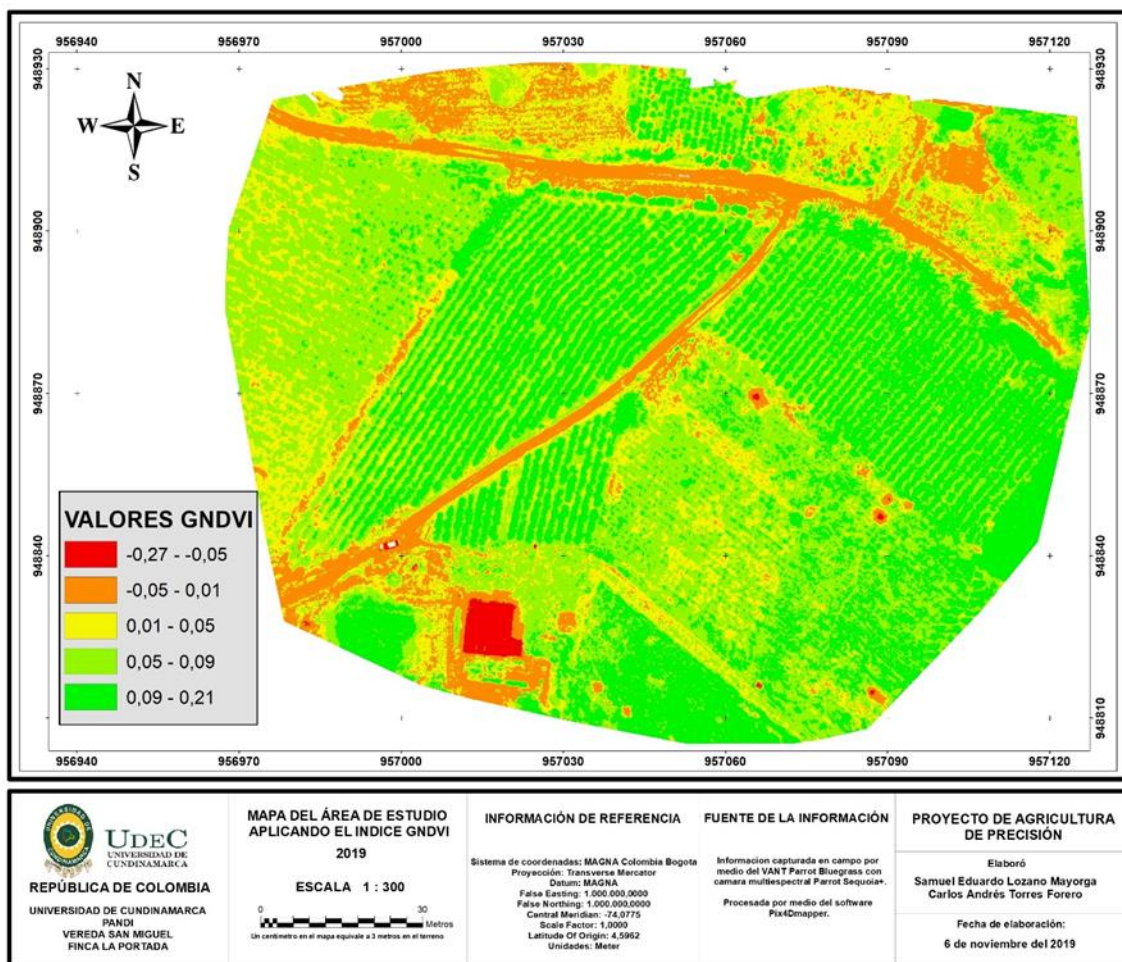


Ilustración 16. Mapa de índice GNDVI.

Fuente Propia.

En base a los resultados obtenidos con la aplicación de este índice se dedujo:

- Mediante la aplicación del Índice GNDVI, y con base a los valores determinados, se pudo apreciar al igual que el índice anteriormente aplicado (NDVI), que el cultivo que presenta un déficit en cuanto a nutrición y mantenimiento es el cultivo de café castillo 4, esto se pudo visualizar claramente en el mapa del índice GNDVI generado, donde se apreció una gran porción de la parcela con tonalidades amarillentas correspondiente a valores relativamente bajos de vigor.

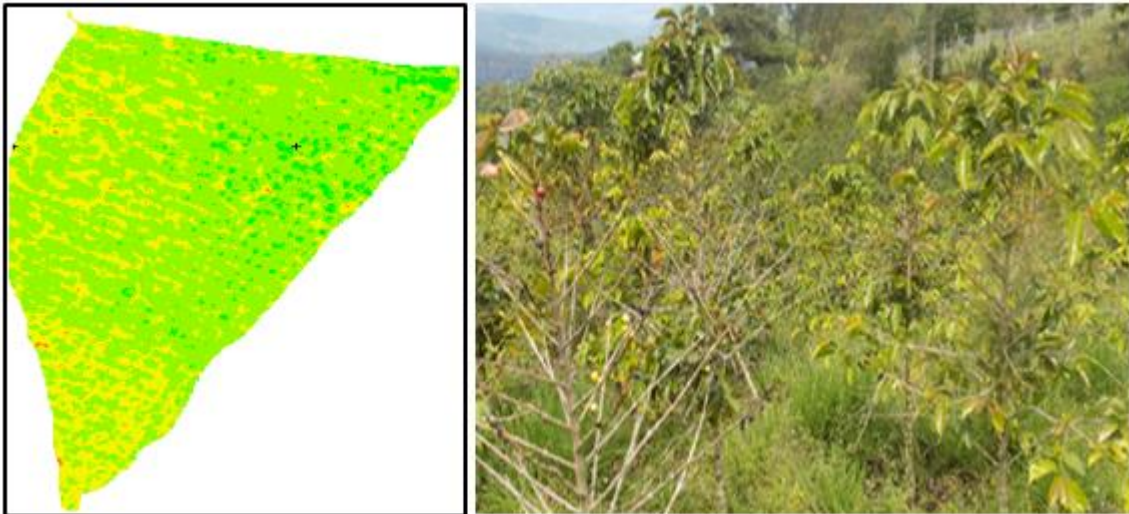


Ilustración 17. Cultivo de café castillo 4.

Fuente: Propia.

- Teniendo en cuenta que “hay cultivos que responden mejor a unas bandas que a otras y en cultivos de arroz o en maíz, en ocasiones el índice GNDVI da mejores resultados” Agromática, 2019. Con base a lo aclarado se apreció que por medio de este índice es más probable determinar el estado del cultivo de maíz, ya que al comparar los resultados obtenidos con el índice GNDVI y el NDVI, además se dedujo que es más factible

analizar los resultados por medio del GNDVI ya que resalta de mejor forma el follaje de la planta, permitiendo eliminar conceptos erróneos generados en base a las tonalidades relacionadas a valores bajos esto debido a que la planta de maíz no presenta una broza tan extensa y es posible alcanzar a captar otras superficies dentro del cultivo.

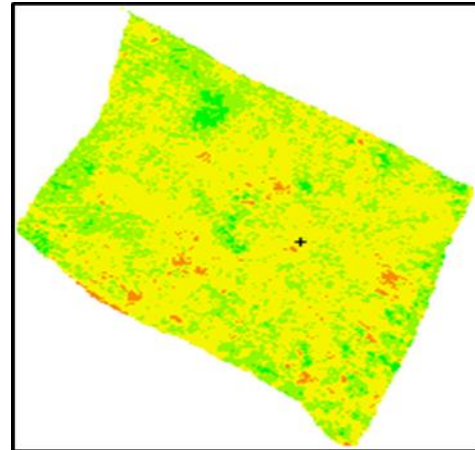
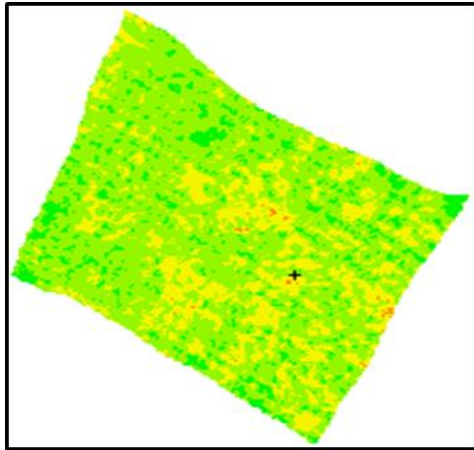


Ilustración 18. Cultivo de maíz aplicando el índice GNDVI. Ilustración 19. Cultivo de maíz aplicando el índice NDVI.

Fuente: Propia

Fuente: Propia.

- Mediante este índice se pudo identificar que el cultivo de Café Castillo de 4 años presenta una vigorosidad mayor que el cultivo de café 4 de 5,5 años. Esto se apreció comparando las tonalidades de verde asociadas a los valores de vigorosidad entre los dos cultivos.

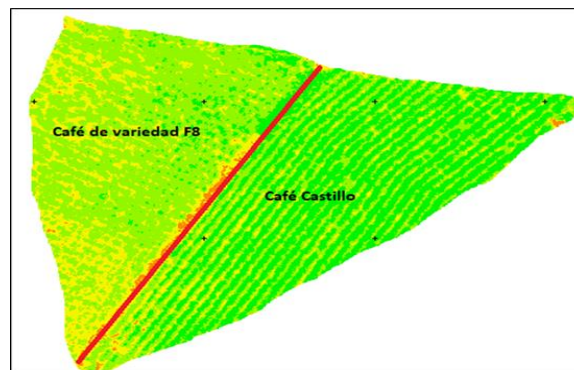


Ilustración 20. Comparación de cultivos de café.
Fuente: Propia.

- El índice GNDVI resulto ser más sensible que el índice NDVI a las variaciones de la clorofila, las cuales generan la reflectancia en los cultivos. Por lo cual se puede visualizar de forma más clara el déficit presente en los cultivos, asociados a su vez con las edades de estos.
- Cabe resaltar que las manchas rojas presentes dentro del área de cubierta de maleza que se encuentra a un costado del cultivo de maíz corresponden a áreas de quema, por lo cual sería incorrecto asociarlo con alguna problemática.

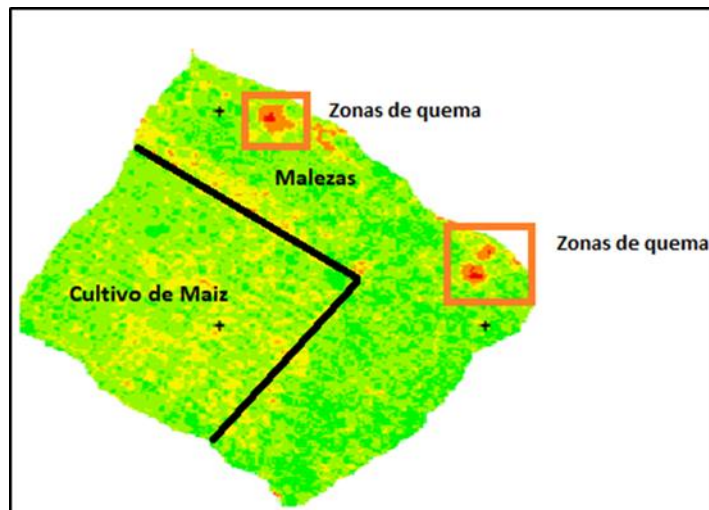


Ilustración 21. Áreas de quema.

Fuente: Propia.

- Las demás apreciaciones o deducciones de este índice pueden asociarse en gran forma a las del índice NDVI ya que, aunque los dos índices no se obtengan con las mismas bandas su diferencia a la hora de apreciar los resultados no es tan distinta.

7.1.3. RVI

El tercer y último índice aplicado fue el índice RVI (Índice Relativo de Vigor), según Indigo, (2017) se define como una transformación espectral diseñada para mejorar la contribución de las propiedades de la vegetación y permitir intercomparaciones espaciales y temporales confiables de la actividad fotosintética terrestre y las variaciones estructurales del dosel”. Este índice presenta una gran particularidad, a diferencia del Índice NDVI, el RVI solo se enfoca en vegetación ignorando el resto de las superficies.

La fórmula que se aplicó en el Pix4Dmapper para generar este índice fue la siguiente:

$$RVI = \frac{NIR}{RED}$$

Partiendo de que la vegetación se ve representada en valores altos de reflectancia en el infrarrojo cercano, el índice RVI en base a su fórmula tiende a relacionar valores altos con presencia de vegetación vigorosa, a lo cual este índice inicia su rango desde 0, partiendo de que valores bajos marcan suelos o superficies sin vegetación y valores altos son señales de vegetación.

Con énfasis en lo especificado anteriormente se realizó el análisis de los resultados obtenidos por medio de la aplicación del índice RVI.

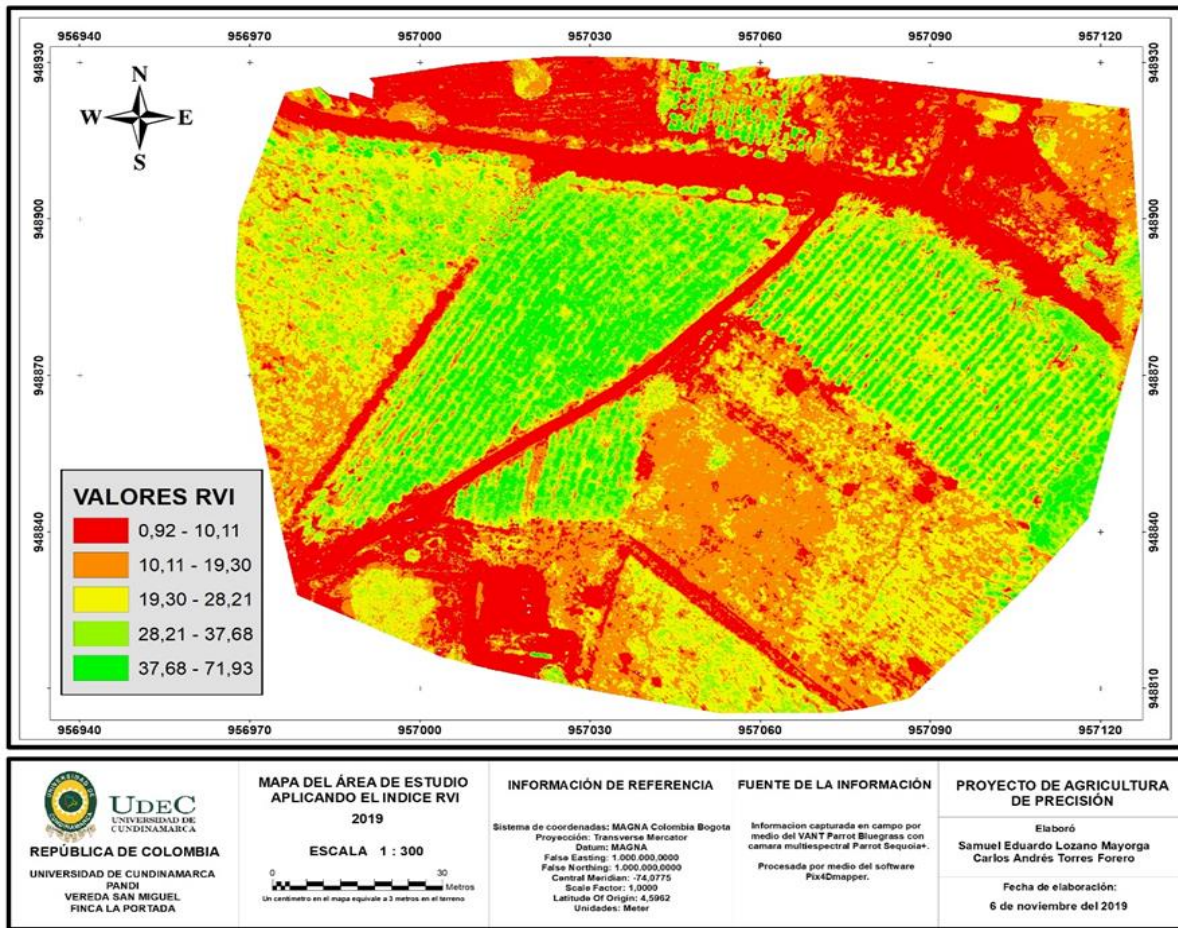


Ilustración 22. Mapa de índice RVI.

Fuente: Propia.

En base a los resultados obtenidos por medio de la aplicación de este índice se dedujo:

- El índice RVI presenta un enfoque mayor en cuanto a vegetación, esto permitió identificar de forma más sencilla el estado de los cultivos en relación con su vigorosidad, pues se pudo apreciar de forma más clara el follaje de las plantas.
- Gracias a la aplicación de este índice se pudo apreciar y comparar de forma más clara las deficiencias presentes en el cultivo de café clasificado como 4 de 5,5 años, en comparación con el de café castillo de 4 años, esto gracias a que pudo determinar de forma más clara la ausencia de follaje de la planta a causa de problemas relacionados

con el mal mantenimiento del cultivo. Las deficiencias de las plantas de café del cultivo 4 se pueden apreciar en el mapa con tonalidades rojizas y amarillas las cuales se encontraron presentes en gran parte del cultivo.

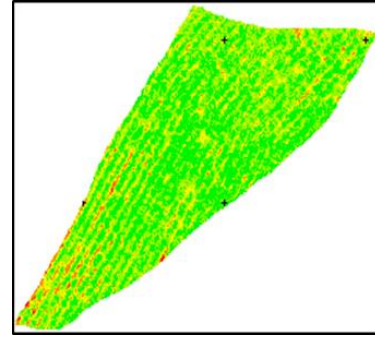
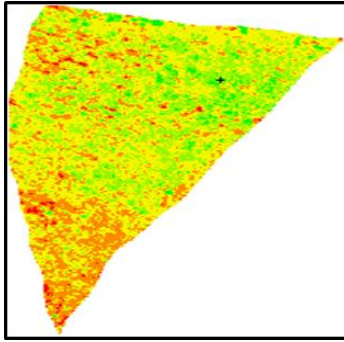


Ilustración 23. Cultivo de café 4 aplicando el índice RVI. Ilustración 24. Café castillo aplicando el índice RVI

Fuente: Propia.

Fuente: Propia.

- Cabe resaltar que el cultivo de maíz en este índice presentó tonalidades con valores asociados a poca reflectancia en el infrarrojo, es decir, bajas señales de vigorosidad, pero se debe tener en cuenta que este cultivo presenta una separación considerable y poco follaje a lo cual se alcanza a capturar superficie de suelo, es por esto la tonalidad presente en este cultivo corresponde a valores fotosíntesis bajos.

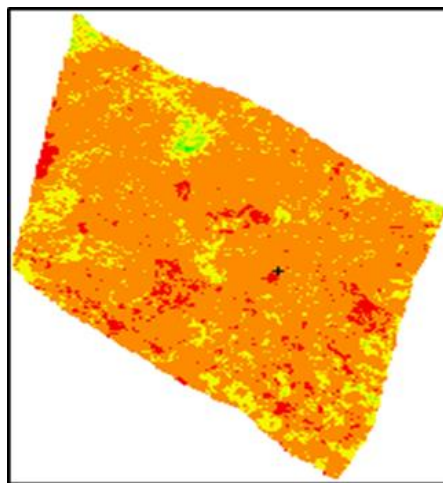


Ilustración 25. Cultivo de Maíz aplicando el índice RVI.
Fuente: Propia

7.2. Firmas Espectrales

“Longitudes De Onda Y Niveles Digitales”

El procedimiento para el análisis de las longitudes de onda capturadas en campo tiene inicio con la toma de firmas en campo con el Espectroradiómetro ASD Hand Held 2 para después ser modeladas en el software ViewSpecPro.

7.2.1. Primera comparación de Firmas

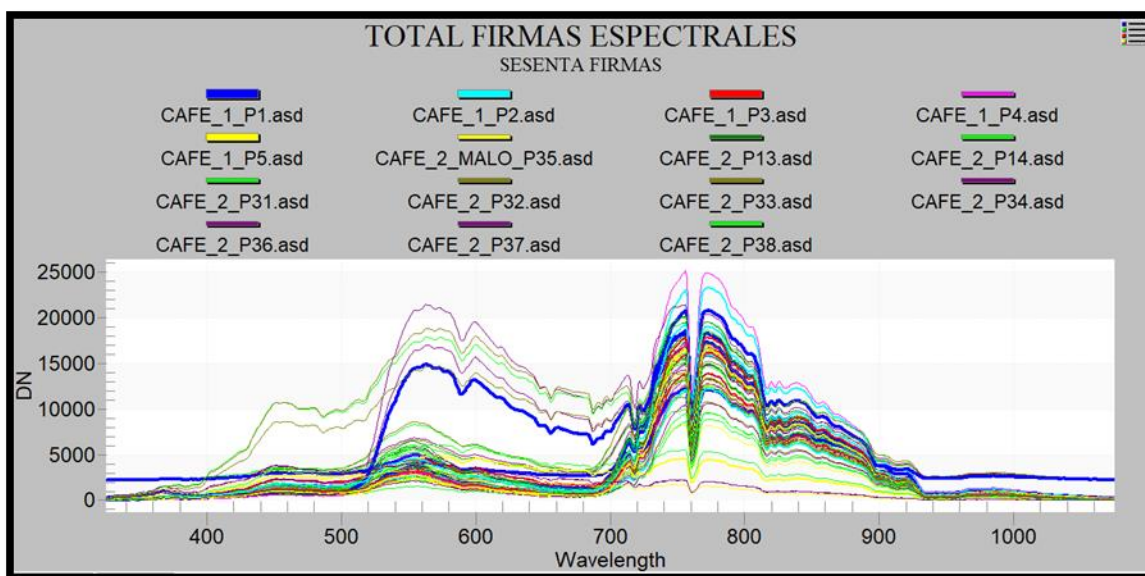


Ilustración 26. Gráfico de la primera comparación de firmas.

Fuente: Propia.

Las firmas obtenidas en este estudio dan un total de 60 firmas espectrales o también llamadas huellas espectrales, en donde cada firma representa un elemento sobre la zona de estudio general y principalmente de los cultivos de café castillo y los distintos elemento como vegetación existente adyacente a los cultivos principales como; zonas de quema, maleza, cultivo de maíz, una planta divisora llamada “Botón de Oro”, y algunas plantas frutales existentes dentro de la Finca La Portada como limón. La variable que determina el comportamiento espectral de cada elemento del proyecto es determinada por ND (Niveles Digitales).

7.2.2. Segunda comparación de Firmas

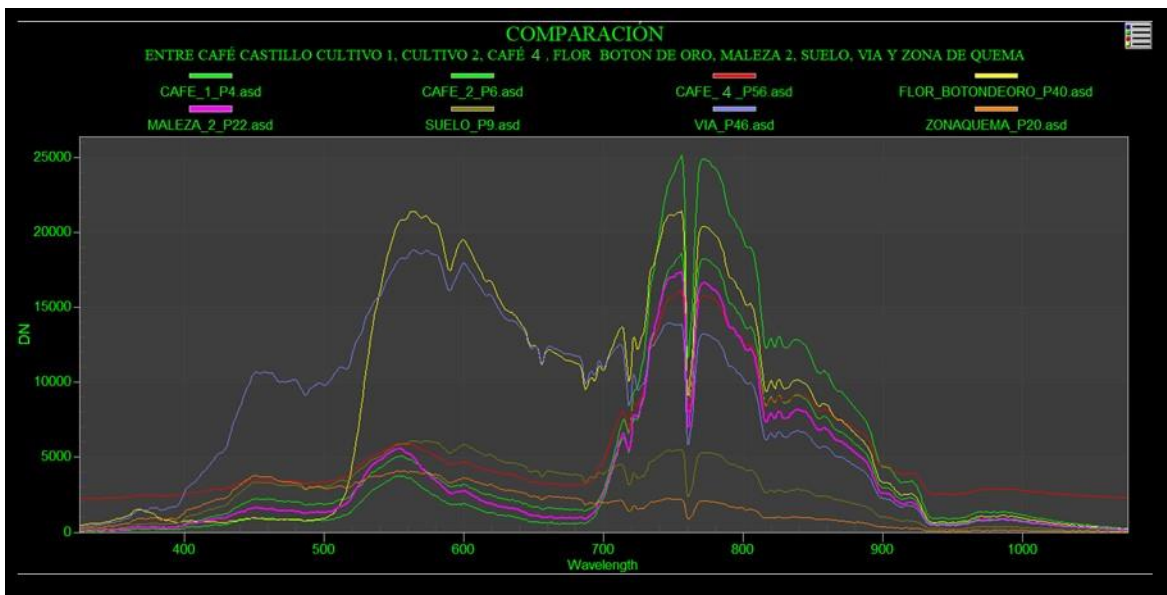


Ilustración 27. Gráfico de la segunda comparación de firmas.

Fuente Propia

En este gráfico, se buscó presentar la reflectancia de algunos elementos existentes en la Finca La Portada, como las parcelas de café 1, 2 y 3 donde su diferencia esta demarcada por la espacialidad y temporalidad que lleva en producción de café, el café 4 con deficiencia de nitrógeno y potasio, La planta que da limite a la finca, llamada botón de oro, Las Malezas que roban nutrientes en el cultivo, el Suelo, la Vía tipo 4 que sirve como acceso para llegar al sector el mesón y por ultimo una Zona de Quema; donde se concluye que los valores de la vía tienden a ser refractados más no adsorbidos en las bandas del verde y del rojo con un cambio suave en el borde rojo, donde se precipita a ser absorbido por la luz resaltante desde los setecientos nanómetros hasta el infrarrojo cercano y nuevamente refractado por la banda del infrarrojo cercano con cotas hasta de 18000 en niveles digitales. La Flor de botón de oro desarrolla tonalidades verdes en su mayor cota de curva en niveles digitales de hasta 20000 con redundancia entre los valores de quinientos nanómetros de

carácter verdoso pero una gran reflectividad de la energía en la banda del rojo lo que significa que esta planta fotosintéticamente no se reproduce con facilidad.

La zona de quema puede evidenciar sus valores más cercanos a cero, puesto que su referencia principal es el color negro, esta forma es parecida a la respuesta del suelo y su respuesta espectral en la banda del infrarrojo cercano es nula puesto que los niveles digitales capturados por el Espectroradiómetro se acercan a valores más cercanos a la referencia negra. La diferencia entre estos tres tipos de café tiene que ver con su temporalidad y el estado nutricional de la planta, donde el cultivo 1 y el cultivo 2 son verídicamente similares por su tiempo en producción de 4 años y el estado nutricional que se cataloga como un excelente estado, más el cultivo de café 4 con falencias nutricionales por deficiencias de nitrógeno principalmente muestra una iniciación en niveles digitales mayores a cero donde se mantiene hasta llegar a la banda del infrarrojo cercano donde su respuesta espectral es más baja a la del resto de cultivos.

7.2.3. Tercera comparación de Firmas

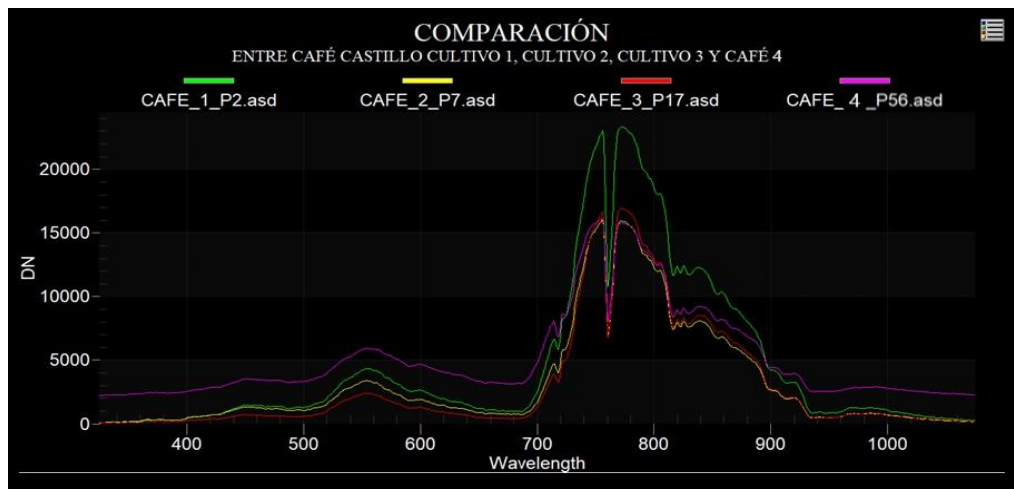


Ilustración 28. Gráfico de la tercera comparación de firmas.

Fuente: Propia

En esta comparación se analizan los cultivos de café castillo existentes en la finca La Portada y en este se infiere que los cuatro cultivos divididos así por su temporalidad tienen una firma en particular con varias similitudes, lo que indica una huella digital de este tipo de planta como lo es el café castillo, pero lo que marca su diferencia en reflectividad son los niveles digitales a los cuales llegan y las bandas donde estos tuvieron valores altos o bajos. El cultivo 1 con cuatro años de producción tiene la mayor reflectancia en la banda del infrarrojo cercano entre las cuatro clasificaciones de café lo que significa que el cultivo fotosintéticamente está en muy buen estado ya que en la banda del rojo tiene gran absorción de energía. El cultivo 2 tiene gran similitud con el cultivo 1 ya que arrojan los mismos resultados y la temporalidad es la misma. El cultivo 3 al igual que los dos ya nombrados está en gran condición, puesto que tiene una temporalidad de 3,5 años y los valores de reflectancia están cercanos a los índices que indican el buen estado de la planta; por último, el cultivo 4 el cual muestra claramente gran reflectividad en la banda del rojo y por consiguiente muestra deficiencia en su producción; conscientemente se tiene claro que este cultivo tiene insuficiencia de nitrógeno.

7.2.4. Cuarta comparación de Firmas

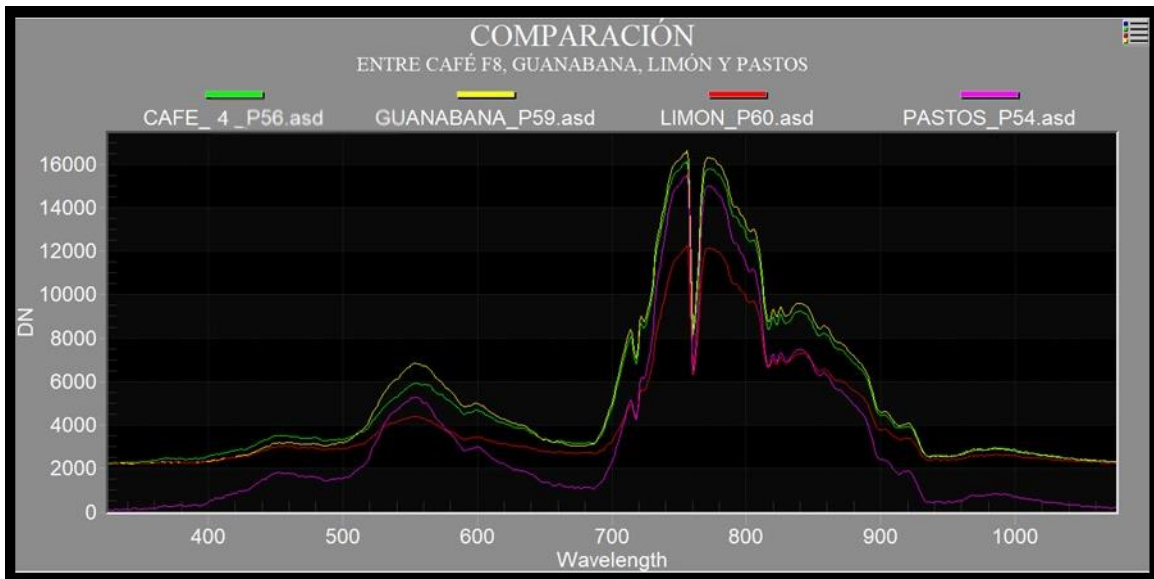


Ilustración 29. Gráfico de la cuarta comparación de firmas.

Fuente: Propia

Las variables por analizar en este gráfico son las del Café 4 con déficit de Nitrógeno, la guanábana con ácaros presentes en ella, una planta florecida de limón Tahití y pastos presentes dentro del cultivo de café 4. Donde llegamos a inferir que las variables con mejor estado son el pasto y el limón, ya que en sus longitudes de onda en la banda del rojo esta adsorbida mucho más que la planta de café siente este nuestro foco de estudio, puesto que el café se refracta en la banda del rojo quiere decir que tiene mejor actividad fotosintética con el resto de las variables. Como conclusión la invasión de pastos y la deficiencia en Nitrógeno provoca baja actividad fotosintética, café de baja calidad y poca producción.

7.2.5. Quinta comparación de Firmas

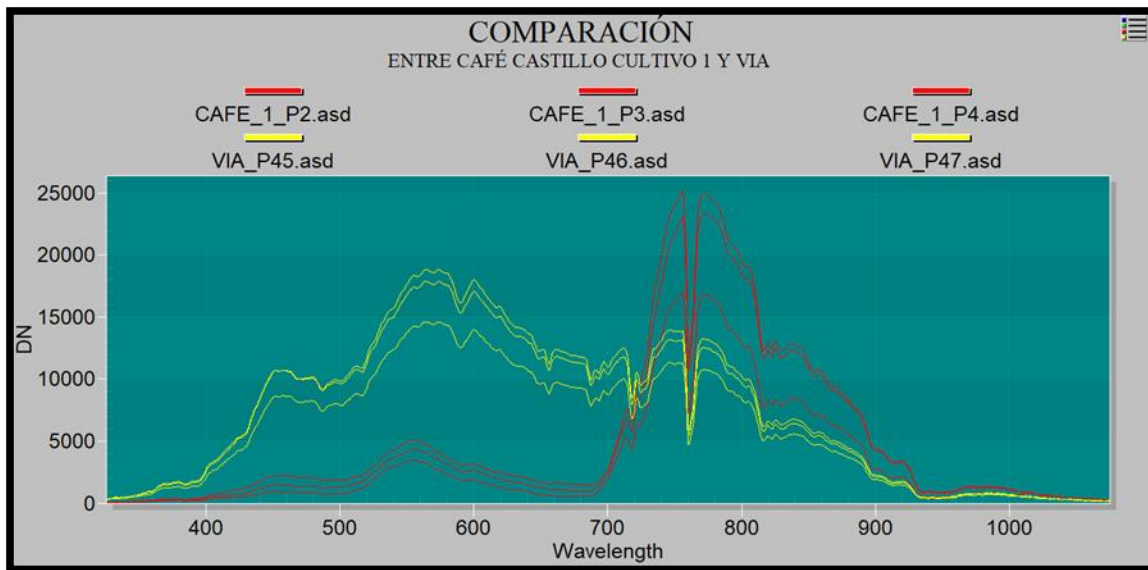


Ilustración 30. Gráfico de la quinta comparación de firmas.

Fuente: Propia

Las firmas espectrales del cultivo número 1 y de la vía son dos de los objetos en el terreno que marcan la pauta de diferencia, puesto que su reflectancia no es la misma; en el gráfico se demuestra a partir de los niveles digitales de la vía que son superiores en todas las bandas menos en el infrarrojo, puesto que la vía no tiene valores de absorbencia sino de total reflectancia. Por otro lado, el cultivo número 1 estando en su esplendor fotosintético presenta una huella espectral de vegetación sana dándole en los valores de la banda roja una caracterización de absorbencia, lo cual significa que fotosintéticamente es una planta en buen estado, puesto que sus niveles digitales en estas bandas acercan a los niveles digitales de 0 e inmediatamente aumenta de manera precipitada en la banda del infrarrojo mostrando su buen estado.

7.2.6. Sexta comparación de Firmas

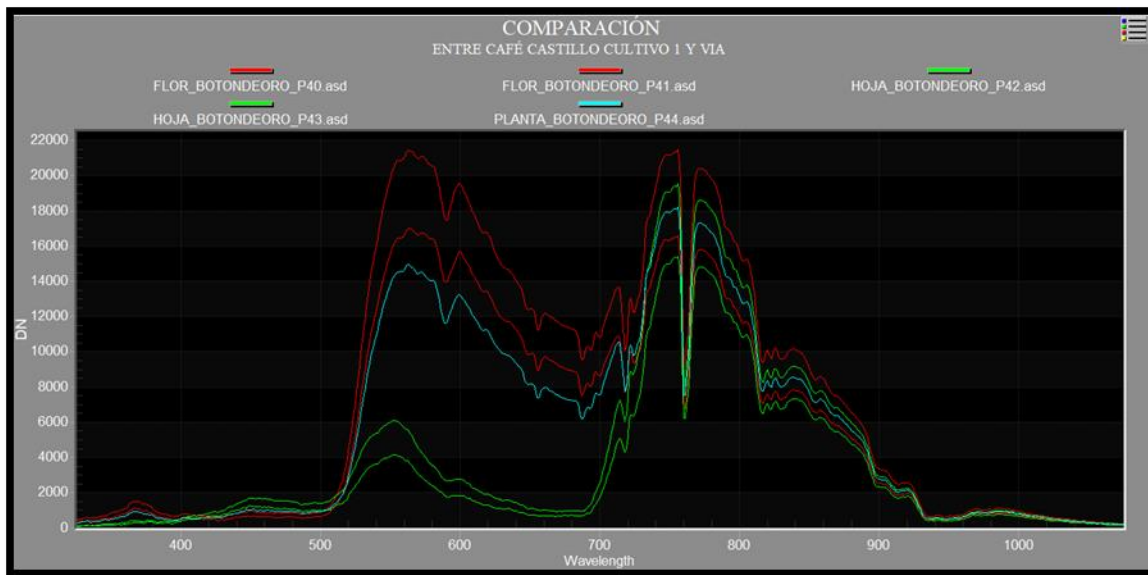


Ilustración 31. Gráfico de la sexta comparación de firmas.

Fuente: Propia

En el gráfico se busca demostrar el comportamiento espectral de la planta botón de oro en su totalidad haciendo un primer muestreo en la flor, para posteriormente hacerlo en la hoja y terminar en la planta en su totalidad, siendo los valores de la flor los más altos en niveles digitales sobre la banda verde en variables de reflectancia y en la banda roja de una manera mesurada, siendo la de la planta la más alta. La hoja botón de oro presenta en la banda del rojo una absorbencia total con respecto a la planta que delimita el cultivo de café castillo de 4 años, cultivo 2 en buen estado y el café 4 de 5,5 años con deficiencias nutricionales y de nitrógeno. Por último, la planta en su totalidad mostrando una firma espectral intermedia entre la flor y la hoja siendo los 3 valores de gran reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

8. Recomendaciones

- La aplicación de agricultura de precisión es uno de los métodos de agricultura a la vanguardia en la actualidad en países Latinoamericanos como: Argentina, Chile y Brasil. En donde se han generado alianzas entre Universidades y Empresas para la generación de proyectos, por medio de los cuales se busca optimizar costos y tiempo de producción. Es así como se justifica implementar estas técnicas en los cultivos presentes en la región del Sumapaz y el Departamento de Cundinamarca donde haya presencia de latifundios.
- Los costos en la agricultura del café se ven influenciados por los entes gubernamentales que controlan el mercado, decidiendo así las cantidades a ofertar según las exigencias de los demandantes, puesto que para cubrir una cantidad de calidad se necesita mantenimiento e inversión aproximada de un 40 a 45 por ciento total del costo en agroquímicos. Con la Agricultura De Precisión se busca que, a partir de información gráfica, cartografía temática y teledetección, el productor aplique las cantidades de agroquímicos necesarias para su cultivo, y este produzca un excelente producto al precio justo al no comprar agroquímicos innecesarios.
- La agricultura de precisión es un campo que promete reducir el impacto negativo del sector agrícola en el medio ambiente, aunque no se tenga en cuenta la agricultura, también es generadora de emisión de gases de efecto invernadero, además el uso de pesticidas y fertilizantes, así como la erosión del suelo, son causas de preocupación. Es por medio de las técnicas de agricultura de precisión, se espera controlar con mayor exactitud las diversas variables encontradas en las prácticas agrónomas, con el fin de reducir en gran medida los efectos negativos que éstas generan.

9. Conclusiones

- La teledetección u sensores remotos son de las técnicas más destacadas en la actualidad para obtener información de cualquier objeto sin necesidad de tener contacto con éste; es así como nace la agricultura de precisión, en este proyecto se presentó de forma clara la utilización de dicha técnica, puesto que al iniciar el trabajo de campo se capturaron firmas espectrales con el Espectroradiómetro con tan sólo aproximar el equipo unos centímetros sobre el elemento a estudiar; no solo la captura de firmas está correlacionada con la obtención de información a partir de sensores remotos, sino también la captura de imágenes, a partir de una cámara multispectral anclada a un objeto volador no tripulado.
- A partir de la información obtenida con este tipo de proyectos es posible determinar aspectos en los cultivos tales como: un tratamiento localizado de herbicidas, determinar el estrés nutricional de las plantas, las enfermedades que están presentes en la zona de cultivo, además de las plagas y el uso preciso de fertilizantes.
- Queda demostrado que, para determinar datos de vigorosidad vegetativa, es fundamental trabajar con la banda del infrarrojo cercano, no obstante, para el proyecto no se aplicaron índices de vegetación que no presentaran dentro de su formulación la banda del infrarrojo cercano.

El índice GNDVI en base a los resultados obtenidos y en comparación al índice NDVI, resultó ser más sensible a la variación de clorofila presente en la zona de estudio, debido a que la mayoría de las plantaciones presentan una edad avanzada, por lo cual este índice

resulta ser mucho más útil para esta área de estudio, por otro lado, el NDVI se aplica mejor a los cultivos en etapas iniciales.

- La utilización de técnicas agricultura de precisión es más rentable a la hora de ser aplicada en extensiones agrarias de grandes dimensiones (latifundios), debido al alto costo de los equipos y elementos implementados en la captura y procesamiento de información
- Gracias a este proyecto, queda una vez más demostrada la utilidad de los sistemas de información geográfica en el procesamiento de información con grandes aportes a otros campos como la Agronomía o las ciencias agrícolas.

Bibliografía

- ❖ Agromática, (2019). Índices de vegetación. Recuperado el 9 de octubre del 2019, de <https://www.agromatica.es/indices-de-vegetacion/>
- ❖ Alcaraz, Jiménez, (2018). La aplicación de la agricultura de precisión en el proceso de fertilización: un caso de estudio para el sector bananero del Urabá-Antioqueño. Recuperado el 18 de octubre del 2019, de https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12581/JuanGonzalo_JimenezTrespacios_JohnJames_AlcarazRestrepo_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- ❖ Ardila, Quintero. (2013). Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: río Soapaga, sector Paz del río, Boyacá. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n2/v23n2a04.pdf>
- ❖ Auravant, (2019). ¿Qué es el índice GNDVI? Recuperado el 20 de octubre del 2011, de <https://soporte.auravant.com/soporte/que-es-gndvi/>
- ❖ Ávila, Escobar, Morantes, (2019). La aplicación de imágenes de satélite para el desarrollo de la firma espectral de la producción de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones tropicales medias de Colombia. Es: Entramado. Julio - Diciembre de 2019. Vol. 15, no. 2, p. 256-262. Recuperado el 24 de noviembre del 2019, de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/5734>
- ❖ Baños, Goenaga, (2003). Metodología para la evaluación económica de un proyecto de Agricultura de Precisión. Recuperado el 20 de Octubre del 2019, de <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analisis-economico/Evaluacion-Economica-AP-2003.pdf>
- ❖ Buriticá, (2009). LA ROYA DEL CAFETO EN COLOMBIA: REALIZACIONES DE IMPACTO NACIONAL E INTERNACIONAL EN EL SIGLO XX. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. Recuperado el 18 de octubre del 2019, de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24949/36983>

- ❖ Cardozo, Arenas, (2016). Metodología para levantamientos topográficos planimétricos de predios rurales. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3248/1/ArenasAcostaJenifferAlexandraCardozoRojasJuanSebastian2016.pdf>
- ❖ Cenicafé, (2005). CASTILLO: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. Recuperado el 29 de octubre del 2019, de <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0337.pdf>
- ❖ Cenicafé. (2019). Manejo agronómico. Café de Colombia. Recuperado el 29 de octubre del 2019, de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/manejo_agronomico/
- ❖ Contreras, (2013). VARIEDADES DE CAFÉ EN NICARAGUA. Recuperado el 29 de octubre del 2019, de http://siatma.org/sitios/biblioteca/uploads/VARIEDADES_de_caf%C3%A9_en_Nicaragua,_UN.pdf
- ❖ Díaz. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- ❖ EcuRed. (s.f). EcuRed. Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Cafeto_ar%C3%A1biga
- ❖ Eobin, (2013). Sistemas UAV para identificación de parámetros en agricultura. Recuperado el 21 de octubre del 2019, de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6629929>
- ❖ FAO. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Recuperado el 20 de noviembre del 2019, de http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- ❖ García, (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Recuperado el 19 de octubre del 2019, de https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- ❖ Garmin. (2017)¿Qué es GPS? Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <https://www8.garmin.com/aboutGPS/>

- ❖ Gobierno Digital. (08 de Marzo de 2018). Alcaldía Municipal de Arbeláez en Cundinamarca. Obtenido de Alcaldía Municipal de Arbeláez en Cundinamarca:
- ❖ Gómez, Velásquez, Jiménez. (2016). Agricultura de precisión y sensores multiespectrales aerotransportados. Recuperado el 22 de agosto de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/317225959_Agricultura_de_Precision_y_Sensores_Multiespectrales_Aerotransportados.
- ❖ González, Amarillo. G, Amarillo .M, Sarmiento. (2016). Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/1585/1930>
- ❖ Hernán, (2017). APLICACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR PROCESOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PARQUE FORESTAL EMBALSE DEL NEUSA. Recuperado el 20 de noviembre del 2019, de <https://pdfs.semanticscholar.org/b966/41f0155a655554c8a3357126756db481bf5e.pdf>
- ❖ Hernández, Montaner. (2009). Patrones de respuesta espectral. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%202009%20SAF.pdf>
- ❖ Herrera, (2019). ¿Cómo promover la innovación tecnológica en el campo? Economía Naranja Rural y Agrotech. Colombia: razonpublica.com Recuperado el 18 de octubre del 2019, de: <https://razonpublica.com/index.php/econom-y-sociedad-temas-29/12122-como-promover-la-innovacion-tecnologica-en-el-campo-economia-naranja-rural-y-agrotech.html>
- ❖ Indigo, (2017). Índices de vigor generales. Recuperado el 9 de octubre del 2019, de <https://www.indigoia.com/aquiaries-vigor>
- ❖ Loaiza, Cardona, (2017). AGRICULTURA DE PRECISIÓN PARA EL CULTIVO DE ALGODÓN EN EL MUNICIPIO DE EL MOLINO, LA GUAJIRA. Recuperado el 19 de octubre del 2019, de <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00004081.pdf>
- ❖ Medina, Niño, (2017). DISEÑO DE UN MODELO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN UTILIZANDO DRONES Y UN SISTEMA DE CAPTURA, ALMACENAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS QUE PERMITA IDENTIFICAR A TIEMPO LA GENERACIÓN DE

LA PUDRICIÓN DEL COGOLLO EN CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE QUE SE ENCUENTRAN EN LOS DEPARTAMENTOS DE BOLÍVAR Y SANTANDER.

Recuperado el 18 de octubre del 2019, de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6306/1/MedinaGarciaPedroAndres2017.pdf>


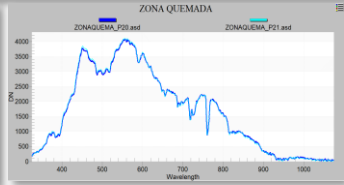
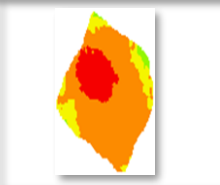
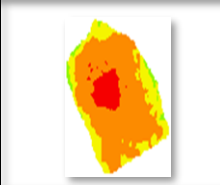


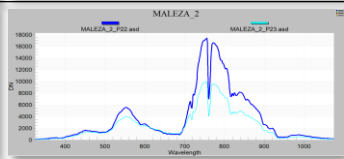
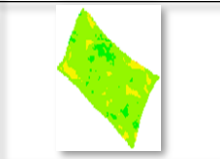
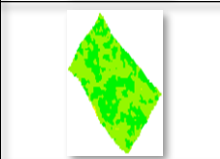

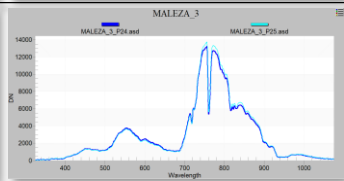
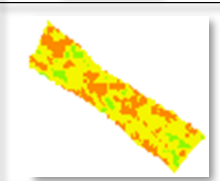
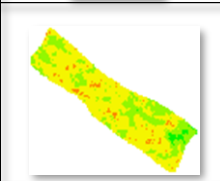

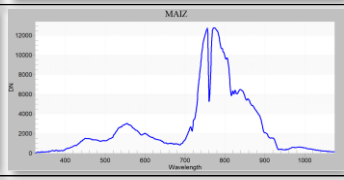
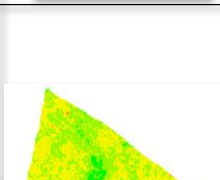
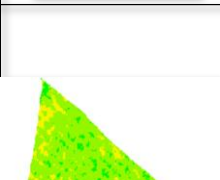

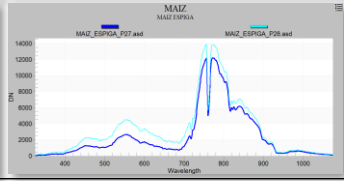
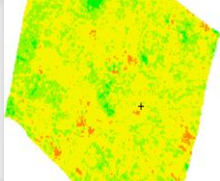
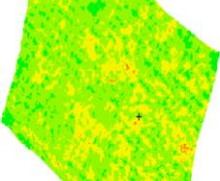

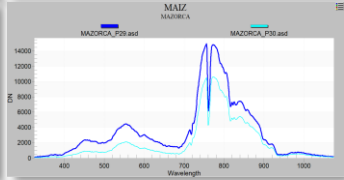



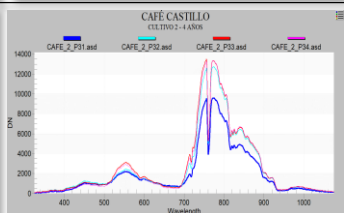
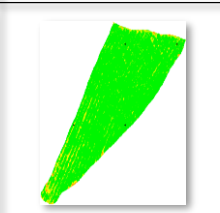
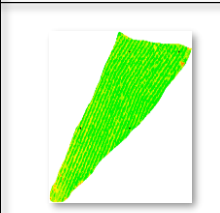

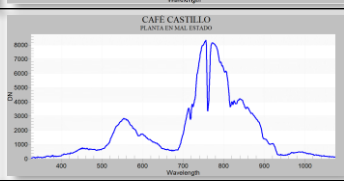
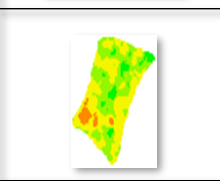
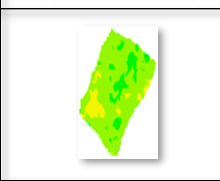

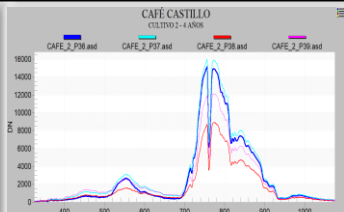
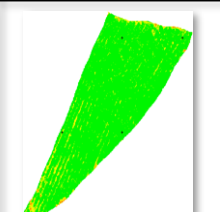
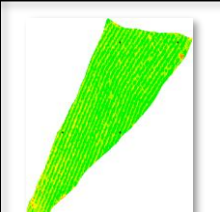
- ❖ Minagricultura. (2019). Leyes. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Paginas/Leyes.aspx>
- ❖ Mundodelcafe.com. (s.f.). mundodelcafe.com. Obtenido de Diccionario del café: <http://www.mundodelcafe.com/diccionario.htm>
- ❖ Ocho, F. (2012). ACTUALIDAD Y TENDENCIAS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN. Obtenido de ACTUALIDAD Y TENDENCIAS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN: https://www.researchgate.net/publication/324156309_Actualidad_y_tendencias_de_la_Agricultura_de_Precisión.
- ❖ Ordoñez. (2017). El espectro electromagnético. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de http://hcra.cab.inta-csic.es/Upload/200912/Programa_guia_Espectro_09.pdf
- ❖ Ortega, I. R. (25 de marzo de 2018). FEDEFruta, Federación de productores de fruta de Chile. Obtenido de LAS TAREAS PENDIENTES DE CHILE EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN: <https://fedefruta.cl/las-tareas-pendientes-de-chile-en-agricultura-de-precision/>
- ❖ Peguero. (2012). Sensores remotos y aplicación en teledetección. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de https://www.academia.edu/23743025/SENSORES_REMOTOS_Y_APLICACIONES_EN_TELEDETECCION_GEODESIA_Y_GESTION_DE_RECURSOS_NATURALES_Y_PATRIMONIO_NATURAL
- ❖ Puccio, (Sin fecha). Coffea arabica. Monaco Nature Encyclopedia. Recuperado el 10 de octubre del 2019, de <https://www.monaconatureencyclopedia.com/coffea-arabica/?lang=es>
- ❖ SA, P. (2019). Pix4D. Obtenido de Pix4D: <https://www.pix4d.com/es/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
- ❖ Universidad De Cundinamarca. (13 de 06 de 2019). www.ucundinamarca.edu.co. Obtenido de www.ucundinamarca.edu.co:

<https://www.ucundinamarca.edu.co/documents/contratacion/invitaciones/2019/PIX4D-CONCEPTO.PDF>

- ❖ Varela, (s.f). LANDSAT. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000030-4858f4952d/3.-Sistemas%20Satelitales.pdf>.

Apéndices

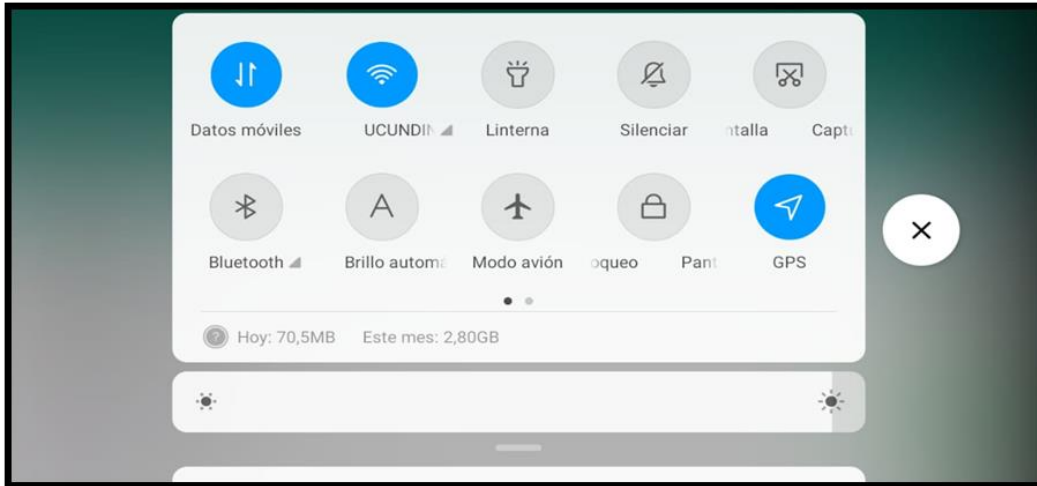
GRUPO	NUMERO	COBERTURA	FOTOGRAFÍA	FIRMA ESPECTRAL	NDVI	GNDVI
CULTIVO 1 4 AÑOS	1	CAFÉ CASTILLO		<p>FIRMAS 1</p> <p>CAFÉ CASTILLO CULTIVO 1-4 AÑOS</p>		
	2	CAFÉ CASTILLO				
	3	CAFÉ CASTILLO				
	4	CAFÉ CASTILLO				
	5	CAFÉ CASTILLO				
CULTIVO 2 4 AÑOS	6	CAFÉ CASTILLO		<p>CAFÉ CASTILLO CULTIVO 2-4 AÑOS</p>		
	7	CAFÉ CASTILLO				
	8	CAFÉ CASTILLO				
SUELO	9	SUELO		<p>SUELO CASINO REAL</p>		
	10	SUELO				
MALEZA 1	11	MALEZA 1		<p>MALEZA 1</p>		
	12	MALEZA 1				
CULTIVO 2 4 AÑOS	13	CAFÉ CASTILLO		<p>CAFÉ CASTILLO CULTIVO 2-4 AÑOS</p>		
	14	CAFÉ CASTILLO				
CULTIVO 3 2.5 AÑOS	15	CAFÉ CASTILLO		<p>CAFÉ CASTILLO CULTIVO 3-2.5 AÑOS</p>		
	16	CAFÉ CASTILLO				
	17	CAFÉ CASTILLO				
	18	CAFÉ CASTILLO				
	19	CAFÉ CASTILLO				

	20	ZONA QUEMA		<p>ZONA QUEMADA</p> 		
	21	ZONA QUEMA				
	22	MALEZA_2		<p>MALEZA_2</p> 		
	23	MALEZA_2				
	24	MALEZA TIPO 2 PUNTOS BLANCOS		<p>MALEZA_3</p> 		
	25	MALEZA TIPO 2 PUNTOS BLANCOS				
MAIZ	26	MAIZ		<p>MAIZ</p> 		
	27	MAIZ ESPIGA		<p>MAIZ MAIZ ESPIGA</p> 		
	28	MAIZ ESPIGA				
	29	MAZORCA		<p>MAIZ MAZORCA</p> 		
	30	MAZORCA				
CULTIVO 2 4 AÑOS	31	CAFÉ CASTILLO		<p>CAFÉ CASTILLO CULTIVO 2-4 AÑOS</p> 		
	32	CAFÉ CASTILLO				
	33	CAFÉ CASTILLO				
	34	CAFÉ CASTILLO				
	35	CAFÉ CASTILLO MAL ESTADO		<p>CAFÉ CASTILLO PLANTA EN MAL ESTADO</p> 		
	36	CAFÉ CASTILLO		<p>CAFÉ CASTILLO CULTIVO 2-4 AÑOS</p> 		
	37	CAFÉ CASTILLO				
	38	CAFÉ CASTILLO				
	39	CAFÉ CASTILLO				

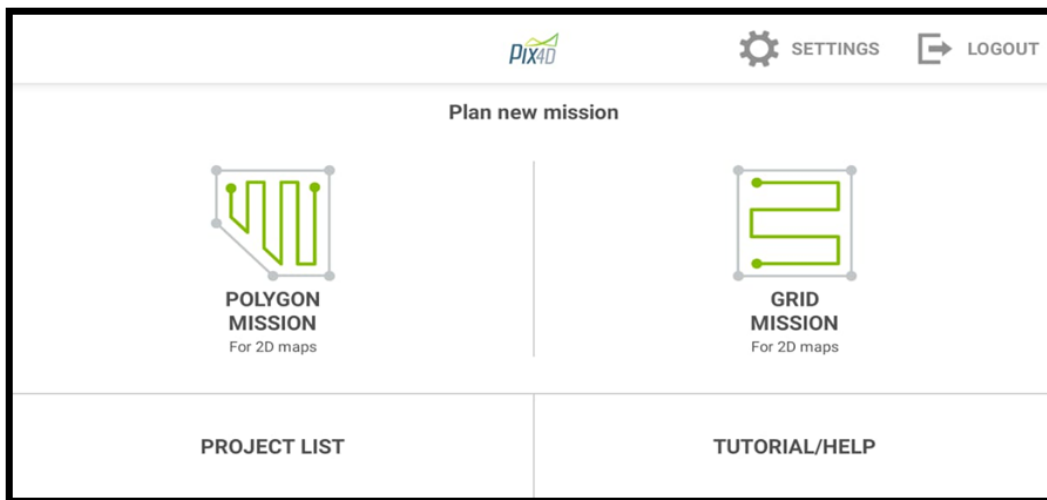
BOTON DE ORO	40	FLOR BOTON DE ORO				
	41	FLOR BOTON DE ORO				
	42	HOJA BOTON DE ORO				
	43	HOJA BOTON DE ORO				
	44	HOJA Y FLOR BOTON DE ORO				
	45	VIA				
	46	VIA				
	47	VIA				
	48	PLATANO				
	49	PLATANO				
	50	PLATANO				
	51	PLATANO				
	52	PASTOS				
	53	PASTOS				
	54	PASTOS				
FIRMAS 2						
CULTIVO CON DEFICIENCIA NUTRICIONAL LIS 5.5 AÑOS	55	CAFÉ 4 MAL ESTADO				
	56	CAFÉ 4 MAL ESTADO				
	57	CAFÉ 4 MAL ESTADO				
	58	CAFÉ 4 MAL ESTADO				
	59	PLANTA DE GUANABANA CON PROBLEMA DE ACARO				
	60	LIMON TAHITI				

Manual de uso para toma de Imágenes Multiespectrales y en RGB con Drone Parrot Bluegrass

“Instalar en un dispositivo celular Android: Pix4Dcapture y Ctrl+Parrot. Anterior a este paso descargar un kml del área de interés, siendo recomendado Google Earth o SAS Planet.
Proceso Pre-Campo”



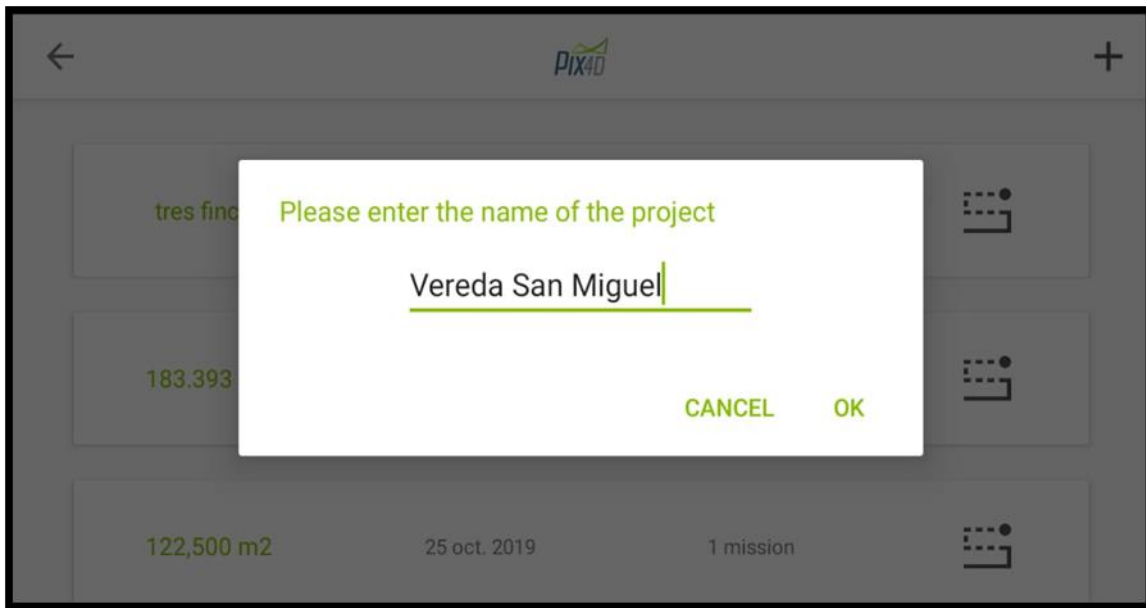
Habilitar la opción GPS de los celulares para el óptimo funcionamiento de las aplicaciones.



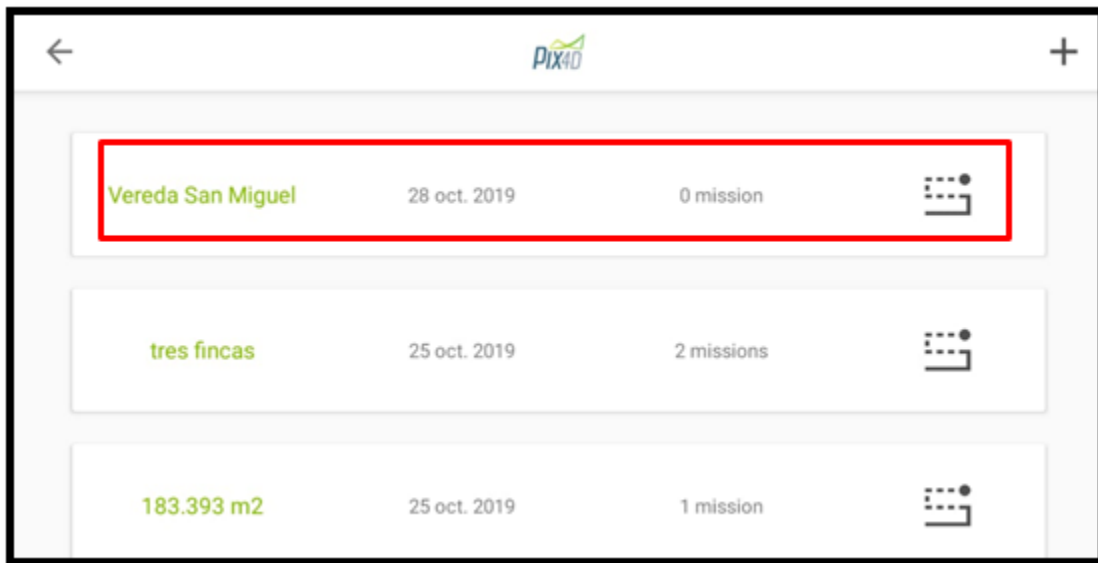
Abrir la app de Pix4Dcapture y dar clic en la opción PROJECT LIST.



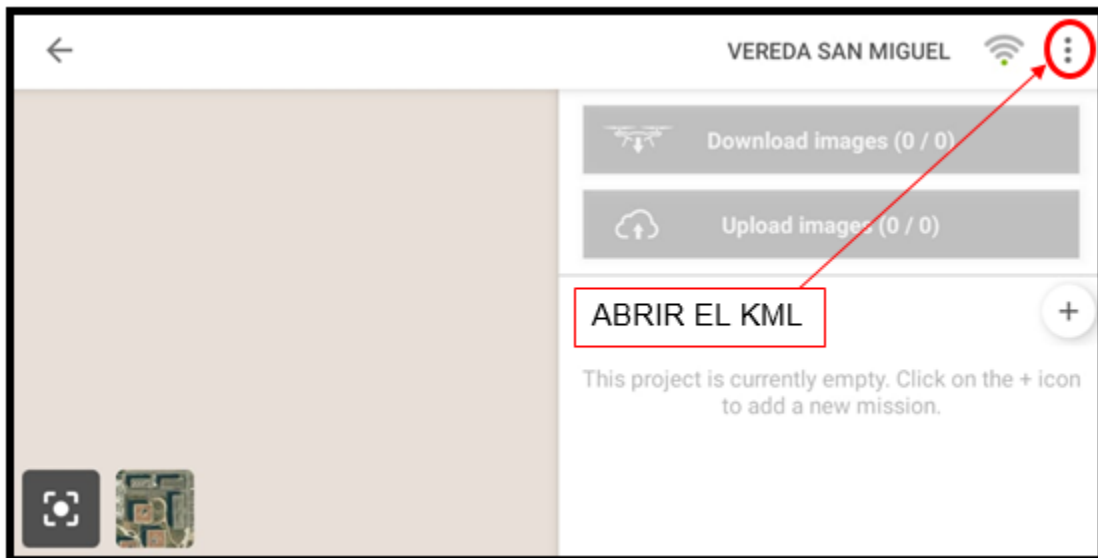
Allí se visualizan los proyectos realizados y es donde se generan nuevos proyectos pulsando el “+”.



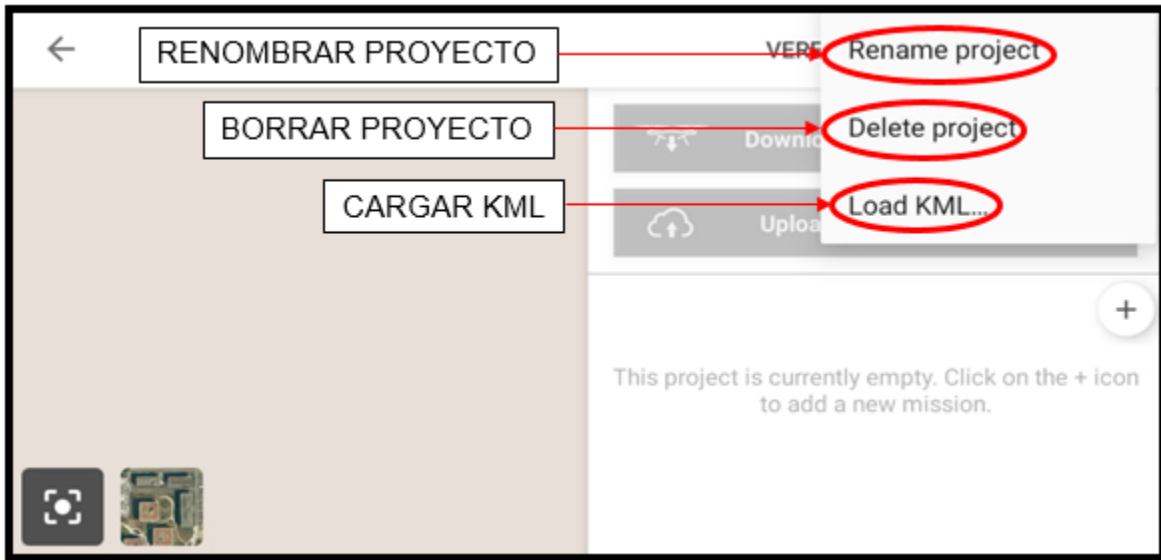
Nombrar el proyecto, e inmediatamente éste se almacena en la lista de proyectos de Pix4Dcapture, pero aún sin información del vuelo.



Pulsar dentro del rectángulo para empezar a crear el plan de vuelo, eliminarlo o ver la información si es el caso de haberlo creado antes.



En este caso se empieza a crear el plan de vuelo pulsando los tres puntos en la esquina superior derecha.



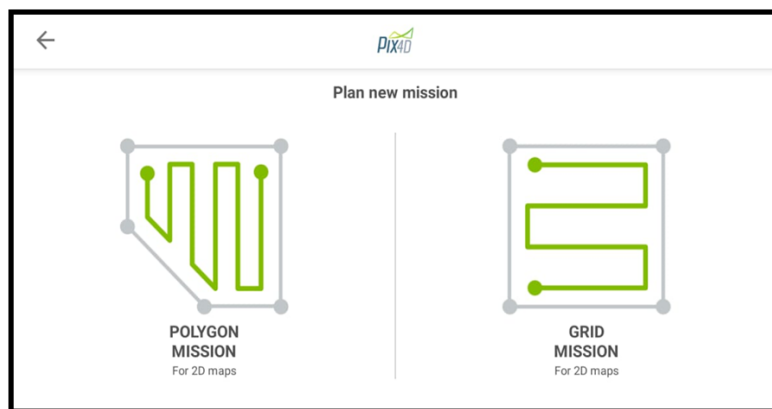
Se abren las carpetas del celular en Load KML, y desde allí se busca el kml. Nota: Si el archivo está comprimido aparecerá con extensión kmz, por lo cual no hay necesidad de descomprimir.



En este caso el archivo se llama cultivo kml.kmz dar un toque sobre el archivo para subirlo.



Este KML es de la Zona cafetera de Pandi, vereda san miguel sector el mesón, donde se tomó un kml de la extensión total del terreno para después verificar la geolocalización del kml. Siguiendo a esto dar en el + para empezar una nueva misión de vuelo.



Para la creación de una nueva misión de vuelo con el dron Bluegrass siempre aparecen dos tipos de cuadrícula modeladora para el plan de vuelo, donde la misión en polígono “ POLYGON MISSION” tendrá la posibilidad de crear un sinnúmero de vértices y la posibilidad de modelar el vuelo con el área específica pero con el riesgo de tener líneas de vuelo incompletas, en cambio “GRID MISSION” tendrá la posibilidad de hacer un vuelo cuadrículado o rectangular, lo que significa que tendrá líneas de vuelo continuas y completas.



En este caso se empieza una misión POLYGON MISSION para modelar el vuelo exclusivamente con el área de interés. En la ventana de plan de vuelo se encuentran los ajustes de altura, velocidad y conectividad del Drone, también se encuentra la información del GSD, el área de traslape de las imágenes, el tiempo de duración del vuelo y la ubicación actual tanto de la aeronave como del control.



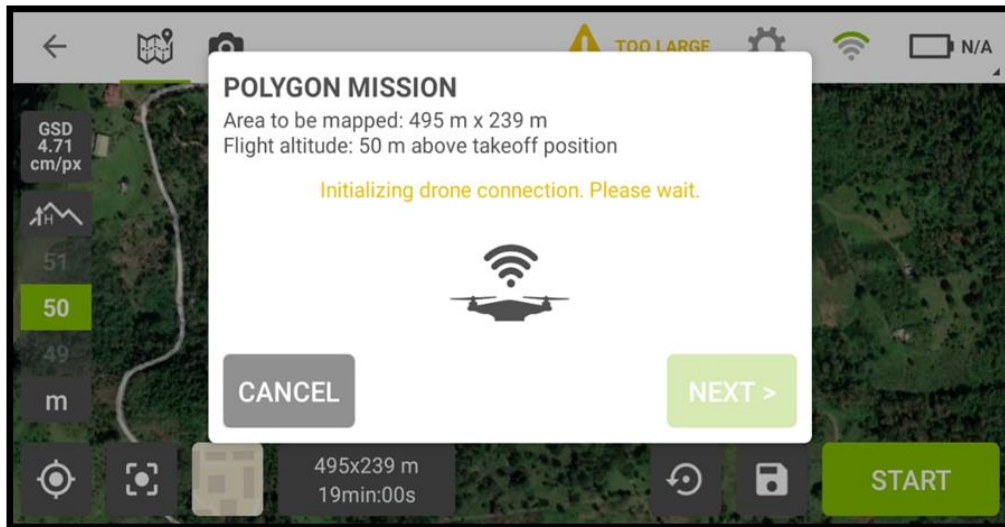
Se estiran los puntos del plan de vuelo modelando el área de interés para el vuelo y obtenemos los valores reales de la misión, una vez sea satisfactoria el área del vuelo se modifica la orientación de las líneas de vuelo con respecto a las curvas de nivel del terreno; es decir modificar las líneas de vuelo con respecto al relieve con el objetivo de que sean lo más paralelas posible.



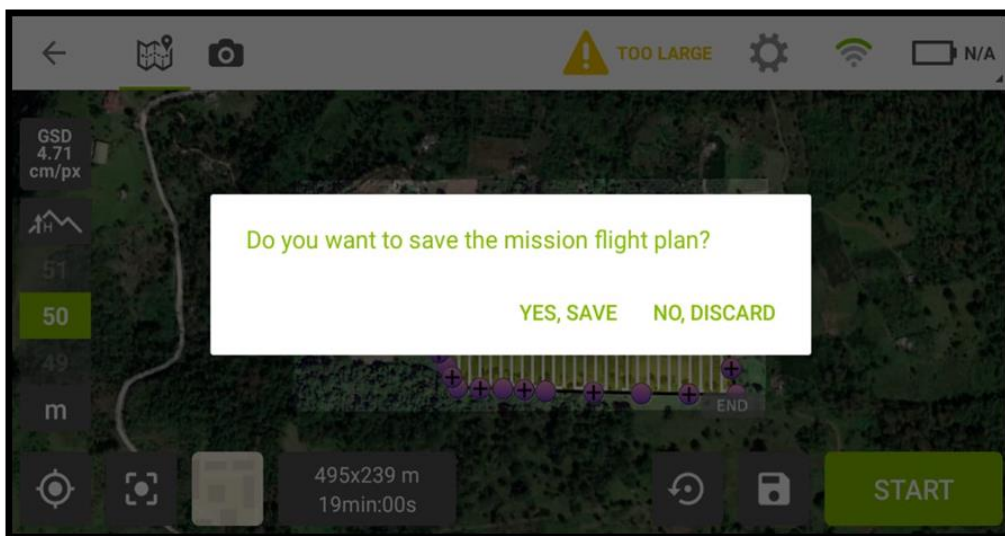
Se recomienda clasificar la velocidad de la aeronave según el estado del ambiente y más importante, según el viento; ya que este desestabiliza la aeronave en los ejes X, Y y Z. En este caso se realizó un vuelo a $\frac{3}{4}$ de velocidad. El traslape de las imágenes es de gran importancia, siendo este el que modifica las líneas y el tiempo de vuelo, se recomienda utilizar el traslape según el tiempo y estado del ambiente, como también el área del terreno.



Una vez cargados todos los parámetros de la misión dar en “guardar misión”, y con ayuda de las imágenes base satelital de Pix4D dar en START para empezar el Chequeo de plan de vuelo.



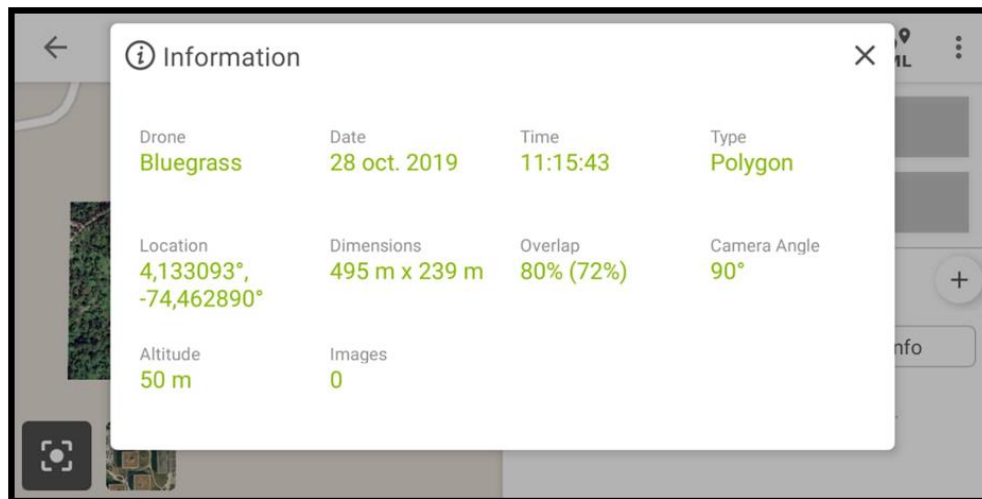
Al iniciar la misión, la aplicación arrojará el área y altura de plan de vuelo, si no hay o se pierde la conectividad con el dron saldrá el aviso de la imagen y no habrá paso siguiente de chequeo.



Si desea guardar el plan de vuelo que realizó pulse “YES, SAVE” en caso de que no desee sobrescribirlo por cuestiones de ajustes o no desee guardarlo pulse “NO, DISCARD”.

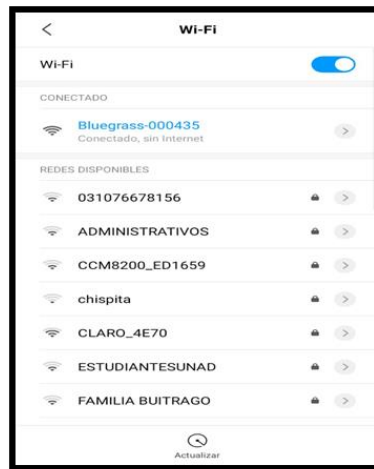


En la ventana de proyecto se puede abrir para empezar o modificar parámetros del plan de vuelo, se puede eliminar el proyecto de la misión de vuelo creado o se puede visualizar la información existente y creada para la realización del vuelo.

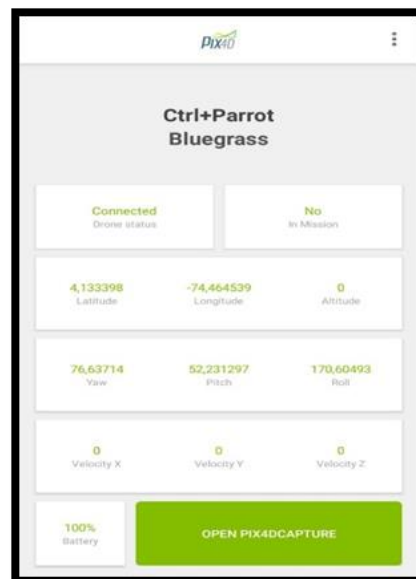


Al tocar sobre INFO, se proyectará una ventana con información sobre la aeronave y la misión con aspectos como el tipo o nombre del Dron, la fecha y hora de modificación del plan de vuelo, las coordenadas que dan lugar al punto donde se realizará el vuelo, el área dimensional de la misión, el traslape de las imágenes, el ángulo de la cámara, la altura de sobrevuelo y la cantidad de imágenes, que para cualquier caso, la cantidad de imágenes saldrá una vez se complete el vuelo.

Proceso en Campo

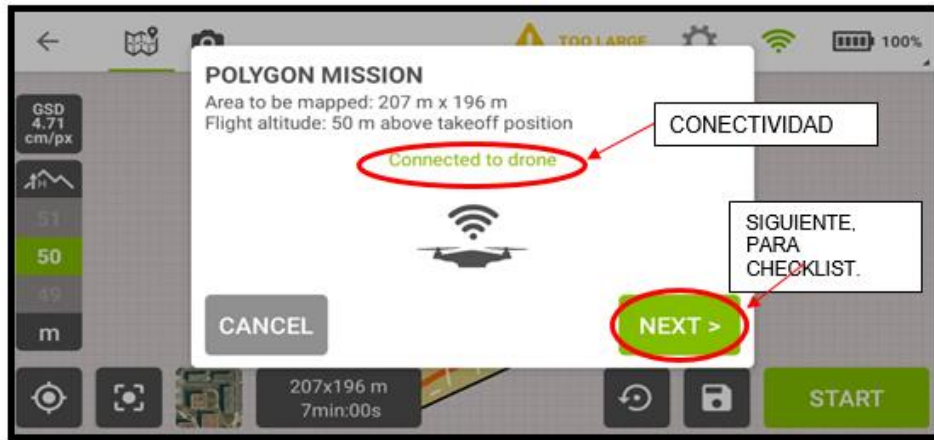


Una vez se prepare todo el equipo, se enciende el navegador y se conecta el dispositivo celular con el kml al control. Se enciende el dron, se verifica una luz verde en el sensor de arriba y otra luz verde en la cámara multiespectral, una vez se verifican las luces se inserta la tarjeta SD, posterior a este; se conecta vía Wifi el celular con el Dron Parrot Squoia+e.

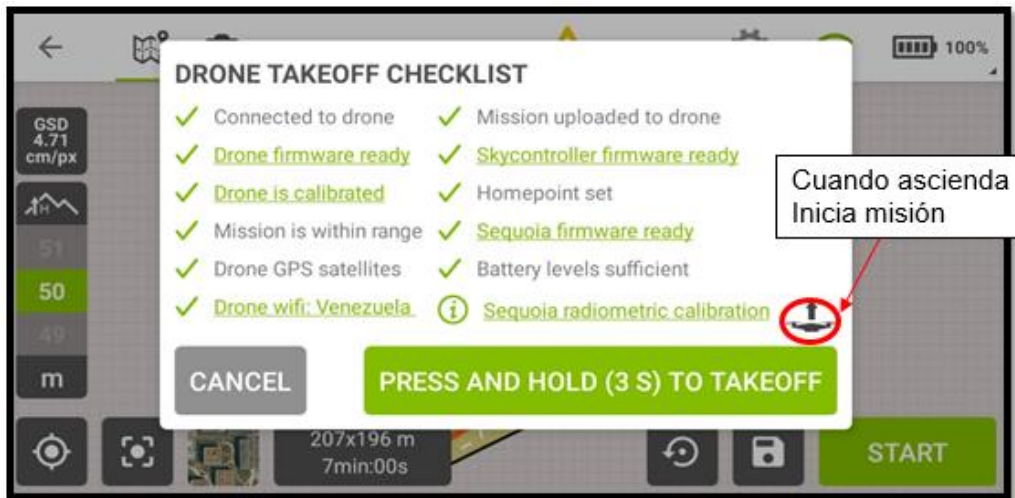


Una vez conectado vía wifi, el control de mando, celular y dron. Se abrirá automáticamente una ventana de ejecución, la cual arrojará la dos posibles aplicaciones que permitan visualizar la

conexión, en este caso abrimos Ctrl+Parrot; pues esta aplicación es la conexión directa con el dron donde se permitirá ver el estado de la batería, la ubicación del dron y la conectividad. Los valores que están en cero serán arrojados una vez empiece la misión. Al probar las variables arrojadas, dar un toque en OPEN PIX4DCAPTURE.



Al completar la verificación de los datos del vuelo, seleccionamos START se comprueba la conectividad y dar un toque en NEXT para abrir la ventana de calibración “CHECKLIST”.



Los pasos que tienen letras de color verde son los que se deben verificar en caso de que no estén de este color; en primer lugar Drone firmware ready “listo para firmware de drones” Este ítem se

arregla reiniciando la conectividad del dron, Drone is calibrated “ Drone está calibrado”, en caso de que no lo esté, pulsar sobre él y seguir los pasos de calibración los cuales son de giros del dron en los ejes X,Y y Z. Drone wifi; pulsar sobre él y determinar “Venezuela”, ya que Colombia no se encuentra en la lista y este es el país más cercano. Skycontroller firmware ready comprueba la conectividad del control con el dron. Sequoia firmware ready comprueba el funcionamiento óptimo de la cámara multiespectral y por último Sequoia radiometric calibration; la calibración de los sensores de la cámara multiespectral que empieza con una cuenta regresiva para la toma de las fotografías de calibración. Al completar todos los ítems doce ítems en color verde presionamos PRESS AND HOLD (3 S) TO TAKEOFF hasta ver que la figura del dron asciende y la aeronave empieza la misión.



La aeronave asciende y automáticamente realiza la misión que se le programó, en la pantalla constantemente se vitalizará la ubicación, toma de fotos (sonará cada toma de fotografías), altura de la aeronave, numero de satélites en cobertura y tiempo restante de la misión. Mientras que el piloto monitorea el dron desde la aplicación otra persona será la encargada de ser el observador y no perder de vista la aeronave en caso de cualquier inconveniente.



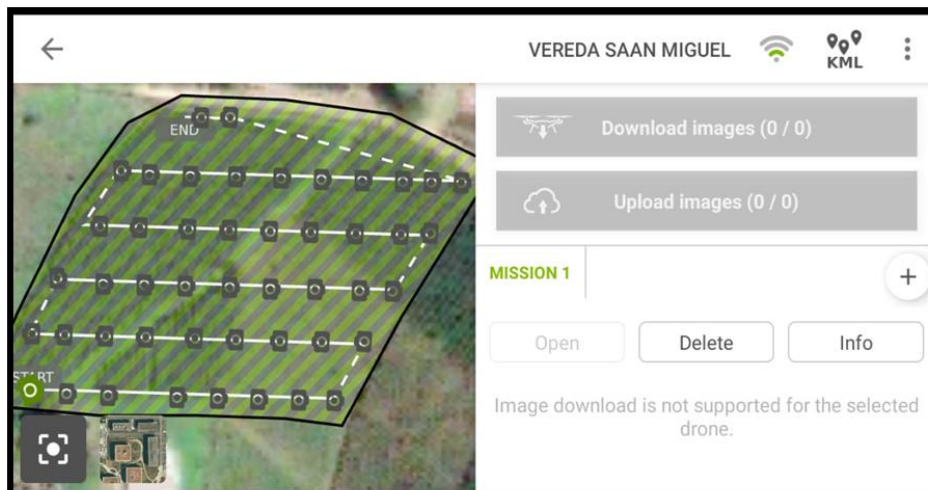
Antes de iniciar del vuelo, se verifica la señal que se tiene con el dron, la batería del dron, la batería del control y el número de satélites que permiten la geolocalización del centro de cada imagen; una vez se inicia la misión, los valores de velocidad SPEED y altura ALTITUDE irán variando y es en lo que el piloto debe estar muy atento.



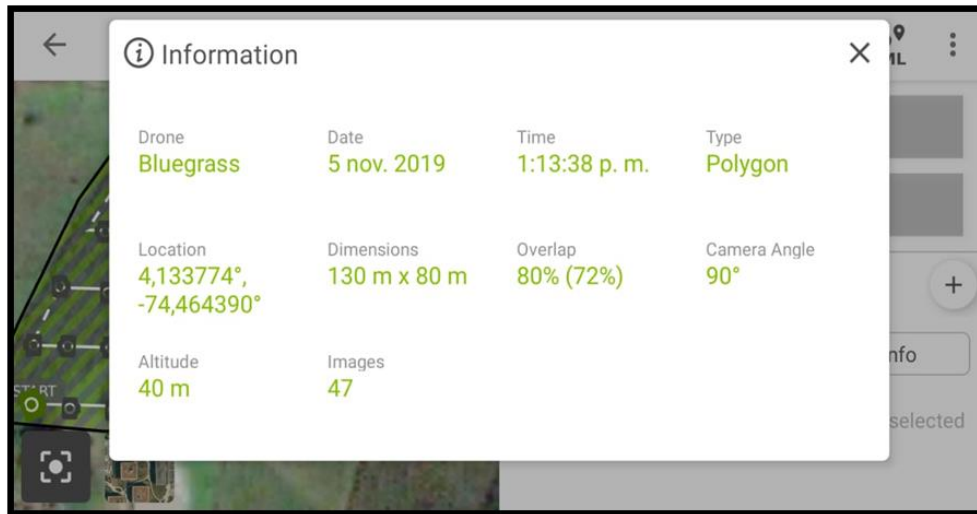
Una vez el dron esté en el desarrollo de la misión, se podrá usar la cámara frontal, la cual sirve para ubicación y análisis de ambiente; por otro lado, tenemos la vista en 2D donde se podrá concebir el estado de la misión, la ubicación de cada centro de foto, entre muchas cosas se verá el estado de la misión.



Al terminar la misión, el dron se dirige a su punto de inicio para culminar con éxito, al llegar a medio metro del suelo los sensores de aterrizaje se activan y lo hacen descender de manera moderada. Una vez se complete el total de la misión se verifican las variables de centros de imagen, batería del dron y del control.



Se almacena la información, después se apaga el equipo y se retira la memoria SD. Se desconectan las baterías y se almacena en su totalidad el equipo en el empaque de la manera correcta. Al observar los resultados de la misión de vuelo se obtiene en el kml las líneas de vuelo, el recorrido que realizó el dron y los centros de imagen donde se capturaron fotografías.



Dar un toque en “INFO” para visualizar el total de información del vuelo, donde hallamos la fecha, la hora, la ubicación, las dimensiones del área de vuelo, el traslapo de las imágenes, el ángulo de la cámara, la altitud a la cual se realizó el vuelo y el total de imágenes. Posterior al vuelo se verifican las imágenes obtenidas por los diferentes sensores, los cuales arrojan un total de 5 imágenes en las bandas de; Verde, Rojo, Bode rojo, Infrarrojo cercano y una imagen en RGB. A este proyecto se inicia un postproceso de las imágenes correspondiente a los resultados esperados para el proyecto de grado Implementación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de café Castillo “*Coffea arabica L.*” presente en la finca La Portada, vereda San Miguel, Pandi- Cundinamarca.

Nota: Las imágenes que se muestran en este Manual fueron tomadas entre varias misiones de vuelo para el proyecto de Implementación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de café Castillo “*Coffea arabica L.*” presente en la finca La Portada, vereda San Miguel, Pandi- Cundinamarca., dando respuesta a los tiempos, nombres y áreas que en algunas de las imágenes de este manual tienen variabilidad.