GENERACIÓN DE ORTOIMÁGENES USANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS APLICADO A LA AGRICULTURA

SARA LORDUY HERNÁNDEZ

Asesor:

PhD. Alejandro Marulanda Tobón

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniería Física

ESCUELA DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FÍSICAS

UNIVERSIDAD EAFIT

MEDELLÍN

2017

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi asesor Alejandro Marulanda Tobón por su apoyo, dedicación y orientación a lo largo de este proyecto; sin su motivación y su conocimiento no habría sido posible llevar a cabo este proyecto, por lo tanto estoy muy agradecida por acogerme y enseñarme este nuevo campo de investigación. También agradezco a José Ignacio Marulanda por su logística, apoyo y acompañamiento durante este proyecto y sobre todo por su motivación al mundo de los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles – UAVs*).

Un especial agradecimiento a mis padres, quienes son mi ejemplo a seguir y el motor de mi vida; les agradezco por creer en mí y brindarme todo su amor, apoyo incondicional y sacrificios que hicieron para formarme y gozar de esta experiencia. Gracias a ellos fue posible obtener la beca que me brindo la Universidad EAFIT con la que fue posible proyectarme en el sueño de ser Ingeniera Física.

A mis amigos, compañeros de la carrera, profesores y en especial al equipo de laboratorio de física por brindarme su amistad, por todo el apoyo a lo largo de la carrera y por hacer de la Universidad una experiencia única e inolvidable.

Resumen

En fotogrametría y en la aplicación de sensores remotos se establece y promueve el uso de los UAVs como una nueva y confiable alternativa de bajo costo para la adquisición de imágenes áreas. Estos sistemas han sido desarrollados desde finales de los años 50 en el campo militar para actividades de reconocimiento, vigilancia y misiones en territorios hostiles. Hoy en día son aplicados a las actividades civiles de monitoreo, mediciones atmosféricas, evaluación de daños, agricultura, mapeo, cartografía y demás. [1]

Las características de vuelo, de las imágenes y de los sensores utilizados en los UAV son un reto en el procesamiento digital para generar productos cartográficos, entre los cuales se encuentran los modelos de elevación y ortomosaicos. Por lo general, para estos procesamientos se utiliza una cámara digital acoplada a un UAV, con ayuda de un sistema de navegación se programa y monitorea la actividad y con una estrategia de visión por cómputo es posible extraer información de interés de una zona específica.

Se hizo uso entonces de la tecnología comentada, con el fin de detectar características comunes en un área de aplicación como lo puede ser un cultivo agrícola. Se buscó extraer información de interés a partir del procesamiento de imágenes y además se definió los aspectos relacionados con el proyecto, un diseño de experimentos para definir los parámetros de vuelo y el proceso que se llevó a cabo para realizar un plan de vuelo automático.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN 7
1.1. Planteamiento del problema 7
1.2. Objetivos 8
1.3. Justificación 9
1.4. Antecedentes 9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 11
2.1. Vehículos aéreos no tripulados 11
2.2. Fotogrametría aérea digital 23
2.3. Sensores 30
2.4. Ortomosaico 34
2.5. Ortoimagen 36
2.6. Antecedentes de planta de banano 40
2.7. Fundamentos del procesamiento de imágenes 42
3. METODOLOGÍA 45
3.1. Plan de trabajo 45
3.2. Consideraciones del UAV 47
3.3. Diseño de experimentos 50
3.4. Algoritmo implementado 57
4. RESULTADO Y DISCUSIÓN 59
4.1. Análisis de los vuelos realizados para el diseño de experimentos 59
4.2. Análisis de la generación de ortomosaico y ortoimagen 64
4.3. Análisis procesamiento de imágenes en planta de banano 69
5. CONCLUSIONES 72
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 74
BIBLIOGRAFÍA 75
ANEXO 1. Generación de ortoimágenes a diferentes alturas y solapamientos. ... 79

Lista de figuras

Figura 1. Cuadricóptero modelo Phantom 2 12
Figura 2. UAV de ala fija modelo eBee [1] 13
Figura 3. Configuración en + y configuración en X [15] 14
Figura 4. Sistema de rotación [6] 15
Figura 5. Sistema de Control 17
Figura 6. Distribución puntos de control 18
Figura 7. Sistema de comunicación 19
Figura 8. Pantalla de visualización de un plan de vuelo 21
Figura 9. Plan de vuelo 22
Figura 10. Pantalla de planificación de vuelo en Mission Planner 23
Figura 11. Esquema para calcular altura de vuelo 26
Figura 12. a) Solapamiento lateral. b) Solapamiento longitudinal [6] 28
Figura 13. Ortomosaico de EAFIT Llanogrande en el software Microsoft ICE 35
Figura 14. Diagrama de flujo para la generación de Ortoimagen en Agisoft Photoscan® 37
Figura 15. Patrón de calibración 39
Figura 16. Forma correcta e incorrecta de cómo capturar el patrón de calibración [28] 39
Figura 17. Proceso estadios de la Sigatoka Negra [29] 42
Figura 18. Proceso de la fase 1 y 2 de la planeación [2] 46
Figura 19. Componentes del dispositivo 47
Figura 20. Interfaz de comunicación 3DR SOLO 49
Figura 21. Diagrama de bloques del algoritmo implementado 58
Figura 22. Plan de vuelo a una altura de 90 m 59
Figura 23. Análisis de elevación a 90 m de altura 60
Figura 24. Resultado de la altura en un waypoint aleatorio del plan de vuelo 61
Figura 25. Resultado de la trayectoria y la velocidad 61
Figura 26. Rango de distancias de vuelo 62
Figura 27. Ortomosaico del plan de vuelo a 90 m 64
Figura 28. Resultado georreferenciación de imágenes 66
Figura 29. Simulación de cultivo de planta de banano 69
Figura 30. Procesamiento de imágenes con el algoritmo implementado 70
Figura 31. Identificación de manchas en plantas de banano 71

Lista de gráficas

Gráfica 1. Comportamiento de GSD a diferentes alturas de vuelo 53
Gráfica 2. Tiempo de captura con un solapamiento de 80% longitudinal - 70% lateral 54
Gráfica 3. Tiempo de captura con un solapamiento de 75% longitudinal - 60% lateral 54
Gráfica 4. Tiempo de captura con un solapamiento de 60% longitudinal - 30% lateral 54
Gráfica 5. Distancia entre imágenes a diferentes alturas de vuelo 55
Gráfica 6. Distancia entre líneas de vuelo a diferentes alturas de vuelo 55
Gráfica 7. Número de imágenes respecto a la altura y el solapamiento 56
Gráfica 8. Número de líneas de vuelo respecto a la altura y el solapamiento 56

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de sensores para la caracterización de fenotipos vegetal [22] 31
Tabla 2. Parámetros de funcionamiento [33] 48
Tabla 3. Alturas definidas para el diseño de experimentos 51
Tabla 4. Porcentaje de solapamiento para el diseño de experimentos 51
Tabla 5. Diseño de experimentos 52
Tabla 6. Resultado de fotogrametría digital 63
Tabla 7. Errores en el Ortomosaico 65
Tabla 8. Informe de resultados generado por Agisoft Photoscan ® 67

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente en el campo de la agricultura se requiere modelos más precisos y detallados para el mapeo de las plantaciones, administrar las prácticas de cultivo y detectar enfermedades. En este orden de ideas las imágenes satelitales no han sido las más adecuadas por sus limitaciones en las cuales están el lento procesamiento, condiciones meteorológicas, altos costos y baja resolución. [2]

En la administración de cultivos agrícolas es importante determinar las condiciones de salud de las plantas y las posibles deficiencias en algún mineral o nutriente. Todo con el fin de mejorar la eficiencia, la calidad y por ende la toma de decisiones de los mismos agricultores. [3]

Por esta razón, con el aporte desde diferentes campos del conocimiento, ha surgido la tarea de incorporar en la agricultura técnicas de teledetección y procesamiento de imágenes. Dicha tarea se debe ejecutar con rigor para que la producción tenga los rendimientos esperados y por lo tanto favorables al negocio. Por lo tanto, acelerar dichas contribuciones de mejoramiento en los cultivos tiene un gran impacto en el sector agrícola, por ejemplo los métodos de fenotipos de alto rendimiento en comparación con los tradicionales, representa una herramienta de monitoreo en tiempo real. [4]

Con la llegada de los UAVs, gracias a su disminución de cobertura en terrenos específicos, en comparación con los satelitales que tienen alta cobertura, se ha logrado aumentar el nivel de detalle en la captura de imágenes aéreas evitando la perturbación de fenómenos atmosféricos y además ganando resolución de pixel en las imágenes obtenidas. No obstante, el procesamiento digital de imágenes capturadas por un UAV ha sido empleado en numerosas aplicaciones, generado nuevos desafíos como correcciones geométricas y generación de mosaicos útiles para el sector y las aplicaciones específicas.

Gracias a los constantes aportes, se ha logrado implementar dicha tecnología para la elaboración de productos cartográficos, topográficos, catastrales, para los planes de ordenamiento territoriales (POTs), para realizar agricultura de precisión y demás temas.

Este trabajo se centra en la tecnología de procesamiento de imágenes aéreas a partir de un UAV para interpretar e identificar características comunes de un cultivo específico.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Extraer información de interés en aplicaciones agrícolas mediante ortoimágenes utilizando una cámara digital acoplada a un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y algoritmos de procesamiento de imágenes.

1.2.2. Objetivos específicos

- Familiarizarse con los diferentes dispositivos electrónicos que componen el sistema, con el fin de conocer sus especificaciones técnicas y las funcionalidades que permitan realizar un plan de vuelo.
- Capturar imágenes áreas con una cámara digital transportada en un UAV que permitan generar ortomosaicos.
- Adentrarse en tecnología de georreferenciación espacial para obtener los puntos de control necesarios que permitan la generación de las ortoimagenes.
- Obtener parámetros de fotogrametría en imágenes aéreas para lograr un modelo apto en aplicaciones agrícolas.
- Identificar características comunes en tierra agrícolas a partir de métodos computacionales.

1.3. Justificación

Dependiendo de la necesidad de cada zona del cultivo, los agricultores se han interesado que el monitoreo sea generado en tiempo real, esto significa solucionar problemas locativos, reducir costos, minimizar tratamientos, optimizar el rendimiento, aumentar la rentabilidad y obtener beneficios económicos y medioambientales [5].

Mediante la combinación de avances en teledetección, aeronáutica y computación se está mejorando el estudios sobre el desarrollo de fenotipos sobre determinado terreno, cuyo objetivo es almacenar y analizar diferentes problemáticas de cultivos.

Con la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados y con los sistemas de posicionamiento global (GPS) se ha logrado caracterizar la variabilidad espacial y temporal en la agricultura de precisión, evitando la propagación de enfermedades en los cultivos, mejorando el retorno a la inversión y reduciendo el impacto ambiental a partir de la adquisición de imágenes aéreas.

Si bien existen programas comerciales que realizan mosaicos a partir de imágenes satelitales, son procesos lentos que para el agricultor resultan costosos y desactualizados, por lo tanto se pretende aumentar la eficacia en las prácticas agrícolas utilizando vehículos no tripulados que sea capaz de captar imágenes aéreas digitales que permitan localizar un conjunto de características comunes a partir de puntos GPS [6].

1.4. Antecedentes

Hasta el año 2000 los grupos de investigación habían trabajado de manera independiente en la reconstrucción de imágenes, aplicando algoritmos de optimización con imágenes de baja resolución. Cerca del año 2010 hubo un descenso en el precio de cámaras digitales, donde la posibilidad de adquisición era

mayor y con mejor resolución, sin embargo surgió la necesidad de desarrollar algoritmos de reconstrucción de modelos desde el punto de vista computacional [6].

La técnica anterior era utilizada mediante mapas geográficos, utilizando vuelos a media altura (o con satélites), donde las imágenes adquiridas eran de baja calidad y obstaculizadas por fenómenos atmosféricos que afectaban el mapeo.

Con los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se logró entonces solucionar los problemas de mapeo logrando vuelos a baja altura y con mejor resolución y permitiendo la generación de mapas ortogonales georreferencias y modelos digitales.

Este desarrollo tecnológico de imágenes aéreas a baja altura ha generado que los profesionales de todo el mundo incorporen esta variedad en sus trabajos. En Tanzania, una organización Suiza, lo aplicaron para el mapeo de la ciudad con alta definición para rastrear con precisión edificios y carreteras [7]. En Etiopía han utilizado los UAV para mapear fuentes de agua [8], en Borneo para documentar el uso ilegal de terrenos [9] y entre otras aplicaciones en el mundo.

Con esta nueva tecnología se ha desarrollado diferentes técnicas a partir de métodos computaciones (procesamiento de imágenes) para la generación de ortoimágenes como por ejemplo el método de *puntos de encaje*, donde se seleccionan puntos tridimensionales en la imagen semejante a la cartografía de base, y *pixel-by-pixel* donde se consideran variaciones tridimensionales del terreno [10].

La aplicación de los UAV en la agricultura ha generado estudios sobre la detección del estado hídrico, stress nutricional, temprana enfermedades y plagas en cultivos, monitorización del estado de los cultivos e índices relativos a calidad que actualmente se requiere en tiempo real [5].

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados son conocidos bajo diferentes nombres y siglas. Los términos más conocidos son UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o UAS (Unmanned Aerial System) adoptados por el Departamento de Defensa (DOD) de EEUU y la Autoridad de Aviación Civil (CAA) del Reino Unido. También La Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO) lo ha llamado RPAS (Remotely-Piloted Aerial System) o simplemente términos populares que han sido reconocidos como lo son “Robot Aéreo” o “Drone” [11].

Aunque inicialmente los UAV fueron creados con fines militares para realizar operaciones eficaces y silenciosas sin poner en riesgo la vida de los militares, en la actualidad su campo de acción amplio de manera tal que su uso fue aprobado en diferentes ámbitos industriales como topografía, cartografía, vigilancia, monitoreo, fumigaciones, minería, agricultura, geología, medio ambiente, entre otros. [12]

Debido al tamaño y gran movilidad de estos sistemas, se utilizan para realizar tareas de difícil acceso o de baja altitud, sin problemas meteorológicos y cerca de objetos que sistemas tripulados no pueden volar, por ende son una alternativa de bajo costo para captura de datos de alta resolución espacial.

Los UAV son aeronaves que no requieren ser operadas por un piloto abordo sino que son controladas desde su exterior manteniendo un vuelo sostenido y monitoreado de forma remota, semi-automática o automática. Está constituido por dos segmentos [13]

- Segmento aéreo: Integrado por plataforma aérea, carga útil y sistema de comunicación.

- Segmento terrestre: Incluye en sistema de control de la plataforma aérea, los equipos de comunicación y permite recibir y transmitir información mediante sensores.

2.1.1. Tipos de UAV

2.1.1.1. Ala rotatoria

Se definen como multicópteros, es decir dispositivos que tienen más de dos motores. Su principal ventaja es la capacidad de mantenerse estático en el aire realizando sus operaciones correspondientes donde las fuerzas de suspensión se logran mediante el giro de hélices horarios y anti-horarios. Otras características importantes son que el despegue y el aterrizaje son de forma vertical lo cual minimiza la necesidad de espacio, la precisión de vuelo donde tiene la posibilidad de volar en cualquiera de las tres dimensiones y además posee mayor capacidad de carga. Por ende es el tipo de UAV que será utilizado para llevar a cabo este proyecto. [1]

Figura 1. Cuadricóptero modelo Phantom 2

2.1.1.2. Ala fija

Este grupo son los llamados aviones donde tienen la capacidad de planear para llevar a cabo operaciones de más distancia. Su principal ventaja es que tienen mayor autonomía de vuelo y pueden alcanzar altas velocidades y tienen una mayor resistencia a la temperatura, viento y lluvia pero una desventaja es que su método de aterrizaje y despegue debe ser de forma manual.

Figura 2. UAV de ala fija modelo eBee [1]

La mayoría de sistemas existente en la actualidad que permiten emplear UAVs, están compuestos por cuatro subsistemas que están vinculados entre sí para el correcto funcionamiento y ejecución de una misión de vuelo determinada, los cuales son: [14]

- Plataforma de vuelo: Se compone por el UAV en sí y la carga a bordo (cámaras o sensores).
- Sistema de control de vuelo (Flight Control System, FCS): Incluye los sensores, sistemas de posicionamiento global (GPS), servomecanismo, computador abordo, etc. Es el encargado de georreferenciar la información adquirida por la plataforma para contribuir al control y estabilización del UAV.

- Sistema de comunicación: Compuesto por la telemetría, es el encargado de transferir la información adquirida por la plataforma de vuelo, garantizando comunicación entre el UAV y la estación de control de tierra.
- Estación de control de tierra (Ground Control Station, GCS): Conformado por el ordenador que monitorea la operación de la plataforma de vuelo y el FCS. Cuenta con un sistema de observación para realizar el análisis de la información adquirida e integrarla en una aplicación relacionada con el propósito de la misión.

2.1.2. Dinámica de los vehículos aéreos no tripulados

El movimiento de estos dispositivos se controla mediante la variación de velocidad de giro de cuatro motores eléctricos sin escobilla. La velocidad de giro define la fuerza de empuje vertical del mismo y para ascender o descender se debe aumentar o disminuir la velocidad de rotación de los cuatro motores simultáneamente. Con la combinación de rotación de los motores es posible desplazar o detener la aeronave sobre su eje vertical. La forma es la que giran los motores depende de la configuración de la estructura, las más comunes son la configuración en + y en X como se ilustra en la Figura 3. [15]

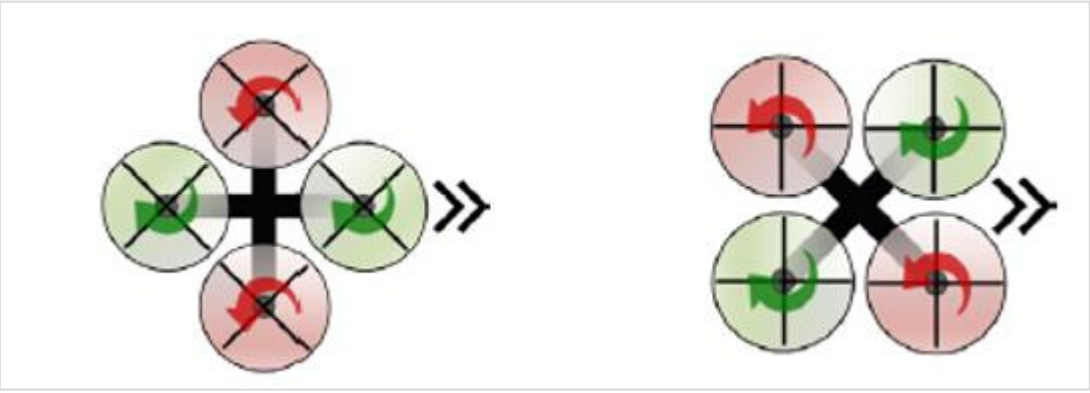


Figura 3. Configuración en + y configuración en X [15]

La configuración en + con par de motores alineados en el eje x y otro par en el eje y es la más sencilla de implementar pero se debe variar la fuerza de motos de un

solo motor para realizar cada uno de los desplazamientos, mientras que la configuración en X cuenta con dos motores delanteros y dos motores traseros donde se varia la fuerza de dos motores para realizar cada movimiento, por este motivo se considera una configuración robusta ante perturbaciones externas y es la que se implementara en este proyecto. [12]

Los movimientos de rotación son generalmente ángulos Eulerianos expresados en radianes sobre los tres ejes de coordenadas se utilizan para controlar el dispositivo los cuales son:

- Roll (ϕ): Rotación sobre el eje X, permitiendo desplazamiento hacia la derecha o izquierda, por lo general son el giro de las alas.
- Pitch (θ) : Rotación sobre el eje Y, permitiendo desplazamiento hacia adelante o hacia atrás. Este ángulo se encarga de la inclinación del UAV.
- Yaw (ψ): Rotación sobre el eje Z, permitiendo rotal hacia la derecha o izquierda.

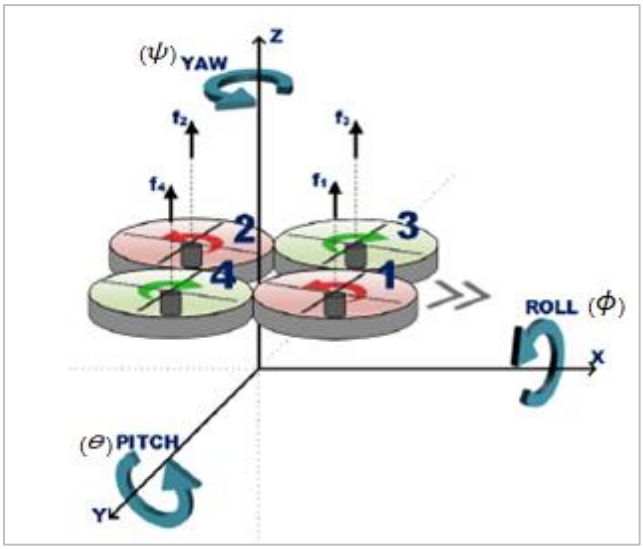


Figura 4. Sistema de rotación [6]

El teorema de rotación de Euler dice que cualquier rotación o conjunto de rotaciones puede expresarse como una rotación alrededor de una única dirección o eje principal. Cada ángulo de giro tiene asociada una matriz de rotación:

$$R_{\psi} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & sen(\psi) & 0 \\ -sen(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & sen(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -sen(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & sen(\phi) \\ 0 & -sen(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cualquier matriz de rotación puede expresarse como el producto de matrices, por lo tanto no cumple con la propiedad conmutativa por lo que es importante el orden de aplicación. Para el cálculo de matriz de rotación habrá que tener en cuenta un sistema de referencia y aplicar la trasformación en el orden correcto. Estos ángulos son proporcionados por sensores inerciales a bordo del UAV. [6]

2.1.3. Sistema de control

El sistema de control de un UAV se dividen en dos controladores, uno es el controlador de estabilidad quien se encarga de la posición e inclinación del dispositivo de acuerdo a los valores recibidos de Yaw, Pitch y Roll como orientación deseada, luego calcula los nuevos valores los cuales son transmitidos a los actuadores de los motores en señales PWM que representan la velocidad angular. El otro es el controlador es de posición quien recibe la posición actual del UAV gracias al uso del GPS y otros sensores de altitud, la posición deseada es calculada por el sistema de navegación que puede funcionar de forma de misión programada o desde el sistema de comunicación.

Estos dos controladores mencionados anteriormente son interconectados entre sí para formar parte del sistema de control. La conexión se hace en forma de cascada dentro de un mismo lazo cerrado como se ilustra en la Figura 5 donde se muestra el diagrama del controlador.

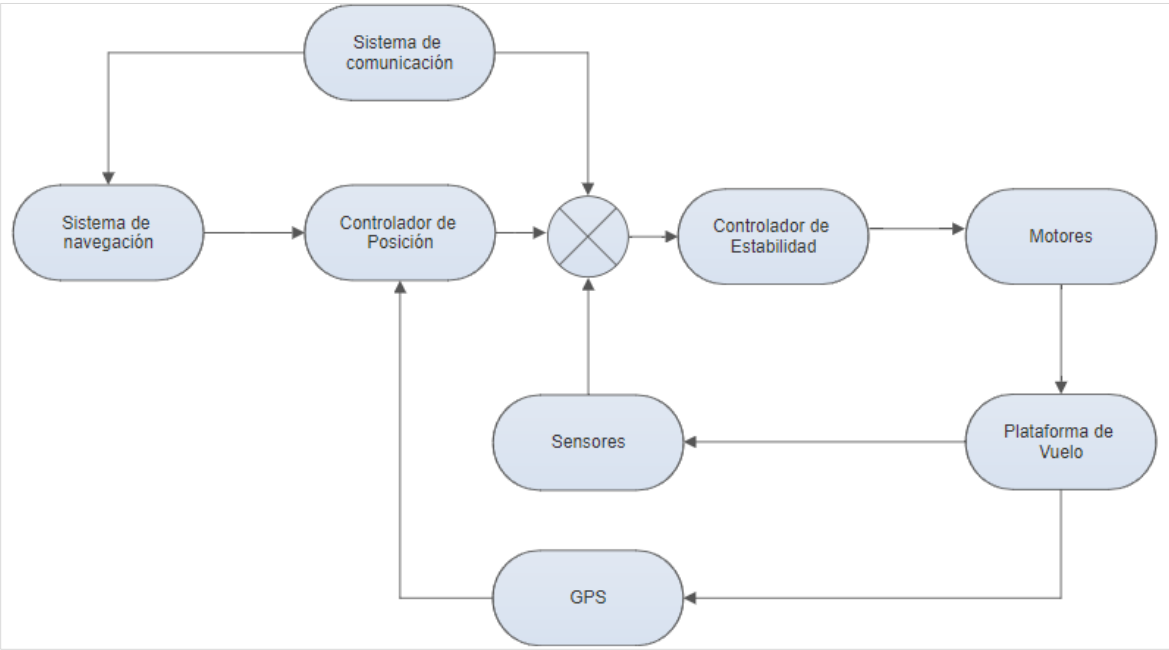


Figura 5. Sistema de Control

Los UAV proveen unidades de posicionamiento global (GPS) y tecnología de comunicación con el propósito de georreferenciar las imágenes que son capturadas por una cámara integrada al sistema.

En vista que los GPS tradicionales del sistema de control tienen una precisión deficiente (en el orden de metros), se requiere puntos de control en tierra para levantamientos de alta precisión llamados GCP (Ground Control Point). Este método para referenciar las imágenes es con el propósito de generar mapas 3D conociendo su localización. [6]

Los GCP son colocados previamente del plan de vuelo con diversos receptores GPS de alta precisión en diferentes puntos estratégicos en tierra, deben ser homogéneos en el área de interés y se recomienda colocar uno en el centro del área de estudio para incrementar la calidad y precisión de la reconstrucción como se ilustra en la Figura 6.

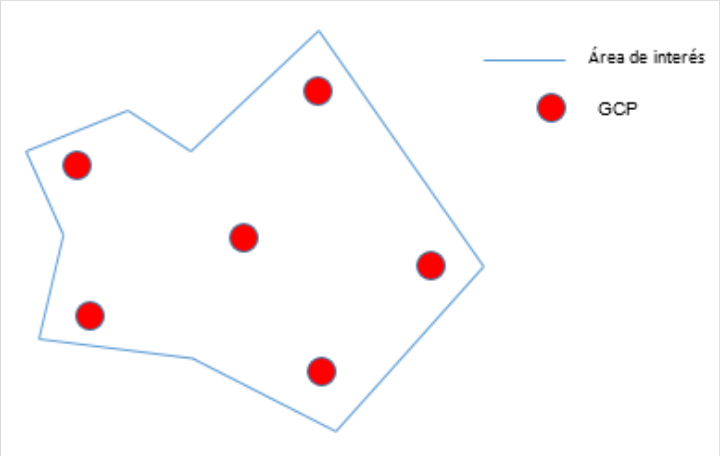


Figura 6. Distribución puntos de control

El sistema global de posicionamiento (GPS) es un sistema satelital basado en señales de radio emitidas por la constelación NAVSTAR con 24 satélites activos 24 horas en órbita alrededor de la tierra a una altura aproximadamente de 20.000 Km y a una velocidad de 14.500 Km/h. Este sistema permite el cálculo de coordenadas tridimensionales que pueden ser usadas en navegación para determinar mediciones precisas con receptores que capten las señales emitidas.

La base para determinar la posición de un receptor GPS es la trilateración el cual consiste en calcular la distancia hasta el satélite con el tiempo que tarda la señal en llegar hasta el receptor, esta señal es corregida para eliminar retardos ocasionados, propagación en capas atmosféricas, perturbaciones orbitales, entre otros.

2.1.4. Sistema de comunicación

El sistema de comunicación más utilizado en los UAVs consiste en tres enlaces diferentes: enlace de control, enlace de telemetría y enlace de video.

El enlace de control es para controlar el modo de vuelo del UAV que se realiza mediante un mando de control o radiocontrol utilizado por el usuario que en la actualidad son trabajadas con una frecuencia de 2.4 GHz.

El enlace de telemetría es el que comunica el UAV con un monitor en la estación de base donde se utiliza para visualizar y analizar los datos de telemetría y gestionar órdenes en un modo de vuelo automático.

El enlace de video permite ver por lo general transmisión de videos o imágenes captada por la cámara que está integrada en el UAV.

Estos enlaces de comunicación son la configuración que hace parte del sistema de comunicación de un UAV, en la siguiente figura se ilustra el diagrama de comunicación entre el UAV y la estación de tierra.

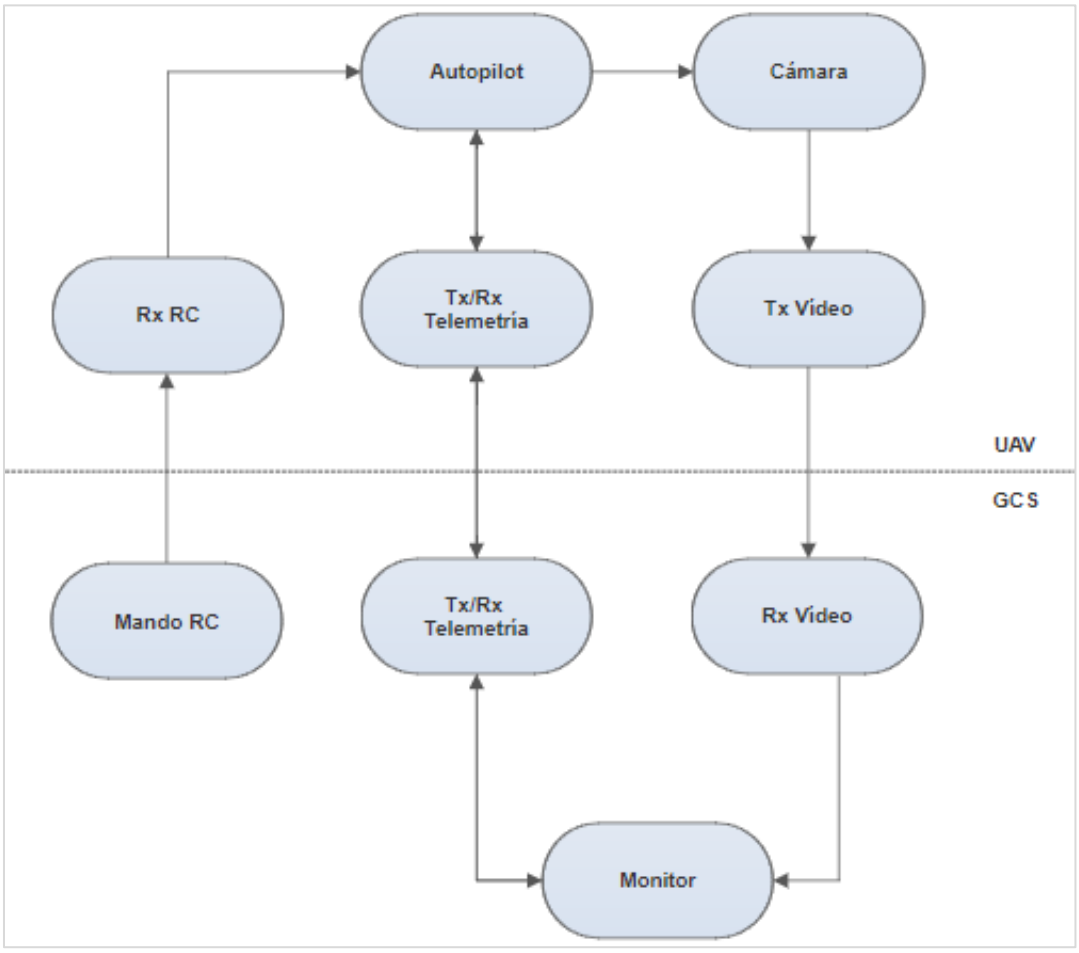


Figura 7. Sistema de comunicación

2.1.5. Sistema de navegación

Se basan en coordenadas geográficas o *waypoints* que el UAV recorre en secuencia para completar una misión, se utilizan para evitar obstáculos en rutas directas o bien donde se quiere supervisar. Normalmente se emplean para vuelo semiautónomo o autónomo y se incluye una serie de puntos sobre la zona de estudio donde modifica el roll, pitch, yaw, elevación y velocidad de desplazamiento mediante la posición geográfica global determinadas por el GPS que está incorporado en el UAV, una vez se cierra el lazo de control y calcula el error de estas posiciones y los *waypoints* objetivos se genera el vuelo deseado. [11]

El sistema de navegación de los UAV cuenta con una barrera de control geográfica mediante unos *waypoints* que forman un polígono de manera tal que delimita una zona que el UAV no puede sobrepasar, es decir que no puede volar fuera del área virtual. Las delimitaciones de las barreras y las rutas de vuelo se pueden encontrar predefinidas en el sistema de a bordo del UAV o bien modificadas en tiempo real desde la estación de tierra.

Finalmente este sistema pretende mantener la posición actual del UAV, significa permanecer en un punto determinado a pesar de las condiciones atmosféricas y permite retornar a la estación de tierra automáticamente en caso de problemas como perdida de comunicación, batería, entre otros.

El software que se utilizará para realizar la interfaz para el hardware es *Mission Planner*® el cual es una estación de control de tierra que puede ser útil para la configuración o complemento de control dinámico de vehículos aéreos autónomos (Ver Figura 8). Además permite la automatización del vuelo, asegurando un desplazamiento por los puntos de control, a una altura y velocidad del sistema estable y constante, generando un archivo de registro de telemetría de la ruta planeada. La conexión con el UAV es por medio de Wi-Fi y posee las siguientes características [16]:

- Establece, configura y pone en punta al UAV para un rendimiento óptimo.

- Planifica, guarda y carga misiones autónomas.
- Descarga y analiza los registros de la misión creados por el piloto.
- Supervisa el estado del UAV mientras está en funcionamiento.
- Realiza registros de telemetría.

Figura 8. Pantalla de visualización de un plan de vuelo

Una de las herramientas más útiles del software es el planificador de la misión ilustrado en la Figura 9 donde lo primero es marcar el punto de control "*Home*" que indica el lugar de despegue y aterrizaje automático. Seguidamente marcar un polígono (reflejada en rojo) el cual delimita el área de estudio y dentro de ella se hará una ruta de puntos de control o *waypoints* recorridos en un orden determinado. Finalmente este mallado en *Mission Planner*® muestra en la parte inferior el comando de cada punto de control mediante el protocolo *MavLink.*

MavLink es un protocolo de comunicación para intercambio de información entre la estación de control de tierra y un UAV. Ha sido diseñado a modo de una librería que posee mensajes en lenguaje C con una secuencia codificada de bytes. [17]

Hay varios tipos diferentes de comandos que se pueden usar dentro de las misiones:

- Los comandos de "*Navigation*" se utilizan para controlar el movimiento del vehículo, incluido el despegue, el desplazamiento hacia y alrededor de los puntos de referencia, el cambio de altitud y el aterrizaje.
- Los comandos "DO" son para funciones auxiliares y no afectan la posición del vehículo (por ejemplo, ajustar la distancia de disparo de la cámara o configurar un valor de servo).
- Los comandos de "*Condition*" se utilizan para retrasar los comandos DO hasta que se cumpla alguna condición, por ejemplo, el UAV alcanza una cierta altitud o distancia desde el *waypoint*.

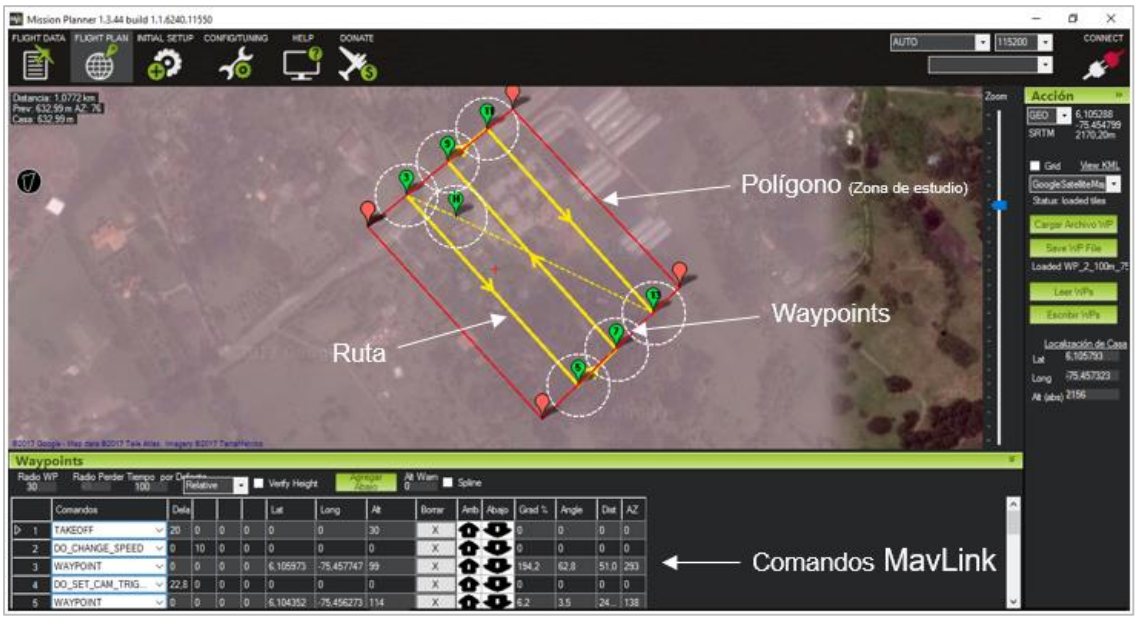


Figura 9. Plan de vuelo

La ruta se realiza automáticamente con la opción *"Survey"* que permite la elección de la cámara donde realiza los cálculos según el criterio de solape y de altura de vuelo deseado. La altura puede ser relativa o absoluta, la primera consiste en que el UAV debe mantener una altura respecto a la topografía del terreno y la segunda consiste en conservar la altura sobre el nivel del mar.

El software ayuda a determinar diferentes parámetros fotogramétricos como lo son la distancia de vuelo, la distancia entre líneas, la distancia entre imágenes, el tiempo de vuelo, entre otros datos como se ilustra en la Figura 10.

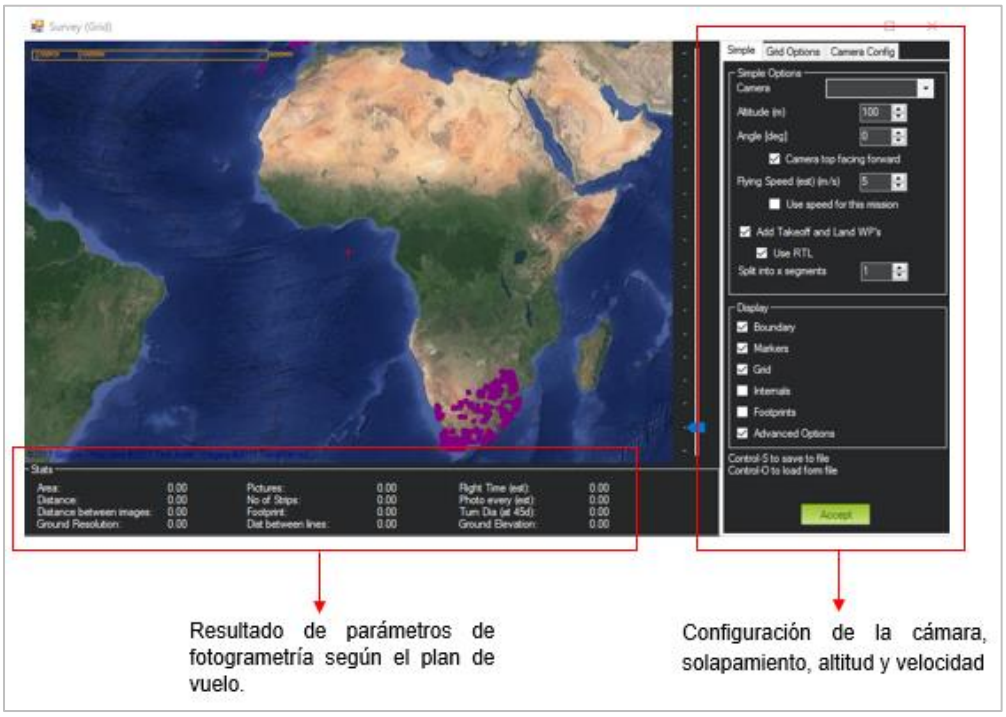


Figura 10. Pantalla de planificación de vuelo en Mission Planner

2.2. Fotogrametría aérea digital

La primera fotografía aérea fue tomada por Gaspard Tournachon en 1858 en un globo tripulado en Paris, donde posteriormente se realizaron pruebas con cometas, palomas y cohetes. En 1980 Wester-Ebbinghaus fue quien utilizo un sistema UAV de ala rotatoria para propósitos fotogramétricos.

Según la organización The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing[1] (ASPRS®) la fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología de obtener

[1] https://www.asprs.org

información fiable de objetos físicos o del medio ambiente, a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.

La fotografía aérea es una imagen de la superficie terrestre captada mediante el empleo de sensores fotográficos instalados en diversas plataformas aerotransportadas, anteriormente se realizaba en vuelos tripulados o satélites pero con la llegada de la tecnología es muy común capturar imágenes aéreas desde un UAV, lo anterior con el fin de determinar propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales de las imágenes obtenidas. [18]

Los aspectos más relevantes del uso del UAV en fotografías aéreas son:

- Accesibilidad económica.
- Reducción de riesgos laborales.
- Reducción de tiempo por la descarga de imágenes en tiempo real y sus procesamientos.
- Por su cobertura es posible realizar vuelos en días nublados.
- Posibilidad de vuelo a bajas velocidades, cerca del suelo y con mayor estabilidad generando fotografías con mayor precisión.
- Funcionan con batería por lo tanto son amigables al medio ambiente.

2.2.1. Clasificación de la fotografía aérea

Según la longitud de onda pueden ser:

- Pancromáticas: fotografías a blanco y negro.
- Color: trabajan con bandas RGB.
- Infrarrojas blanco y negro: permite identificar los objetos con mayor facilidad debido a que la radiación atraviesa la atmosfera y la clorofila no la absorbe.
- Infrarrojas color (falso color): longitudes de ondas del infrarrojo no visible al ojo humano.

Según el ángulo de inclinación se divide en dos grupos:

- Vertical: fotografías donde el eje óptico esta lo más cercano a la vertical, es decir paralelo al plano horizontal y con ángulos menores a 5°. Este es el tipo de inclinación que se utilizara en este proyecto para la generación de ortoimagen.
- Oblicuas: fotografías donde el eje óptico tiene un ángulo de inclinación con respecto a la vertical, por lo tanto no es perpendicular al plano horizontal. Las imágenes presentan deformaciones de los objetos y de la escala debido al efecto de perspectiva.

2.2.2. Distancia de muestreo (Ground Sampling Distance, GSD)

Hace referencia a la distancia entre el centro de pixeles adyacentes medido desde tierra. Debido a que un pixel es cuadrado, el área que cubrirá cada pixel se puede representar mediante la ecuación (1):

$$Área = GSD\ x\ GSD\ [m/pixel^2] \quad (1)$$

Si el valor GSD es muy alto, menor es la resolución espacial de la imagen, por lo tanto los detalles de la imagen serán menos visible, por ello es que la distancia de muestreo está relacionado con la altura de vuelo, a una altura constante las imágenes no pueden tener el mismo valor GSD por la diferencia de elevación del terreno y los cambios en el ángulo de la cámara. Para la generación de ortoimagen generalmente se utiliza un valor promedio de GSD. [19]

2.2.3. Altura de vuelo

La altura de vuelo depende de la distancia focal de la cámara, la distancia de los sensores y de la distancia de muestreo [10]. En la Figura 11 se muestra un esquema, donde:

Sw = Ancho del sensor [mm]

f = Distancia focal [mm]

h = Altura de vuelo [m]

d = Distancia cubierta en el suelo por una imagen, donde se puede representar como $d = GSD\ \left[\frac{cm}{pixel}\right] * Ancho\ de\ la\ imagen\ [pixel]$

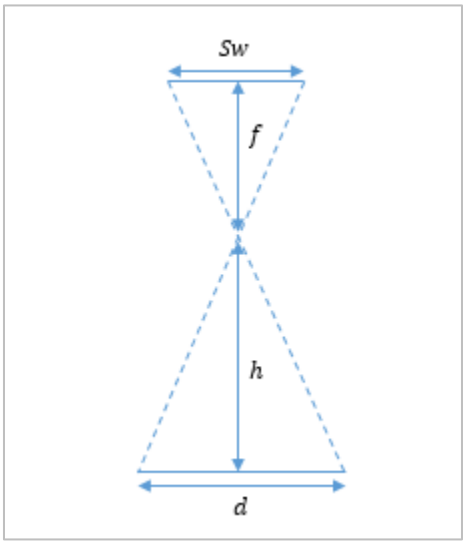


Figura 11. Esquema para calcular altura de vuelo

Al aplicar el teorema de semejanza de triángulos se tiene que:

$$\frac{d}{Sw} = \frac{h}{f} \tag{2}$$

Donde finalmente se obtiene la ecuación de altura de vuelo despejando h de la ecuación (2):

$$h = \frac{f*d}{Sw} \tag{3}$$

La ecuación (3) relaciona la máxima altura de vuelo para llevar a cabo la captura de fotografías cumpliendo requisitos de resolución por pixel. Se debe tener en cuenta que si se incrementa la distancia focal, el área que se cubre será menor y por ende

la distancia de muestreo, generando que cada pixel capture un área más pequeña y como resultado se tendrá una mayor resolución.

2.2.4. Escala de la fotografía

Una fotografía aérea es la una imagen reducida de un terreno, donde los objetos fotográficos aparecen disminuidos en una proporción dada denominada escala. [20]

La escala es una función representativa en que se designa la escala de un mapa y está dada por la relación entre la distancia focal y la altura de vuelo como se muestra en la ecuación (4):

$$\frac{1}{E} = \frac{f}{h} \tag{4}$$

Si se quiere trabajar con una altura absoluta se debe restar la altura sobre el nivel del mar. Cuando se habla por ejemplo de una escala 1/30.000 significa que el detalle sobre el terreno es de 3 m. [20]

2.2.5. Solapamiento o traslape entre imágenes

Las trayectorias de vuelo deben diseñarse para garantizar una cantidad suficiente de superposición fotográfica que permitirá un mejor procesamiento para identificar puntos comunes entre cada imagen, es decir que los vuelos deben ser realizado de manera tal que todo punto del terreno figure por lo menos en dos fotografías consecutivas. Este es uno de los conceptos más importantes a tener en cuenta para la adquisición de imágenes, no existe una superposición estándar universal ya que las cifras varían según la situación. [10]

El solapamiento consiste en el área común que se tiene entre dos o más fotografías consecutivas, se expresa en porcentaje y se divide en dos clases:

- Solapamiento lateral: Es el porcentaje de recubrimiento entre dos fotográficas de líneas de vuelo adyacentes.
- Solapamiento longitudinal: Es el porcentaje de recubrimiento entre dos fotografías sucesivas en dirección de la línea de vuelo

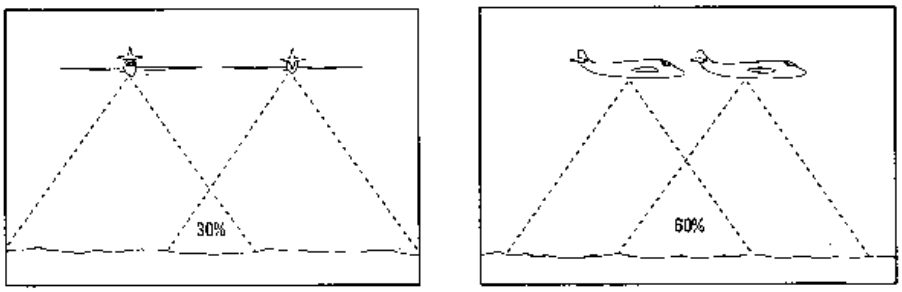


Figura 12. a) Solapamiento lateral. b) Solapamiento longitudinal [6]

Para lograr la superposición de dos imágenes es necesario que la velocidad de vuelo sea equilibrada con el intervalo en el que la cámara está tomando las fotografías, así como la altitud de vuelo, la distancia entre trayectos y la geometría interna de la cámara. Hoy en día existen softwares capaces de calcular automáticamente todas las cifras necesarias para realizar un plan de vuelo, sin embargo es útil conocer la lógica subyacente. [2]

2.2.6. Distancia entre dos fotografías

También llamada base o avance útil sobre el terreno, consiste en la distancia que existe entre dos puntos de toma de dos fotografías consecutivas correspondiente a la relación de superposición longitudinal de las vistas y se puede expresar así [20]:

$$B = l * (1 - \frac{u}{100}) \quad (5)$$

Donde:

u es el porcentaje de solapamiento longitudinal y l es el tamaño que mide el lado vertical de la fotografía.

2.2.7. Distancia entre líneas de vuelo

Consisten en la distancia de separación entre líneas de vuelo en función a la superposición lateral como se expresa en la Ecuación (6) [20]:

$$A = l * (1 - \frac{v}{100}) \quad (6)$$

Donde v es el porcentaje de solapamiento lateral y l es el tamaño que mide el lado horizontal de la fotografía.

2.2.8. Intervalo de tiempo entre fotografías

Es el tiempo que debe transcurrir entre la toma de una fotografía y la siguiente para que se produzca el solapamiento longitudinal requerido. Teniendo en cuenta que la velocidad es la razón de cambio en la posición de un objeto en un determinado tiempo, el intervalo de tiempo entre toma de fotografías es [20]:

$$I = \frac{B}{V} \quad (7)$$

Donde V corresponde a la velocidad de vuelo $[m/s]$.

2.2.9. Número de fotografías por líneas de vuelo (NFLV)

El número de fotografías por línea de vuelo se obtiene al dividir la longitud de ésta entre la base (B) como se muestra en la Ecuación (8). Generalmente al resultado se le suma 4 fotografías que se toman al principio y al final del recorrido para cerciorarse de que la cámara esté funcionando de manera correcta sobre la zona de interés. [20]

$$NFLV = \frac{Longitud\ de\ la\ línea}{B} + 4 \quad (8)$$

2.2.10. Número de líneas de vuelo (NLV)

Es la cantidad de líneas de vuelo necesarias para cubrir el área de interés correspondiente al solapamiento lateral. Se agrega una línea adicional con el fin de compensar un posible error como se muestra en la Ecuación (9) [20]:

$$NLV = \frac{Ancho\ del\ terreno}{A} + 1 \tag{9}$$

2.2.11. Número total de fotografías (NTF)

Es el producto del número de fotografías por líneas de vuelo y el número de líneas de vuelo, donde finalmente se obtiene el número de imágenes de todo el recorrido del UAV necesarias para cubrir el área de interés. [20]

$$NTF = NFLV * NLV \tag{10}$$

2.2.12. Tiempo de vuelo

Se calcula teniendo en cuenta el intervalo de tiempo entre fotografías (I) y el número total de fotografías (NTF). Este es el tiempo que se demora el UAV en realizar el plan de vuelo sobre la zona de interés. [20]

$$t = I * NTF \tag{11}$$

2.3. Sensores

El concepto de sensores engloba toda tecnología que implique la obtención de información de un objeto cuando la distancia entre el sensor y el objeto es comparable o inferior a alguna de las dimensiones del sensor. [21]

Se basan también en las interacciones espectrales entre el objeto y el espectro electromagnético tales como reflactancia o emisión en regiones visibles e infrarrojas o en el tiempo de vuelo de las señales de sonido/luz. Estos sensores son utilizados

para evaluar características físicas o morfológicas de las plantas como la altura, el volumen, el crecimiento y entre otras evaluaciones que pueden ser un potencial para el rendimiento de las plantas. También existen diferentes métodos para analizar enfermedades como estrés por sequía, contenido de clorofila, concentraciones de nutrientes, tasas de crecimiento y manchas en hojas debido a plagas [22].

En la Tabla 1 se describe diferentes tipos de sensores que se pueden integrar en algunas plataformas de los UAV dependiendo de la carga útil.

Tabla 1. Tipos de sensores para la caracterización de fenotipos vegetal [22]

Tipo de sensor	Descripción	Aplicación	Limitaciones
Sensor de fluorescencia.	Se han utilizado para monitorear y estimar la composición fenólica de forma no invasiva y obtener mapas con información relevante como la porosidad de la pared vegetal, el contenido de nitrógeno y clorofila en las hojas.	Fotosíntesis, clorofila, estrés hídrico.	Falta de investigación con UAV y sujeto a ruidos de fondo.
Cámara digital (RGB).	Filtra los colores rojo, verde y azul donde es posible analizar texturas. Cada célula fotosensible transforma la luz en una señal eléctrica electrónica que se almacena en la memoria de la cámara.	Propiedades visibles, defectos externos, crecimiento.	Limitado por la banda espectral visible y sus propiedades. (Rango entre 380 – 780 nm)

Cámara multiespectral.	Diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación por lo que las bandas espectrales están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano por su respuesta de absorbancia y reflectancia.	Deficiencia de nutrientes, estrés hídrico, enfermedades.	Limitado a pocas bandas espectrales. (500-950 nm)
Cámara hiperespectral.	Cada pixel cuenta con 300 valores correspondientes a las bandas de 2 nm de ancho en el rango 400-1000 nm, con ello se obtiene la máxima información espectral con los rangos correspondientes a la vegetación.	Espectro continuo o discreto para cada pixel en la región visible del infrarrojo, estrés de la planta, calidad del producto control de seguridad.	Difícil procesamiento de imágenes. Los sensores pueden ser costosos.
Cámara/ Sensor de térmica.	Captura la información correspondiente al infrarrojo lejano, en el rango de 8-14 µm, donde se muestra la temperatura emitida por los elementos presentes en el estudio.	Respuesta de las platas al estrés hídrico y enfermedades.	Condiciones ambientales, no se detectan temperaturas muy bajas, cámaras de alta resolución resultan ser muy pesados.

Espectrómetro.	Dispositivo para observar espectros y determinar en cada punto la intensidad relativa de las radiaciones de dos espectros luminosos.	Detección de enfermedades, estrés y respuestas de cultivos.	Pocos antecedentes y posibilidad de mezcla espectral.
Cámara 3D.	Detección basada en laser infrarrojo utilizando información de tiempo de vuelo.	Atributos físicos como la altura de la plata y la densidad de la copa.	Baja precisión y pocas aplicaciones de campo.
Sensor LIDAR (Light Detection and Ranging).	Realiza un barrido mediante la emisión de un haz de laser sobre una superficie determinada emitiendo pulsos y registrando los rebotes que se producen para posteriormente generar una nube de puntos de coordenadas tridimensionales.	Estimaciones precisas de altura y volumen de plantas o árboles.	Sensible a las variaciones en longitud de la trayectoria.
Sensor SONAR (Sound Navigation And Ranging).	El sonar puede usarse como medio de localización funcionando de forma similar al radar, con la diferencia de que en lugar de emitir ondas electromagnéticas emplea impulsos sonoros. La propagación del sonido se	Cartografía y cuantificación de volumen de copas. Aplicación en pulverizadores o distribuidor de fertilizantes.	Sensibilidad limitada por absorción acústica

	utiliza para detectar objetos basados en el tiempo de vuelo.		

Debido a que los UAV presentan un entorno no habitual para las cámaras debido a que deben soportar golpes y vibraciones durante el vuelo, el problema radica en la elección de un acoplamiento que permita anular el efecto producido por los movimientos bruscos del UAV como las propias vibraciones. Para ello normalmente se hace el uso de un *gimbal* o suspensión cardán los cuales sus ejes forman un ángulo recto manteniendo siempre la cámara en una sola orientación así el soporte se mueva.

2.4. Ortomosaico

Un mosaico corresponde al conjunto de imágenes tomadas desde una o varias maneras que presentan áreas de traslape entre si y que son unidas o combinadas en una sola imagen para ampliar el rango de visión de la escena. Cuando el mosaico es corregido de distorsiones causadas por el relieve y los objetos en él, se denomina Ortomosaico. [23]

Para la generación de ortomosaicos, las imágenes individuales son rectificadas a partir de modelos de elevación, eliminando la distorsión asociada al relieve. Este proceso consiste en proyectar cada pixel de la imagen sobre el modelo de elevación para determinar el valor de altura el cual es reproyectado sobre la imagen. La proyección y la reproyección de lo pixeles de la imagen se realiza con las ecuaciones de colinealidad que finalmente son rectificadas y unidas formando un mosaico. [1]

El software que se utilizará en este proyecto para la generación de un ortomosaico es *Microsoft ICE®,* el cual consiste en la aplicación de panoramas de alta resolución

que combina sin problemas un conjunto de imágenes de fotografías originales superpuestas de una escena filmada desde una ubicación mediante una sola cámara.

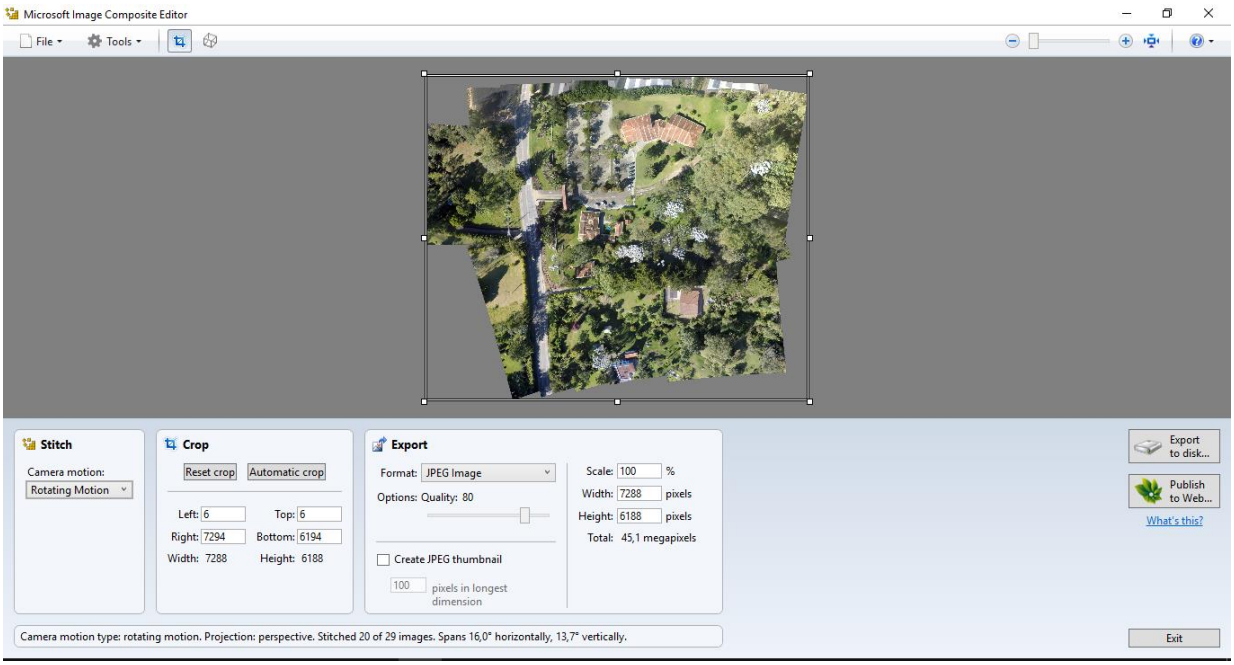


Figura 13. Ortomosaico de EAFIT Llanogrande en el software Microsoft ICE

El programa es muy accesible, capaz de intimidar al usuario por su carencia de opciones. Los pasos son muy sencillos, lo único que se debe hacer es arrastrar las imágenes deseadas a la pantalla de inicio del programa y automáticamente realiza el mosaico. O desde el programa, en “Archivos” se selecciona “Nuevo panorama” y se eligen las imágenes. El tiempo de procesamiento depende del número de fotos que se desea unir. [24]

El procesamiento de *Microsoft ICE*® se basa en realizar *stitching* el cual es una técnica que se encarga de combinar múltiples imágenes para producir una imagen panorámica o de alta resolución sin utilizar fuente de información como la telemetría, es decir que genera los mosaicos únicamente a partir de la técnica *matching* que se basa en identificar determinados objetos en una imagen y a partir de ello se calcula un valor que represente el grado de similitud entre dos imágenes. [25]

2.5. Ortoimagen

Una ortoimagen se refiere a una fotografía georreferenciada y corregida a través de un software para eliminar los errores producidos en su captura, de esta manera se obtiene una escala y un sistema de proyección uniforme. Consiste además en la composición de varias fotografías referenciadas desde cualquier punto sobre el terreno con una proyección ortogonal lo cual permite realizar medidas reales de terrenos y superficies que pueden ser comparados con otras informaciones georreferenciadas como los levantamientos topográficos que conservan una completa información de una zona. [26]

Una de las limitaciones de las fotografías aéreas es la falta de georreferenciación, debido a que produce problemas a causa de la distorsión y perspectiva de la cámara con la que se realiza los estudios geométricos, elaboración de cartografía y verticalidad del relieve. Por esta razón se ha implementado la generación de ortoimágenes que son productos capaces de suprimir problemas geométricos permitiendo extraer información geográfica.

La ortoimagen juega un papel complementario dentro de los levantamientos topográficos, ya que permiten tomar información general de lugares de difícil acceso y dando la oportunidad de generar modelos completos y precisos en 3D. [26]

Para este proyecto se utilizara el software *Agisoft PhotoScan*® para la generación de ortoimágenes. Esta plataforma permite resultados precisos (3 cm aéreo y 1 mm de corto alcance) en modelos 3D utilizando lenguajes de alto nivel para la automatización del proceso [27]. En la Figura 14 se muestra la lógica de programación para la generación de una ortoimagen.

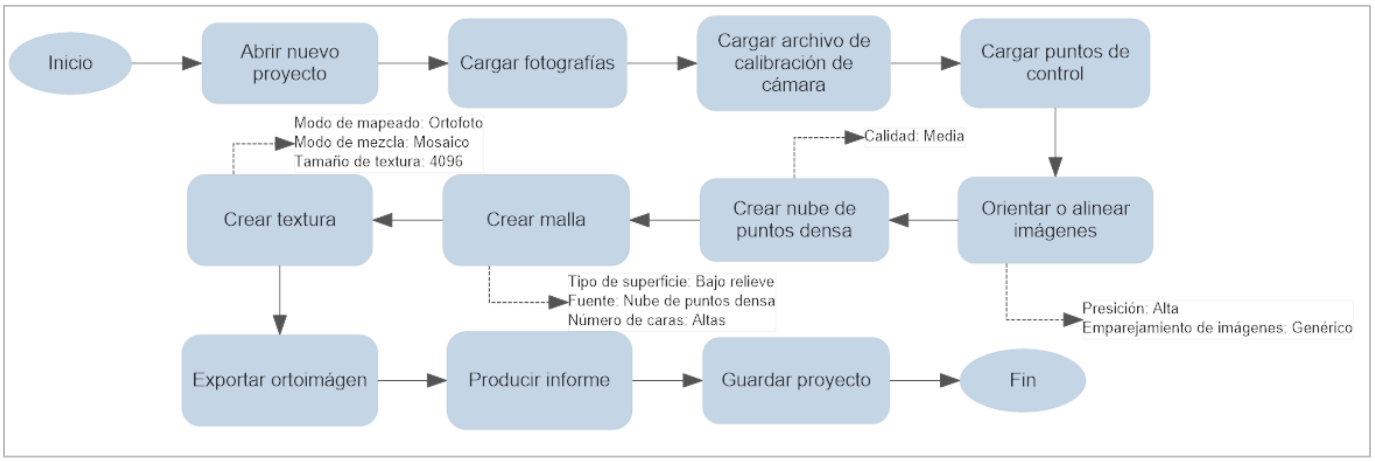


Figura 14. Diagrama de flujo para la generación de Ortoimagen en Agisoft Photoscan®

El proceso inicia con la alineación de fotografías buscando la posición y orientación de cada imagen con algoritmos de correspondencia generando una nube escasa de puntos. Luego se procede a la señalización de los puntos de control que le da validez al modelo generado debido a la precisión milimétrica, por lo tanto una visualización completa de los puntos de las imágenes adquiridas favorece a la identificación por parte del software.

Seguidamente se realiza una nube de densa de puntos sobre el área de estudio, permitiendo ver un modelo más detallado basado en la posición de la cámara. Realizando después el proceso de mallado y textura brinda un modelo de superficies de relieve y terreno con una mejor calidad visual.

Finalmente se genera el modelo de elevación digital que permite la representación de una superficie con valores de altitud para caracterizar formas de relieves, la medición de área y volumen del modelo, reportes con modelos 3D, puntos de control o marcación, altitud, entre otros.

A continuación se muestra las diferentes características y capacidades de procesamiento del software:

- Triangulación aérea y de corto alcance.
- Generación y clasificación de nubes densas de puntos.
- Ortomosaicos y generación de DSM y DTM.
- Edición de línea de costura de ortomosaicos.
- Generación de curvas de nivel.
- Georreferenciación utilizando puntos de control y registro de vuelo.
- Mediciones de distancia, área, volumen.
- Procesamiento de imágenes multiesprectrales y cálculo de índice de vegetación.
- Reconstrucción 4D para escenas dinámicas.
- Composición panorámica esférica.
- Lenguaje de Python para automatización (scripting).
- Procesamiento de imágenes con lente de ojo de pez, cámaras esféricas y de cuadro.
- Soporte del sistema de coordenadas EPSG.

2.5.1. Calibración de la cámara

Antes de generar una ortoimagen es primordial realizar una calibración de la cámara, para ello se utiliza una herramienta de *Agisoft* llamada *Agisoft Lens*. Este software es automático y utiliza la pantalla LCD como objetivo de calibración. Contempla modelos paramétricos completos incluyendo coeficientes de distorsión no lineales. Dichos parámetros de calibración son guardados en un formato legible para uso posterior en el software *Agisoft PhotoScan* que requiere datos precisos de calibración de la cámara. [28]

Agisoft Lens estima los siguientes parámetros de calibración de la lente de la cámara utilizando el modelo de distorsión de Brown:

- Distancia focal: $f_x \; y \; f_y$

- Principales coordenadas del punto: $C_x \; y \; C_y$
- Coeficientes de distorsión radial: $K_1, K_2, K_3, P_1 \; y \; P_2$

Estos parámetros pueden determinarse mediante escenarios conocidos como patrones de calibración, la opción más práctica que utiliza el software es el patrón regular como un tablero de ajedrez ilustrado en la Figura 15.

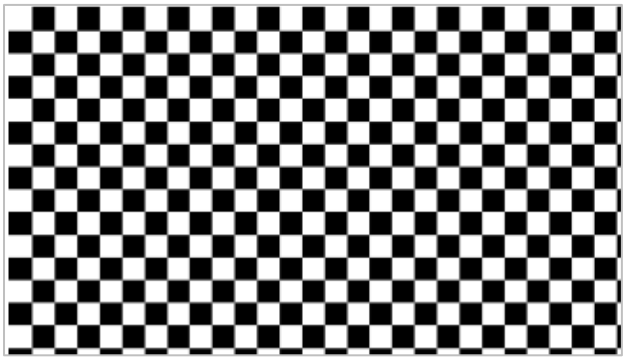


Figura 15. Patrón de calibración

Para tomar las fotos se debe mantener la distancia focal constante en todo momento, evitar reflejos en las fotos y cubrir toda la zona del patrón de calibración. En la Figura 16 se ilustra la forma correcta e incorrecta de realizar las capturas.

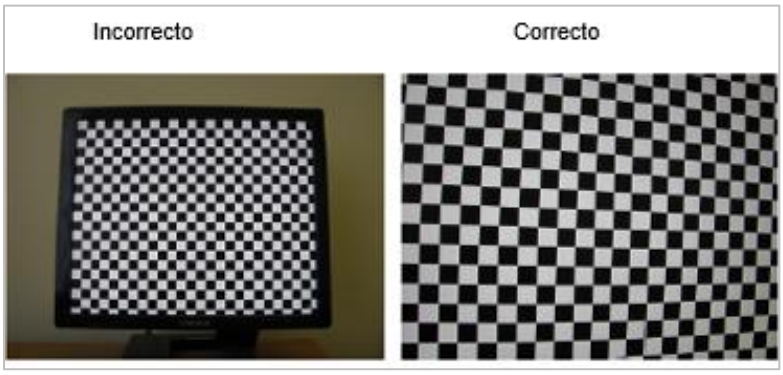


Figura 16. Forma correcta e incorrecta de cómo capturar el patrón de calibración [28]

Por último se cargan las fotografías en la plataforma y en las opciones de "herramienta" se selecciona "calibrar" dejando los parámetros por defecto y automáticamente se obtiene los resultados que son guardados para ser exportados a *Agisoft PhotoScan*® [28].

2.6. Antecedentes de planta de banano

El banano es una especie de género tropical de plantas herbáceos de porte arbóreo que producen un fruto llamado banano o plátano. Son originarias del Sureste asiático pero ahora se cultivan en todos los países tropicales por sus frutos, fibras y hojas.

Su tallo mide entre 2 y 12 m de altura y esta rematado por una copa de grandes hojas ovales de hasta 3 m de longitud caracterizadas por un pecíolo y un nervio central fuerte y carnoso. Cada planta tiene normalmente entre 5 y 15 hojas siendo 10 el mínimo para considerarla madura. Las hojas se encuentran entre los más grandes del reino vegetal, son de color verde o amarillo verdoso claro, con los márgenes lisos y las nervaduras pinnadas.

Un concepto importante de las hojas de la planta de banano es el área foliar, el cual es uno de los parámetros utilizados para determinar el potencial fotosintético de la planta. Watson en 1947 aplico el concepto para medir el potencial productivo de los cultivos en el campo y definió el índice de área foliar como el área de la hoja verde por unidad de área de la tierra.

2.6.1 Sigatoka Negra

Apareció en Ecuador en 1987 en la zona Norte de Esmeraldas en la hacienda “Timbre”. Es una enfermedad causada por el hongo *Ascomycet*e llamado *Mycosphaerella fijiensis*, el cual se produce en forma sexual y asexual durante su ciclo de vida [29]. Su medio de transmisión es mediante el aire, herramientas de campo o medio de transporte que afecta únicamente las hojas de la planta de banano presentando una especie de manchas en la superficie superior o inferior de la hoja. Las manchas suelen ser intensas hacia las puntas de las hojas, donde las afectadas pueden morir en tres o cuatro semanas y el resultado es una defoliación rápida y severa si no se aplica medidas de control. [30]

Los daños que produce son:

- El área foliar se reduce en proporción a la severidad del ataque
- Afecta el proceso fotosintético
- Altera el proceso de maduración
- Produce racimos pequeños y con sabor ácido
- Afecta el crecimiento normal de las plantas

Esta enfermedad se desarrolla en condiciones de ambiente lluvioso, altas temperaturas, alta humedad, drenajes deficientes, mal control de malezas, no eliminar hojas secas o por carencia de fertilización. [30]

Fouré en 1982 redefinió los síntomas durante el desarrollo de la enfermedad en seis estadios que son [29]:

- Estadio 1: Primer síntoma externo de la enfermedad presentando puntos oscuros de color café rojizo menor a 0,25 mm de longitud.
- Estadio 2: En este síntoma las estrías aparecen entre 10 a 14 días después de la infección. Dicha infección aparece como una raya de color café visible en el envés de la hoja.
- Estadio 3: La infección aumenta la dimensión de 2 cm a 3 cm de longitud.
- Estadio 4: Aparece en el envés de la hoja manchas cafés y en la parte de arriba negras.
- Estadio 5: Ocurre cuando la mancha elíptica se vuelve totalmente negra y se ha extendido al envés de la hoja. Esta mancha tiene un halo amarillo que lo rodea y su centro se empieza a aplanar.
- Estadio 6: El centro de la mancha se seca y adquiere un color gris claro y lo rodea un anillo color negro y a su vez un halo de color amarillo.

Como resultado se tiene la destrucción del follaje, destruye además la capacidad de respiración y fotosíntesis, la producción de fruta es reducida y ocasiona un llenado deficiente y la maduración prematura en el campo.

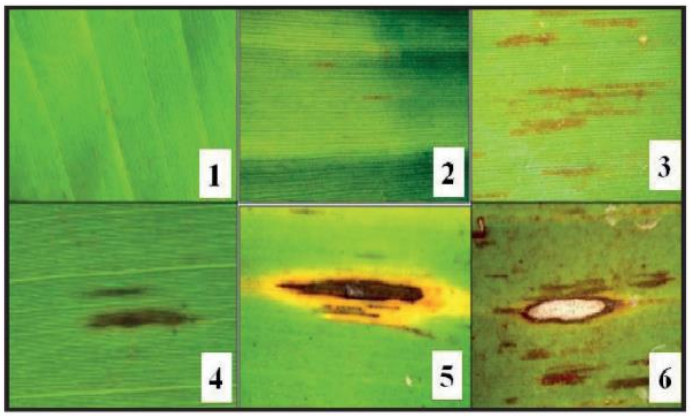


Figura 17. Proceso estadios de la Sigatoka Negra [29]

2.7. Fundamentos del procesamiento de imágenes

En vista que uno de los objetivos del proyecto es identificar características comunes en la agricultura, se pretende identificar la enfermedad de la *Sigatoka Negra* mediante el software *Matlab*®.

Matlab® es el nombre abreviado de "*Matrix Laboratory*", es un programa que trabaja mediante instrucciones o comandos, también a través de funciones y programas para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Puede trabajar con números escalares y complejos, además tiene una capacidad amplia de gráficos en dos y tres dimensiones. Entre las características más importantes están [31]:

- Calculo numero rápido y con precisión
- Manejo simbólico
- Graficación y visualización avanzada
- Programación mediante un lenguaje de alto nivel
- Programación estructurada y orientada a objetos
- Soporte básico para diseño de interfaz grafica
- Extensa biblioteca de funciones
- Aplicaciones para ramas de las ciencias y la ingeniería

Las imágenes a color se pueden representar usando tres matrices 2D del mismo tamaño, una para cada canal de color: rojo (R), verde (G) y azul (B). Cada color se representa como la combinación de las intensidades de los colores primarios. Este modelo RGB esta estandarizado para identificar cualquier color en coordenadas (rojo, verde, azul) con 1 y 0 indicando si contribuye o no sobre la imagen.

Otro modelo de color es el HSV donde los colores se definen por el tono (H) para describir el tipo de color, la saturación (S) para medir la pureza y el valor (V) que mide la intensidad de luz.

Para mejorar las imágenes obtenidas y eliminar la información no deseada, normalmente se realiza el procesamiento de imágenes en escala de grises o binarias. Las imágenes en escala de grises solo contienen información de grados de intensidad y pueden ser el resultado de la medida de la intensidad de luz de un pixel en una única banda del espectro electromagnético, normalmente se utilizan 1 bit por pixel, donde el pixel de mayor intensidad es 1 (blanco) y el pixel de menor intensidad es 0 (negro) [32].

Las imágenes binarias se codifican como una matriz 2D y por lo general son aquellas que solo tiene dos valores posibles 1 y 0 a partir de las imágenes en escala de grises, esta conversión se realiza para comparar cada intensidad de pixel con un valor de referencia y es llamado como Umbral. Matemáticamente, el proceso de umbralizar una imagen de entrada $f(x,y)$ y producir una versión binaria de ella $g(x,y)$ se puede escribir como:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) > T \\ 0 & otro \end{cases} \quad (12)$$

Para procesamiento de imágenes en escala de grises se utilizan diferentes tipos de filtros que permiten suavizar la imagen, eliminar ruido y detectar bordes los cuales son:

- Filtros espaciales: utiliza el concepto de *Kernel* que trata de una matriz de coeficientes que al realizar una convolución modifica los pixeles de la imagen.

- Filtros de frecuencia: aplica la transformada de Fourier para convertir la imagen al dominio de frecuencias y al realizar la transformada inversa se tendrá una imagen sin problemas de ruido.
- Filtros morfológicos: extrae información geométrica y topológica de una imagen usando elemento estructurante (*ee*) conocido.

Para este proyecto los filtros morfológicos serán útiles para detectar características comunes en cultivos y extraer la información de interés.

En *Matlab*® existen diferentes métodos para detectar objetos en una imagen, los más comunes son:

- Comparación de plantillas: consiste en encontrar pequeñas partes de una imagen que corresponden a una imagen de muestra.
- Análisis de manchas: detecta regiones en una imagen en la que sus pixeles son constantes y diferentes del resto de la imagen.
- Algoritmo Viola-Jones: consiste en imágenes entrenadas para identificar objetos usando los clasificadores *Haar-like* y cascada, generalmente para detección de rostros.

En vista que el análisis de manchas es un método utilizado en el desarrollo de algoritmos, para este proyecto será seleccionado para detectar manchas en las hojas de banano del invernadero de la Universidad EAFIT.

El método de análisis de manchas está basado en operaciones morfologías donde el objetivo es realizar la extracción de regiones en la imagen y enumerarlas a través de un proceso de conexión de pixeles vecinos cuyo valor es 1. Una vez detectadas las regiones se extrae los caracteres de interés para su procesamiento y su resultado puede ser utilizado para el reconocimiento de patrones y su clasificación.

3. METODOLOGÍA

3.1. Plan de trabajo

De acuerdo a los objetivos planteados en este proyecto se implementaron una serie de actividades con fechas determinadas, es decir se siguió un cronograma de actividades a partir de la metodología PMI que se divide en 4 etapas principales.

3.1.1. Inicio

Esta primera etapa consiste en plantear el problema, se busca la comprensión de cada uno de los aspectos relacionados con el proyecto y establecer referentes pertinentes que ayuden a resolver el problema de forma asertiva, es decir definir inicialmente el proyecto a partir de lo conocido para posteriormente optimizar y mejorar en la medida de lo posible.

3.1.2. Planeación

Una vez se tenga una visión más concreta del proyecto, es necesario hacer un plan para cumplir con los objetivos. Establecer fechas claras para el inicio y finalización de cada una de las tareas. También se requiere seleccionar el terreno a inspeccionar. Por lo tanto en esta etapa se plantearon 2 fases iniciales:

- Fase 1: Familiarización del dispositivo

  Conocer cada dispositivo eléctrico que compone el UAV con sus respectivos funcionamientos a través del manual de especificaciones, al igual que el funcionamiento de la cámara con el fin de aprender a manejar el dispositivo y controlar un plan de vuelo automático en la Universidad EAFIT Llanogrande.

- Fase 2: Toma inicial de imágenes

Durante esta fase se realizará las primeras capturas aéreas mediante el dispositivo para ser procesadas en el software *Agisoft PhotoScan* que permitirá mejorar la resolución y generar ortomosaicos. Posteriormente georreferenciar dichas imágenes con la adquisición de puntos GPS de control y por último ortogonalizar las imágenes implementando un conjunto de algoritmos como se ilustra en la Figura 18.

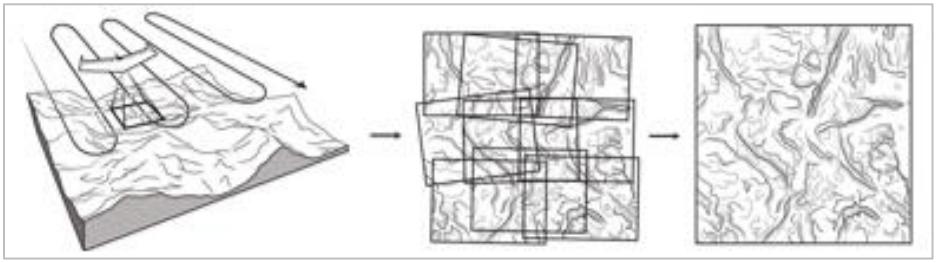


Figura 18. Proceso de la fase 1 y 2 de la planeación [2]

3.1.3. Ejecución

Al cumplir con toda la planeación se lleva a cabo el procesamiento de imágenes de acuerdo a la problemática y con un plan de vuelo establecido sobre la zona de estudio para interpretar los resultados, es por ello que se determina una tercera y última fase del proyecto.

- Fase 3: Procesamiento de imágenes

  En esta última fase se desea interpretar ortoimágenes aéreas de alta resolución, específicamente en terrenos previamente inspeccionados y con un plan de vuelo preparado para la obtención de patrones sobre un cultivo agrícola.

3.1.4. Cierre

En esta última etapa del proyecto se pretende recopilar toda la información y documentación generada a partir del desarrollo del proyecto y organizarla de forma clara y concisa para sustentar los resultados obtenidos. Se hace necesario analizar

y justificar las discrepancias entre los resultados obtenidos y los esperados de acuerdo a lo que se tiene planeado.

3.2. Consideraciones del UAV

Para este proyecto se utilizó un UAV cuadricóptero como se ilustra en Figura 19 (a). Según sus especificaciones el tiempo de vuelo estimado es aproximadamente 25 minutos y es posible controlar la navegación, altitud y telemetría gracias a la comunicación inalámbrica y protocolo *MavLink*.

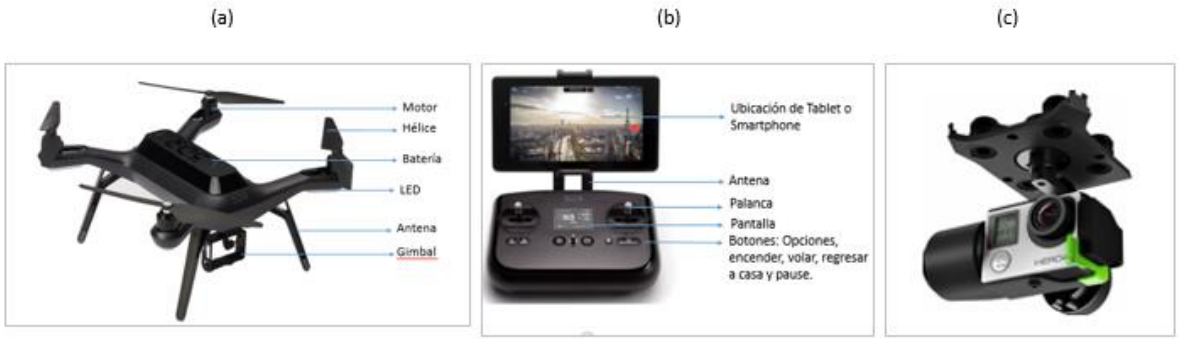


Figura 19. Componentes del dispositivo

El UAV está equipado por el sistema de piloto automático *Pixhawk* de 3DR y el software de control de vuelo *APM Copter*, en la Tabla 2 se ilustra los parámetros de funcionamiento [33]:

Tabla 2. Parámetros de funcionamiento [33]

Tiempo de vuelo estimado	Hasta 25 minutos
Altitud máxima	100 m sobre el nivel del piso
Alcance	8 Km
Capacidad de carga útil	450 g
Velocidad crucero	8 m/s
Velocidad máxima	15 m/s
Limitación de la velocidad de viento	11 m/s
Temperatura de funcionamiento	0° C – 45° C

El tiempo de vuelo varía con la carga, las condiciones del viento, la elevación, la temperatura, la humedad, el estilo de vuelo y las habilidades del piloto, es decir que la duración real de vuelo tiende a variar. El tiempo de vuelo indicado se aplica a las elevaciones de menos de 2000 pies por encima del nivel del mar. Según el manual de usuario [33] se recomienda no hacer vuelos en condiciones climáticas extremas como lluvias, vientos fuertes, nieve o niebla, pues puede causar daños al UAV de forma permanente o provocar inestabilidad durante el vuelo. También al delimitar el área donde se va realizar el vuelo es importante tener en cuenta los riesgos como masas de agua, estructuras, árboles, líneas eléctricas, entre otros.

Se debe elegir una ubicación de vuelo con vista despejada, es decir libre de espacio, sin obstáculos, con un cielo sin nubes, sin arquitectura para mejorar la intensidad de la señal GPS, pues el UAV solo funciona cuando detecta mínimo 6 satélites para obtener una posición GPS definida.

Al utilizar el modo automático, una vez los motores se pongan en marcha después de alcanzar la posición GPS, guarda siempre esta posición de inicio como punto de lanzamiento en coordenadas geográfica (generalmente su precisión es de 1 a 2 m).

El dispositivo contiene un mando o control remoto que es el eje central de la comunicación el cual proporciona los mecanismos de control y muestra en pantalla los datos del vuelo mediante una red Wi-Fi (Ver Figura 19 (b)).

Sobre el mando se ubica un Smartphone o Tablet que contenga la aplicación *3DR SOLO®,* dicha App se conecta a la red Wi-Fi del dispositivo. Este trasmite video *streaming,* es decir que la transmisión es a través de redes de medios continuos, en este caso Wi-Fi, donde no existe una descarga de información sino que se envía la información y se reproduce en tiempo real (en vivo) al recibirla de la cámara con una telemetría superpuesta a la imagen (OSD – *Over Screedn Dsiplay)* y accede a un interfaz para controlar funciones avanzadas. La interfaz de comunicación se puede observar en la Figura 20 donde se ilustra la manera de recibir y enviar salidas de control, telemétricas y de video.

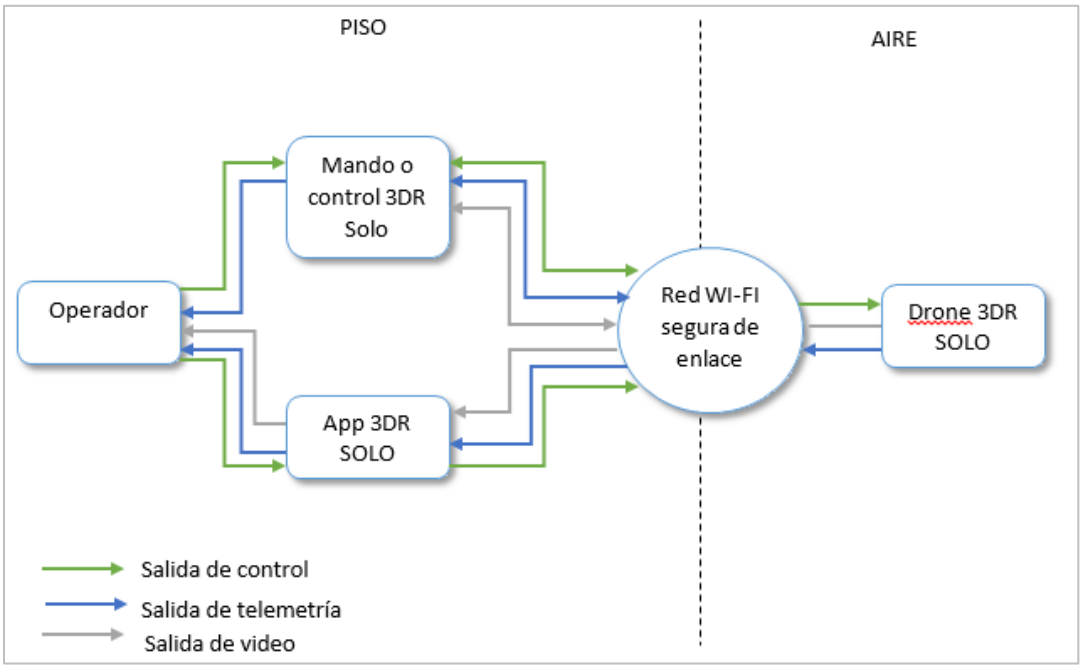


Figura 20. Interfaz de comunicación 3DR SOLO

En el mando se obtiene toda la información sobre el estado del UAV durante el vuelo como lo es:

- Porcentaje de batería de vuelo
- Intensidad de la señal de GPS y cantidad de satélites activos
- Modo de vuelo
- Nivel de batería del mando
- Intensidad de la señal Wi-Fi
- Distancia horizontal desde la posición de inicio
- Altitud actual
- Funciones asignadas a los botones A y B del mando

Por último el UAV tiene incorporado un *Gimbal* donde se ubica una cámara *GoProHero4*®. Este se encarga de seguir unos comandos y mantener siempre la cámara en una misma posición independiente del vuelo que realice el dispositivo (Ver Figura 19 (c)). La cámara fue configurada en una orientación invertida para que al pasar las imágenes al computador se vean correctamente sin necesidad de invertir la foto y se configuró además en un campo de visión medio para obtener resultados óptimos según el manual de usuario y evitar imágenes con “ojo de pez” [33].

3.3. Diseño de experimentos

Con las especificaciones antes mencionadas se realizó un diseño de experimentos para definir el porcentaje de solapamiento más adecuado en las aplicaciones agrícolas y realizar un análisis de la altura y velocidad de vuelo más apropiado. Para ello se utilizó el programa *Mission Planner*® que proporciona los datos de fotogrametría según las especificaciones determinadas.

Las pruebas se realizaron en la Universidad EAFIT Llanogrande donde se delimito el área a 80.886 m^2. Todos los experimentos se analizaron bajo 2 variables: la altura

de vuelo y el solapamiento entre imágenes. Para la altura de vuelo se definieron 5 alturas diferentes como se ilustra en la Tabla 3. Estas alturas se establecieron teniendo en cuenta la altura máxima de los árboles del terreno, los cuales son de aproximadamente 50 m con el fin de que el UAV se elevara sin problema y alcanzara la altura definida en el plan de vuelo.

Tabla 3. Alturas definidas para el diseño de experimentos

Altura [m]
60
70
80
90
100

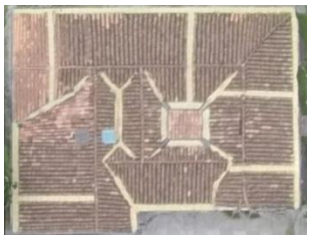
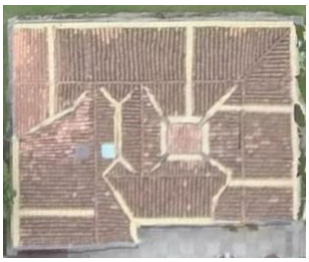
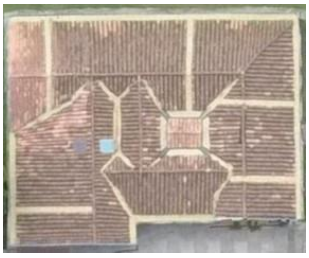
Para el solapamiento se tuvieron en cuenta 3 porcentajes diferentes según la literatura [2] como se muestra en la Tabla 4.

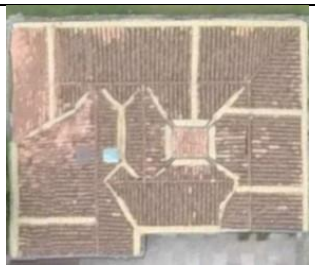
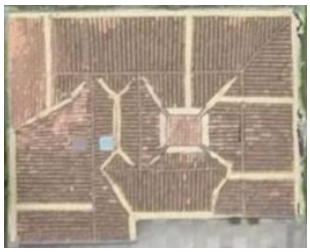
Tabla 4. Porcentaje de solapamiento para el diseño de experimentos

Solapamiento longitudinal [%] – Solapamiento Lateral [%]
80 – 70
75 – 60
60 - 30

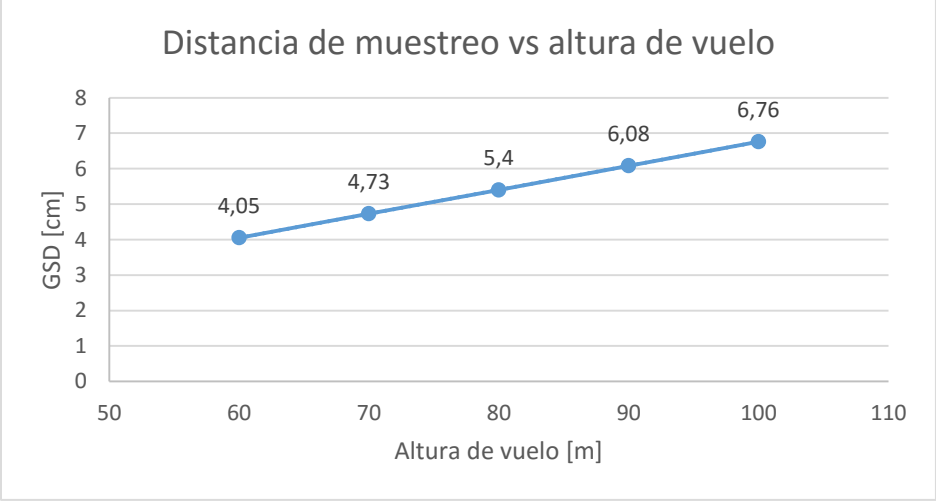
Con el diseño de experimento fue posible obtener la resolución de cada uno de los vuelos, donde se seleccionó de manera aleatoria un punto de referencia del terreno como se muestra en la Tabla 5, en el cual se puede observar que entre más altura y solapamiento se tenga mejor es la resolución de pixel de la imagen.

Tabla 5. Diseño de experimentos

Altura de vuelo [m]	Solapamiento longitudinal – lateral [%]		
	80 - 70	75 - 60	60 - 30
60	Genera casi 100 imágenes que en los softwares implementados no es posible procesar.	El UAV perdió comunicación con el mando de control y por lo tanto no se logró finalizar el plan de vuelo.	El UAV perdió comunicación con el mando de control y por lo tanto no se logró finalizar el plan de vuelo.
70			Genera una sola línea de vuelo y de esta manera no se logra analizar el solapamiento.
80			
90			

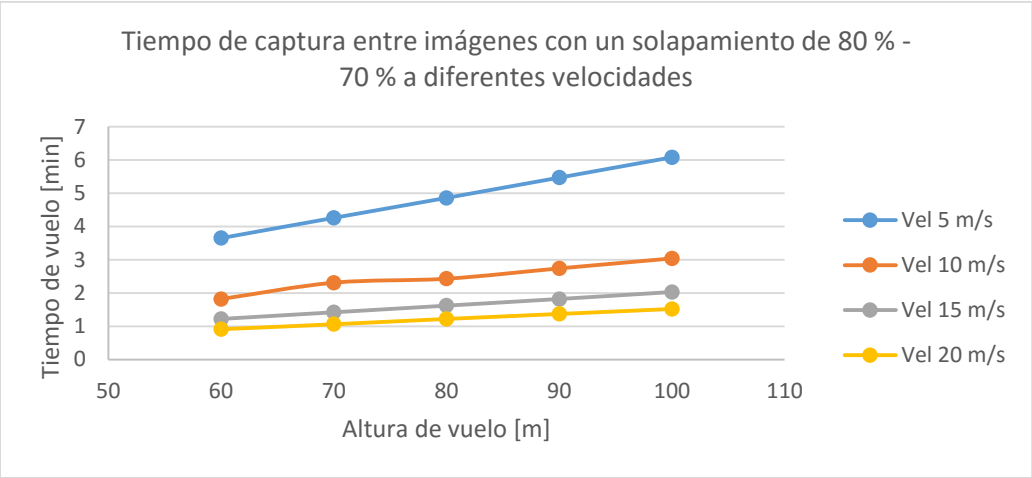
100			Genera una sola línea de vuelo y de esta manera no se logra analizar el solapamiento.

De acuerdo con la fotogrametría digital, se sabe que la distancia de muestreo (GSD) es independiente del solapamiento que se vaya a utilizar por lo tanto en la Grafica 1 se ilustra una relación lineal que se obtuvo de la GSD a diferentes alturas de vuelo.

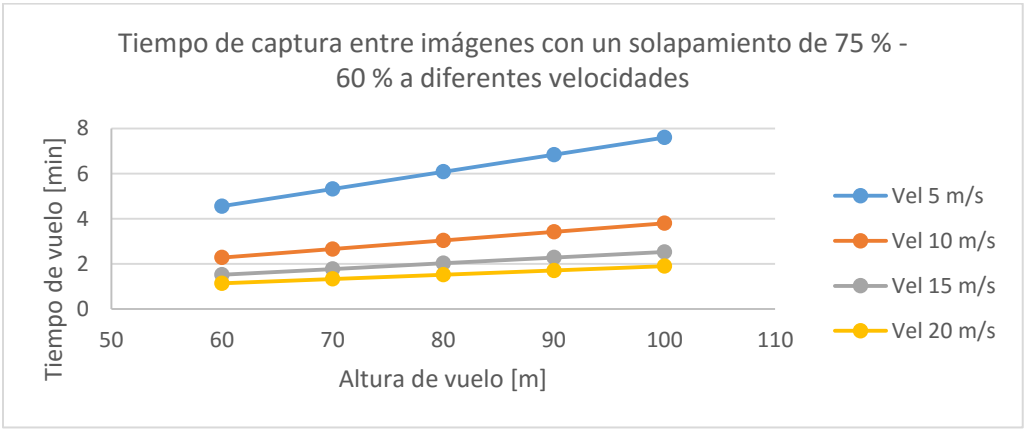


Gráfica 1. Comportamiento de GSD a diferentes alturas de vuelo

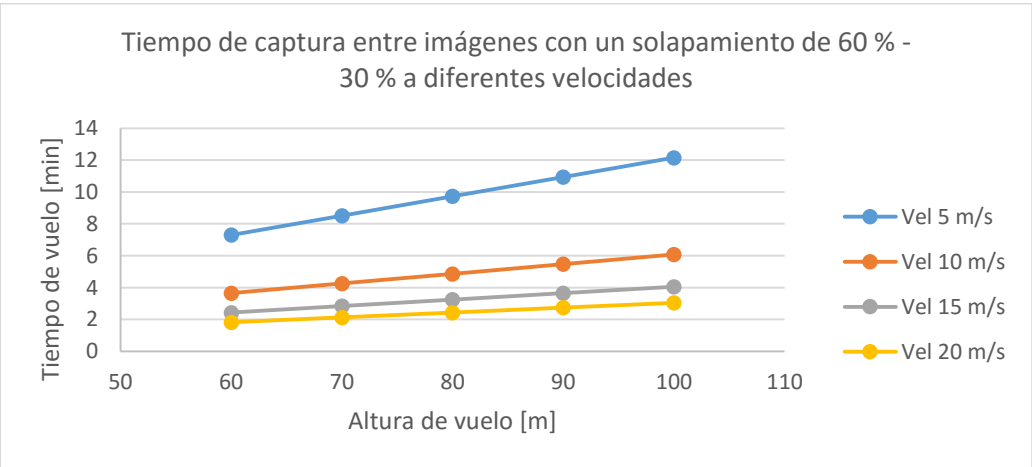
Para un índice de cobertura óptimo durante vuelos a cierta altura se debe respetar el lapso de tiempo entre las capturas. Una cámara que realice las tomas en formato RGB puede hacer la captura con un lapso mínimo de 1 segundo entre cada fotografía. El tiempo de captura se caracterizó a diferentes alturas y velocidades de vuelo los cuales se pueden apreciar en la Gráfica 2, 3 y 4 de acuerdo al porcentaje de solapamiento longitudinal y lateral.



Gráfica 2. Tiempo de captura con un solapamiento de 80% longitudinal - 70% lateral

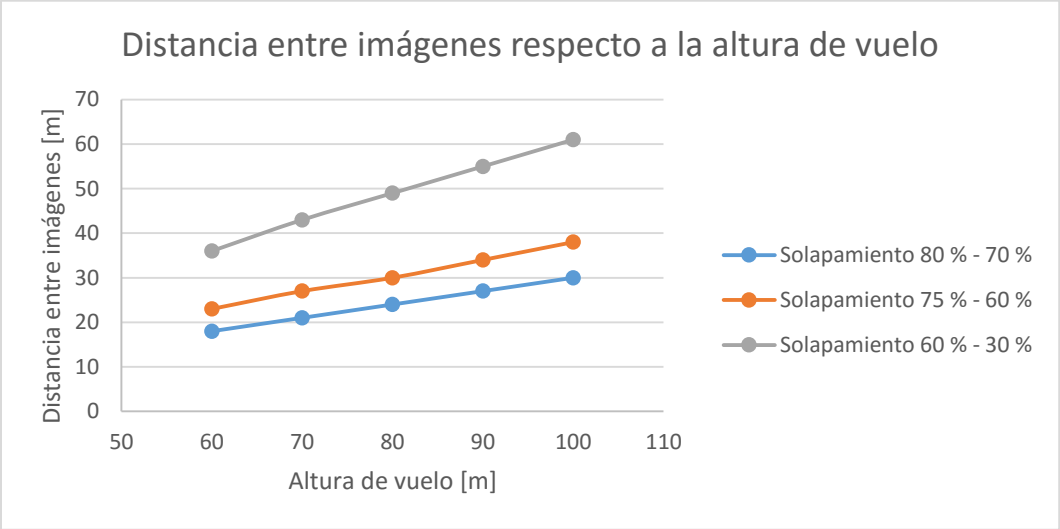


Gráfica 3. Tiempo de captura con un solapamiento de 75% longitudinal - 60% lateral

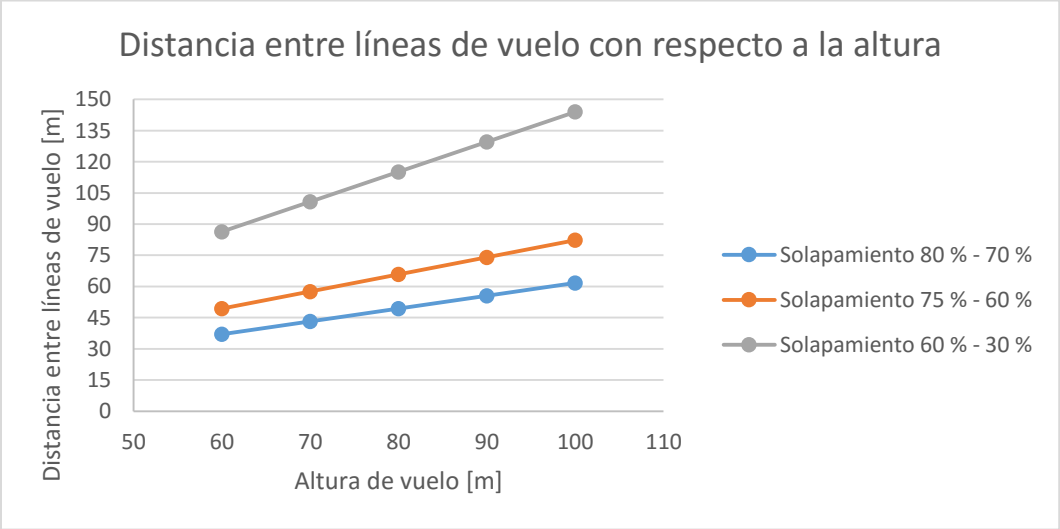


Gráfica 4. Tiempo de captura con un solapamiento de 60% longitudinal - 30% lateral

Se analizaron la distancia entre imágenes y la distancia entre líneas de vuelo con respecto a las alturas de vuelo definidas a diferentes porcentajes de solapamiento donde se observa en la Gráfica 5 y 6 que ambas tienen una regresión lineal.

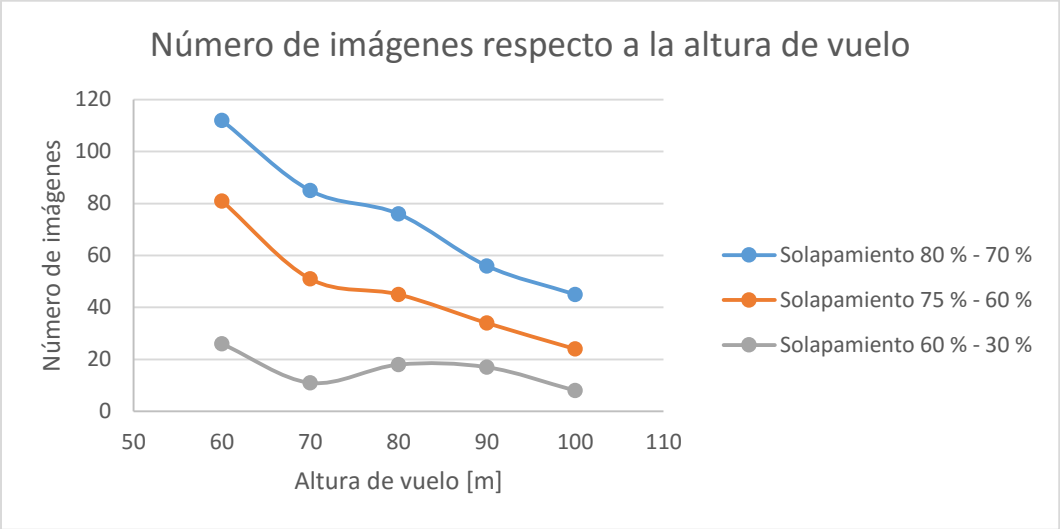


Gráfica 5. Distancia entre imágenes a diferentes alturas de vuelo

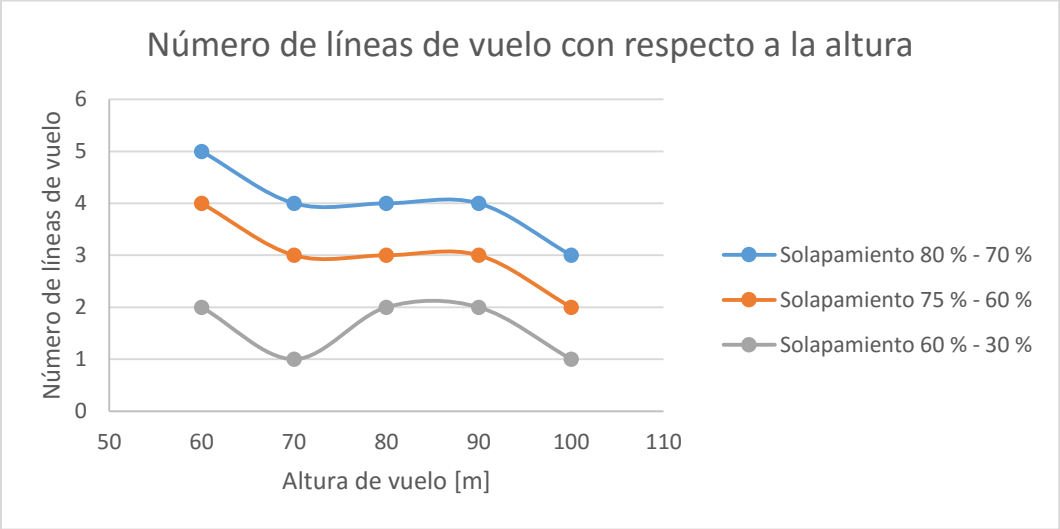


Gráfica 6. Distancia entre líneas de vuelo a diferentes alturas de vuelo

Además el número de imágenes y el número de líneas de vuelo dependerá de la altura de vuelo y el solapamiento entre imágenes como se ilustra en la Gráfica 7 y 8.



Gráfica 7. Número de imágenes respecto a la altura y el solapamiento



Gráfica 8. Número de líneas de vuelo respecto a la altura y el solapamiento

3.4. Algoritmo implementado

Para identificar las manchas generadas por la *Sigatoka Negra* en las plantas de banano se realizó un algoritmo en Matlab usando las herramientas de *Computer Vision System Toolbox* y *Image Processing Toolbox.* En la Figura 21 se ilustra el diagrama de bloques del algoritmo.

El algoritmo funciona con una serie de comandos, el comando "$imread$ permite leer la imagen y muestra la imagen en una matriz de 3 dimensiones, es decir los 3 canales (rojo, azul y verde). Por facilidad de análisis se utiliza imágenes binarias con el comando "$im2bw"$ y es necesario convertir la intensidad de la imagen en doble precisión, es decir volviendo los datos escalares con la instrucción "$im2doble"$. Con el comando "$rgb2hsv"$ se convierte la imagen a un modelo de colores llamado HSV y se define el rango de color que se quiere identificar, en este caso tonos amarillos que es el color que se destaca en la enfermedad, para ello se crea una máscara colocando en "1" ese rango seleccionado sobre la imagen.

Para convertir todos los colores de la imagen en una capa activa a los tonos de gris correspondientes exceptuando el rango de colores definidos en HSV se realiza el proceso de saturación con la máscara y la imagen original. Finalmente para una mejor visualización y análisis de la imagen se vuelve a convertir la imagen en RGB con el comando "$hsv2rgb".$

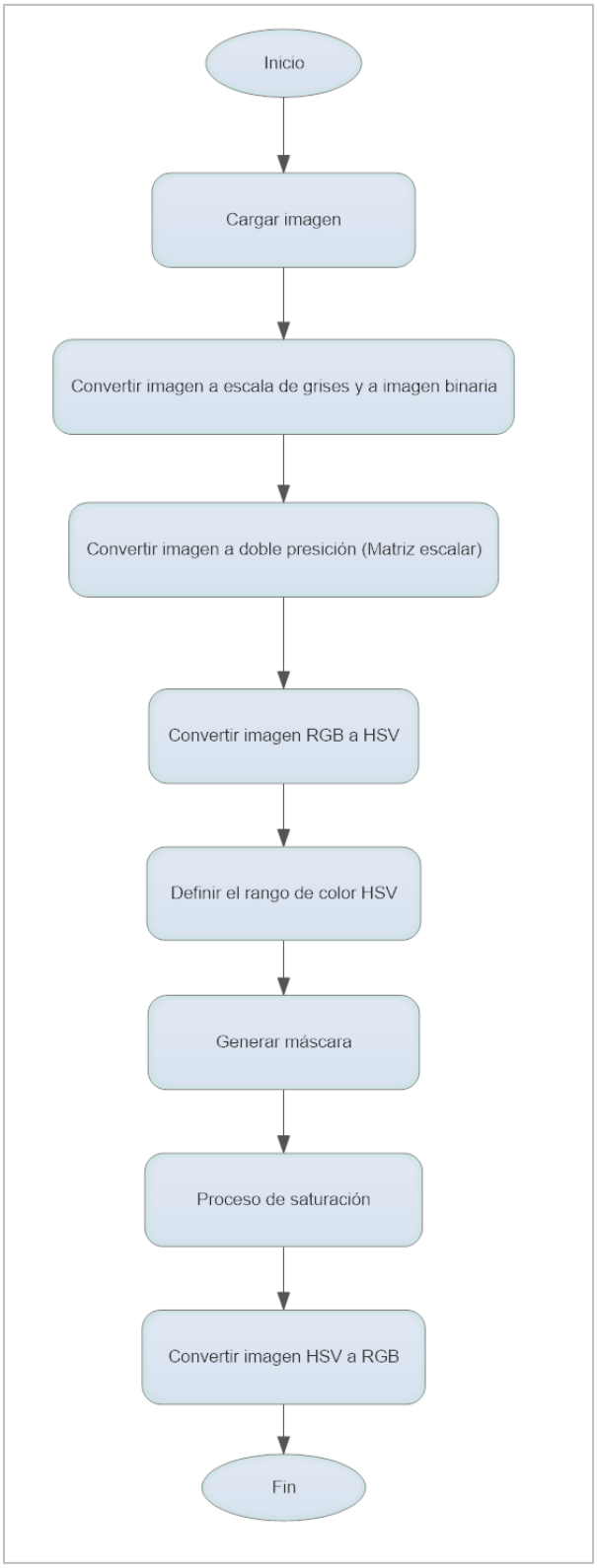


Figura 21. Diagrama de bloques del algoritmo implementado

4. RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de los vuelos realizados para el diseño de experimentos

En primera instancia se realizó un análisis de la velocidad a la que se iban a programar los planes de vuelo en EAFIT Llanogrande, para ello se observó que de 0 a 5 m/s el UAV se tardaba más en finalizar la ruta y desfavorece el porcentaje de batería del dispositivo. A una velocidad de 15 a 20 m/s el UAV realizaba con rapidez el plan de vuelo pero las imágenes quedaban distorsionadas. Por lo tanto se estableció que la velocidad que mejor se ajustaba era de 10 m/s.

En las pruebas se varió los parámetros de altura de vuelo y porcentaje de solapamiento como se indicó en la sección 3.3. La figura 22 muestra una de las rutas programadas en *Mission Planner*® sobre la zona en estudio (polígono rojo), donde se estableció una altura de 90 m con un solapamiento de 80% longitudinal y 70% lateral de las imágenes y por supuesto se configuró con las especificaciones de la cámara. Además se señaló en la figura, la altura de vuelo en un punto de coordenada aleatorio, en este caso el *waypoint* # 7, donde se observa que el UAV en ese punto debe estar a una altura de 46 m.

Figura 22. Plan de vuelo a una altura de 90 m

En vista que la zona de estudio tiene una topografía con diferentes niveles de altura, se hizo un análisis de la altitud del UAV sobre el terreno, para esto se utilizó la herramienta de mapa (“*Map Tool”*) proporcionada por *Mission Planner*® como se muestra en la Figura 23, el cual se observa que la altitud cambia respecto al terreno, manteniéndolo constante durante el recorrido, lo cual significa que las imágenes capturadas tendrán siempre la misma altura.

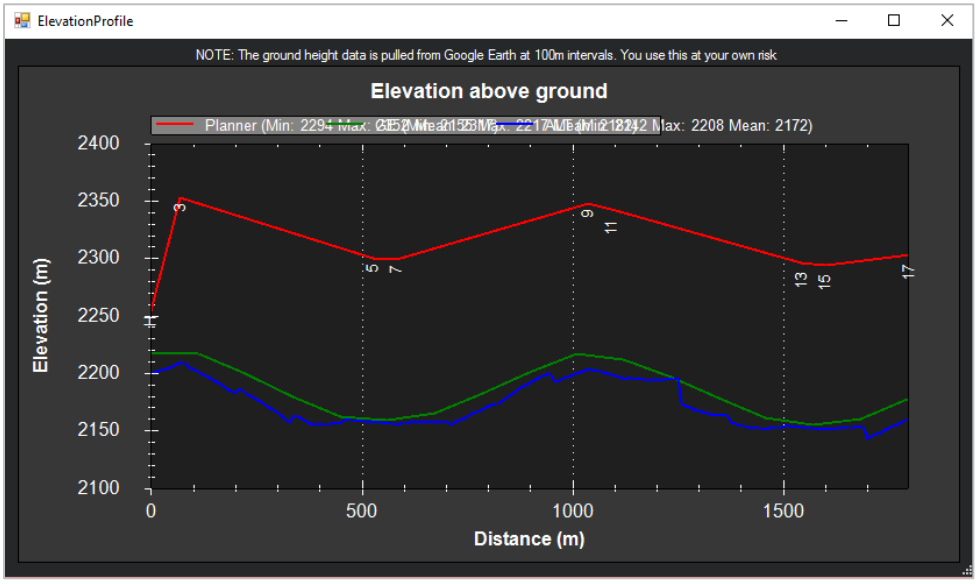


Figura 23. Análisis de elevación a 90 m de altura

El resultado que se obtuvo de este plan de vuelo fue satisfactorio como se ilustra en la Figura 24 donde se observa que el UAV en el *waypoint* aleatorio es de 48,81 m, esto quiere decir que el porcentaje de error en la telemetría es de 4%.

Figura 24. Resultado de la altura en un waypoint aleatorio del plan de vuelo

Otro resultado positivo fue el de la velocidad de vuelo para comprobar que durante la ruta mantuviera la velocidad indicada. En la figura anterior se observa que fue de 8,64 m/s pero el UAV se encontraba en una curva del plan de vuelo, por lo tanto debía disminuir su velocidad, pero en la Figura 25 se muestra el UAV en otro punto de la ruta de vuelo (línea amarilla) donde la velocidad es de 9,29 m/s significa que el error es de aproximadamente del 7%.

Figura 25. Resultado de la trayectoria y la velocidad

Se percibe que el UAV (línea morada) efectivamente sigue las líneas de vuelo obtenidas del plan de vuelo automático (líneas amarillas). Esto último indica que el dispositivo sigue las instrucciones programadas en el software para que realice un plan de vuelo automático con las condiciones establecidas.

En algunos vuelos ocurrió que el dispositivo a medida que se alejaba del punto de partida, llegaba a cierta posición donde perdía la señal de comunicación con el mando de control provocando que el dispositivo regresara al punto de inicio. Por ello, mediante el software *Mission Planner*® se logró percibir que a una distancia horizontal de 450 m aproximadamente el dispositivo perdía dicha señal como se ilustra en la Figura 26. Debido a la topografía compleja del campo estudiado, la altitud con respecto al terreno y la humedad en el medio son factores que también influyen en la señal, por lo tanto se observó que está se perdía a alturas menores de 70 m. Estos valores se tuvieron en cuenta en los demás vuelos para mantener siempre el mando de control dentro de estos rangos y finalizar con éxito las rutas de vuelo programados automáticamente.

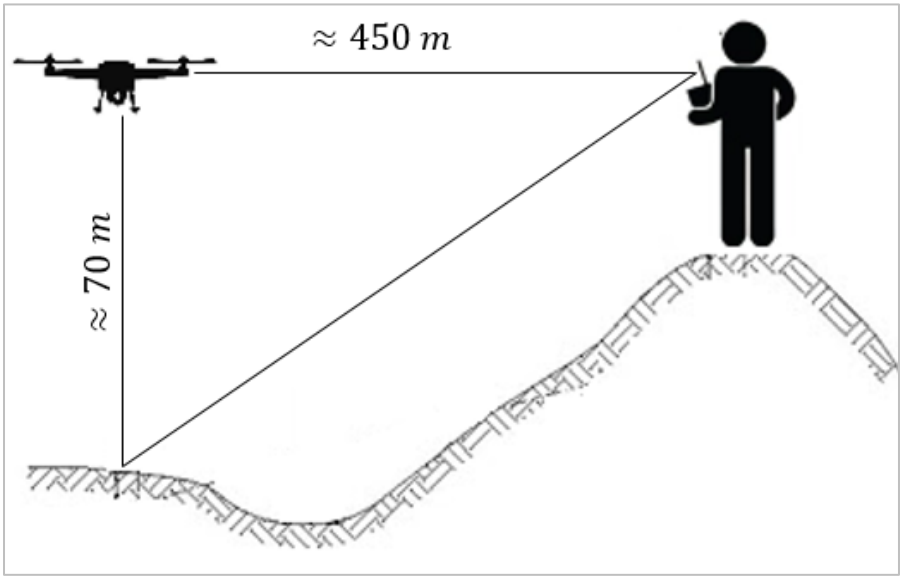
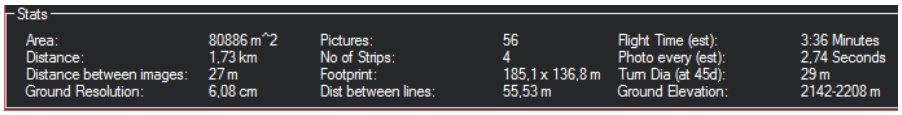


Figura 26. Rango de distancias de vuelo

Finalmente el resultado que se obtuvo de la fotogrametría digital del mismo plan de vuelo mencionado anteriormente, se puede apreciar en la Tabla 6 los cuales son datos muy aproximados a los teóricos según el porcentaje de error que se obtuvo. Los valores teóricos se obtuvieron de acuerdo a la sección 2.2 y los valores experimentales mediante los resultados arrojados por *Mission Planner®.*

Tabla 6. Resultado de fotogrametría digital

Resultado de *Mission Planner®*			
Parámetro	Valor teórico	Valor experimental	Porcentaje de error
Distancia entre imágenes	27,36 m	27 m	1,3 %
Distancia entre líneas de vuelo	55,53 m	55,53 m	0 %
Intervalo de tiempo entre imágenes	2,73 seg	2,74 seg	0,36 %
Número de líneas de vuelo	4	4	0 %
Número total de imágenes	58	56	3,4 %
Tiempo de vuelo	158,34 seg	153,44	3 %

4.2. Análisis de la generación de ortomosaico y ortoimagen

Con la adquisición de las imágenes se logró obtener el resultado del ortomosaico de la zona estudiada, para ello las imágenes fueron procesadas en el software *MICE*® como se ilustra en la Figura 27.

Figura 27. Ortomosaico del plan de vuelo a 90 m

En algunas partes de la imagen se observa distorsión, sobre todo en las zonas arboladas, es decir que al software se le dificultó encontrar una similitud entre los árboles para unir una imagen con la otra. En la Tabla 7 se observa alguna de las particularidades:

Tabla 7. Errores en el Ortomosaico

Imagen con aberración	Imagen Original

Para mejorar el mosaico antes de procesar las imágenes en el software *Agisoft Photoscan*® se realizó el proceso de georreferenciación de las imágenes capturadas mediante un GPS Garmin el cual determina la longitud, latitud y altitud. Para el estudio se recolectaron 8 puntos en la zona que posteriormente son identificados en el software como se ilustra en la Figura 28 y con estos puntos de control se realiza las correcciones de georreferenciación y unión de las imágenes.

Figura 28. Resultado georreferenciación de imágenes

Agisoft Photoscan® genera un informe con diferentes resultados como se ilustra en la Tabla 8, dichos resultados son producto del procesamiento de 45 imágenes a una altura de 90 m y con los porcentajes de solapamiento 80 % – 70 %.

El primer resultado es la generación de ortoimagen con la localización de los 8 puntos de control sobre la zona, donde se observa que efectivamente el software identifica estos puntos GPS en las imágenes con el fin de encontrar similitud entre las imágenes con mayor facilidad.

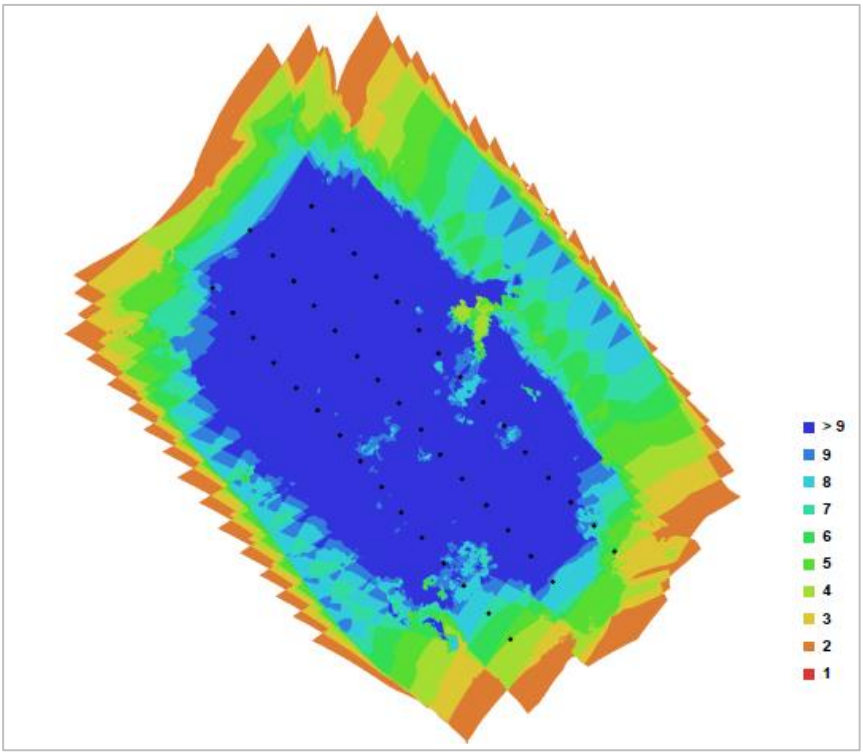
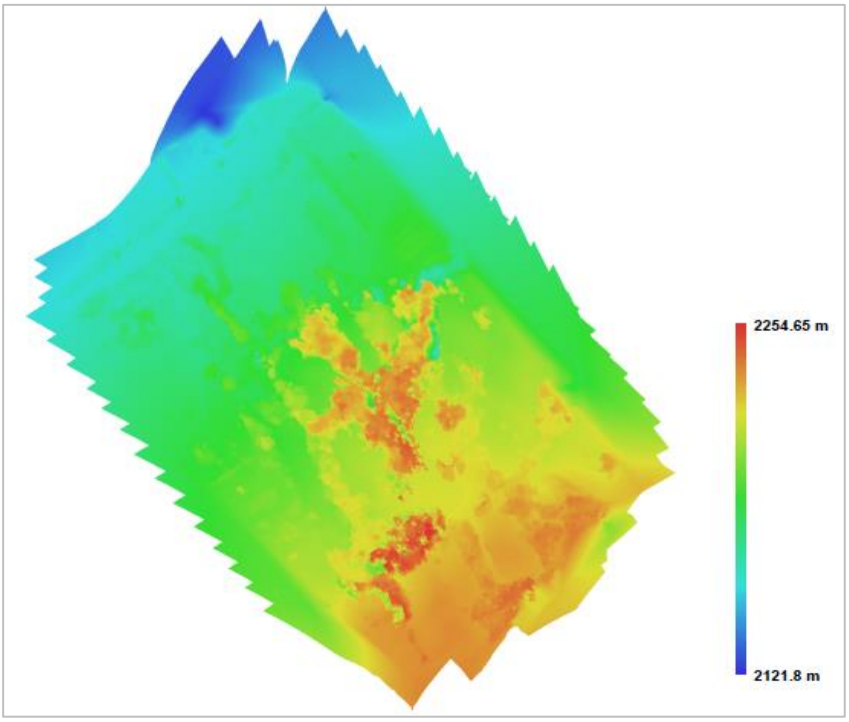
Se observa que en los bordes y en las zonas arboladas existen aberraciones a causa de la escasa información y georreferenciación entre las imágenes para su respectiva interpolación, sin embargo en la zona de interés se obtuvo resultados positivos. En la Tabla 7 podemos observar de superposición y la localización de las imágenes capturadas por el UAV, en el cual se observa que la zona de interés

(resaltado en azul) tiene mayor solapamiento de imágenes, es decir que el software encuentra más de 9 imágenes con las mismas características y en naranja las zonas con menor solapamiento e información.

Finalmente con la información proporcionada para la generación de ortoimagen se obtuvo el resultado de la elevación del terreno donde se evidencia la altitud en diferentes sectores de la Universidad EAFIT Llanogrande.

Tabla 8. Informe de resultados generado por Agisoft Photoscan ®

Tipo de resultado	Resultado
Ortoimagen con localización de los puntos de control.	

Localización y solapamiento de imágenes.	
Elevación del terreno.	

Es importante aclarar que los resultados antes mencionados también se obtuvieron para diferentes alturas de vuelo y porcentaje de solapamiento, donde todos tuvieron buen resultado en la generación de ortoimágenes como se muestra en el ANEXO 1, no obstante con aberraciones en zonas arboladas donde se dificulto el solapamiento entre una imagen y otra.

4.3. Análisis procesamiento de imágenes en planta de banano

Lo ideal en este proyecto hubiese sido aplicar este método en empresas con mayor área de cultivo de plantas de banano como por ejemplo en las regiones de Uraba, Antioquia. Por razones económicas y de escaso tiempo no fue posible la visita, sin embargo logramos simular un cultivo gracias al Departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad EAFIT, quienes cuentan con un invernadero para hacer investigación, entre ellas la enfermedad de la *Sigatoka Negra*. En vista que el invernadero se encuentra en un espacio reducido, se decidió extraer las plantas a un espacio al aire libre donde se pudiera capturar las imágenes utilizando la plataforma aérea como se ilustra en la Figura 29.

Figura 29. Simulación de cultivo de planta de banano

De acuerdo con el diseño de experimentos se utilizó el porcentaje de solapamiento más adecuado para la adquisición de las imágenes aéreas sobre las plantas de banano, el cual fue de 80% longitudinal y 70% lateral. El resultado de la ortoimagen fue satisfactorio gracias a la cobertura de la imagen, que en este caso se estableció a 5 m de altura para identificar con mayor facilidad las hojas con manchas a causa de la enfermedad de la *Sigatoka Negra*. Con este resultado fue posible procesar la imagen con el algoritmo mostrado en la sección 3.4 el cual se obtuvo buenos resultados de la imagen binaria, la imagen en HSV y la máscara (ver Figura 30).

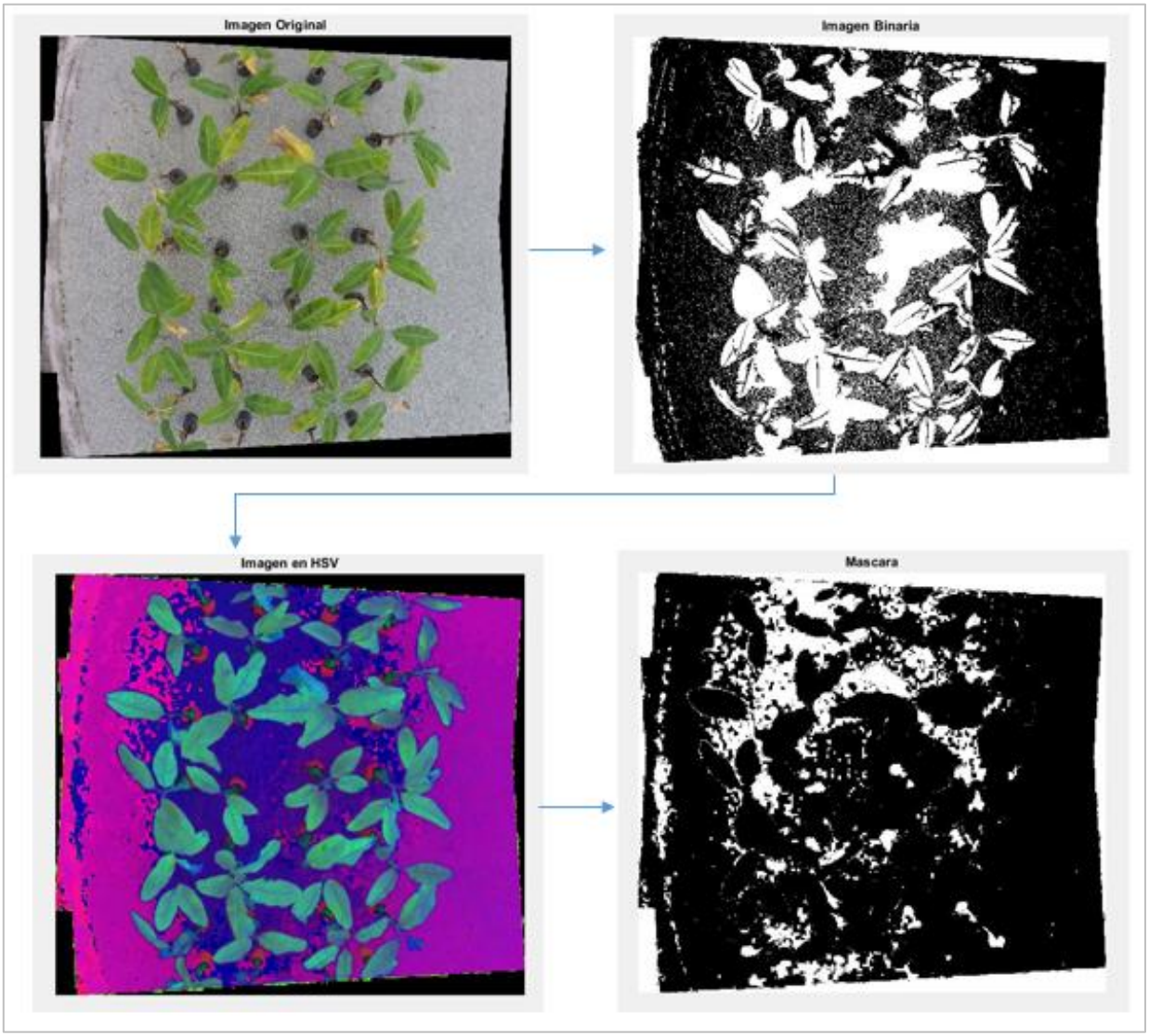


Figura 30. Procesamiento de imágenes con el algoritmo implementado

Finalmente se identificó la enfermedad de la *Sigatoka Negra* sobre las hojas de las plantas de banano como se muestra en Figura 31 en la cual se observan las manchas de color amarillento lo cual corresponde a dicho patógeno. Con ayuda del procesamiento de imágenes se logró resaltar los colores de las hojas infectadas y colocar el resto de la imagen en escala de grises.

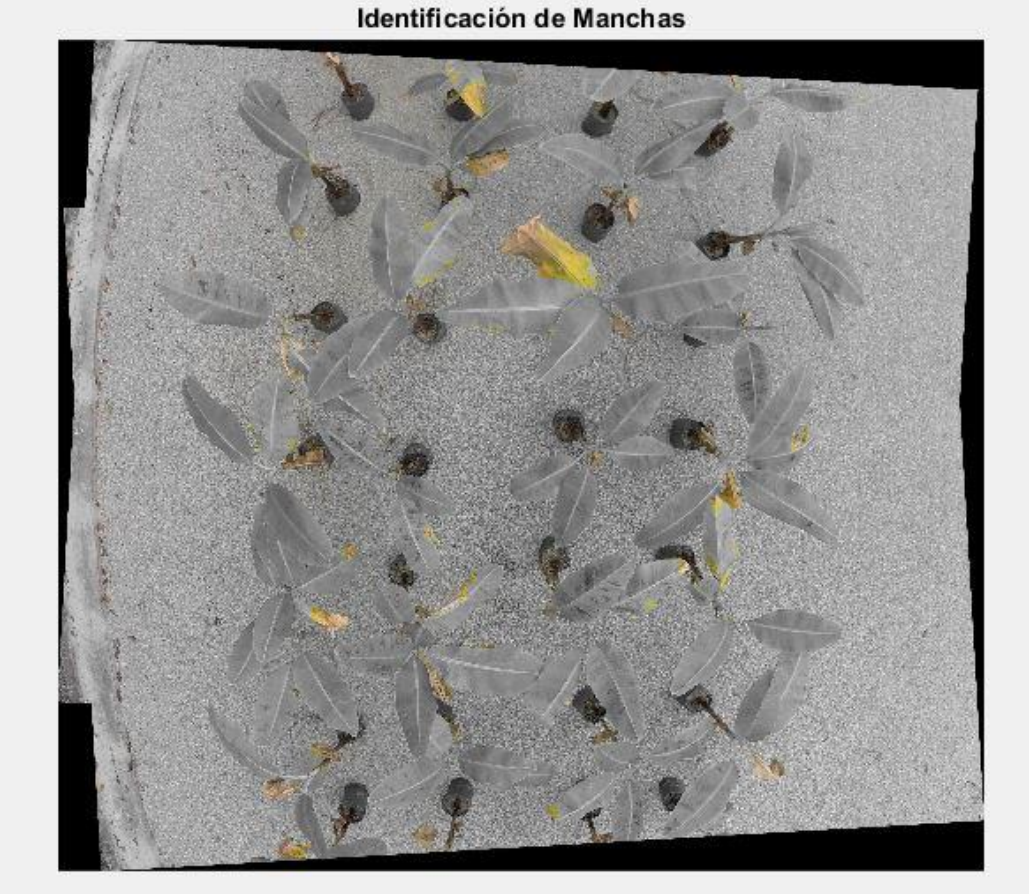


Figura 31. Identificación de manchas en plantas de banano

5. CONCLUSIONES

Se logró utilizar un vehículo aéreo no tripulado con una cámara digital acoplada para la obtención de imágenes aéreas, cumpliendo con los objetivos del proyecto el cual era obtener un ortomosaico y generar una ortoimagen de un cultivo, donde se logró procesar dicho resultado en un algoritmo de procesamiento por cómputo para la detección o identificación de una enfermedad común en las hojas de las plantas de banano llamado *Sigatoka Negra*.

Se logró también realizar un plan de vuelo automático y parametrizar las variables de altitud y porcentaje de solapamiento. Con el diseño de experimentos se concluye que a 80% - 70% de solape y a altas alturas se consigue un mejor resultado en la generación de ortoimagen como se evidencia en el ANEXO 1.

Otra conclusión interesante es elegir un espacio al aire libre para realizar los vuelos, en vista que el GPS del UAV no es 100% exacto existe la posibilidad de ocasionar accidentes. También es importante la selección de la época de muestreo donde las condiciones climáticas sean óptimas para realizar vuelos sobre una zona específica. En días lluviosos puede causar daños eléctricos al UAV y en días muy soleados las imágenes quedan con mucha intensidad de luz y con posibles sombras causando dificultad en la unión de las imágenes.

Se concluye además que los resultados de la ortoimagen son más efectivos cuando se tiene los puntos de control bien distribuidos sobre la zona de interés, pues se evidenció que en las partes menos georreferenciadas se produce más aberraciones. No obstante según la literatura [2] en áreas densamente boscosas es difícil para el procesamiento de un software encontrar puntos comunes o puntos claves entre la superposición de imágenes por su complejidad geométrica (miles de ramas y hojas), por esta razón de acuerdo con [34] se recomienda aumentar el porcentaje de solapamiento frontal o longitudinal a un 85% y al menos un 70% de solapamiento lateral. También es recomendable volar más alto para mejorar los

resultados y geolocalizar con precisión las imágenes, pues a mayor altitud de vuelo menos distorsión de perspectiva y por lo tanto menos problemas de apariencia. La altitud de vuelo en relación con la resolución del pixel de la imagen y la distancia focal, determina la distancia de muestreo (GSD) en el suelo de las imágenes (resolución espacial) y los mejores resultados se obtienen en un GSD superior a 10 cm/pixel.

A pesar de que no se logró realizar la aplicación en una empresa agrícola, se logró implementar la metodología simulando un cultivo con las plantas de banano del invernadero de la Universidad EAFIT quienes el Departamento de Ciencias Biológicas utilizan para el estudio de enfermedades en las plantas.

Finalmente la identificación de manchas en las hojas fue acorde a los objetivos ya que se logró extraer un patógeno mediante un algoritmo programado en los cultivos de banano como lo es la *Sigatoka Negra*, el cual es una enfermedad foliar del banano causado por un hongo que constituye el principal problema fitopatológico del cultivo, reduciendo la fotosíntesis, el crecimiento de la planta y la producción y afectando rápidamente el tejido foliar, lo que se concluye que con el procesamiento de imágenes y con la metodología implementada se logró detectar una característica común de la planta de banano.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación se presentan algunos trabajos futuros en las que es posible continuar trabajando y quedan abiertas para resultados de investigación. Además, se sugieren algunos desarrollos específicos para apoyar y mejorar el modelo y metodología propuesta.

- Con la experiencia en los vuelos es necesario instalar en el mando de control una antena de mayor alcance para aumentar la cobertura con el UAV y poder realizar vuelos a largas distancias sin inconvenientes como por ejemplo en empresas agrícolas con hectáreas de cultivos.
- Realizar un *check list* con todos los elementos que se necesitan para realizar un plan de vuelo, cargar las baterías con anticipación y configurar la cámara con especificaciones medias para no utilizar imágenes con ojo de pez, pues este último genera problemas de solapamiento de imágenes.
- El procesamiento de imágenes en *Agisoft Photoscan*® para más de 70 imágenes se recomienda utilizar un computador con mayor capacidad de procesamiento.
- Detectar otras características importantes en la agricultura como el Moko, índice foliar, estrés hídrico, entre otras utilizando cámaras multiespectrales y procesando imágenes en softwares con mejores herramientas de procesamiento.
- Desarrollar un algoritmo donde se obtenga el área exacta de la infección sobre un cultivo, pues de esta manera se minimiza tiempo y se innova la aplicación en algunas áreas de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. J. C. J. H. P. D. Jesús Orlando Escalante Torrado, «Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV,» *Tecnura,* vol. 20, nº 50, p. 23, 2016.

[2] F. Greenwood, «How To Make Maps With Drones,» de *Drones and Aerial Observation: New Technologies for Property Rights, Human Rights, and Global Development*, New America , 2015, p. 13.

[3] B. &. M. M. Bryant, «Determining crop water stress from crop temperature variability,» *Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing,* vol. 1, nº 21, pp. 289-296, 1999.

[4] CIAT, «Estimating rice yield related traits and quantitative trait loci analysis under different nitrogen trearments usinf a simple tower-based field phenotyping system with modified single-lens reflex cameras,» *ISPRS Journal of Phtogrammetry and Remote Sensing ,* pp. 50-62, 2016.

[5] J. J. Díaz Garcia , «Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la Agricultura de precisión,» Madrid, 2015.

[6] J. J. Ruiz, «Generación de mapas 3D a partr de imagenes aéreas,» Sevilla, 2013.

[7] G. Kateregga, «Updates from Dar es Salaam,» *Humanitarian Open Street Map Team (HOT OSM),* pp. 04-22, 2015.

[8] D. Raymaekers, «UAV Mapping in Ethiopia,» *DIY Drones,* 2015.

[9] F. Greenwood, «Drones to the Rescue: Future Tense,» Future Tense, 3 Junio 2015. [En línea]. Available: http://www.slate.com/articles/technology/future_tense/2015/06/community_drones_helps_indonesia_s_dayaks_protect_their_land.html..

[10] R. Ruiz Marin y L. Á. Ruiz Fernández, «Generación de una ortoimagen digital a partir de un sensor espacial de alta resolución,» Valencia, 2005.

[11] P. M. I. Colomina, «Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* nº 92, pp. 79-97, 2014.

[12] G. Sánchez Jiménez, M. Mulero Valenzuela y E. Saumeth Cadavid, «Vehículos aéreos no tripulados,» Information & Design Solutions, España, 2013.

[13] L. G. F. Bouillon, «Sistema aéreo no tripulado,» Information & Design Solution, Madrid, 2009.

[14] J. Velasco, S. García Nieto, G. Reynoso Meza y J. Sanchis, «Desarrollo y evaluación de una estación de control de tierra para vehículos aéreos no tripulados,» 2012.

[15] L. R. Garcia Carillo, A. E. Dzul Lopez, R. Lozano y C. Pegard, «Vision-based hovering and navigation,» *Quad-Rotor Control,* 2011.

[16] ArduPilot, «Mission Planner,» 2016. [En línea]. Available: http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html. [Último acceso: 21 Septiembre 2017].

[17] E. Santana, «XDRONES,» 23 Febrero 2017. [En línea]. Available: http://www.xdrones.es/mavlink/. [Último acceso: 7 Noviembre 2017].

[18] S. C. Segarra, «Modelos digitales del terreno mediante fotogrametría aérea realizada con un vehículo aéreo no tripulado,» Madrid, 2015.

[19] Pix4D, «Getting GCPs on the field or through other sources (optional but recommended),» 2016. [En línea]. Available: https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557489#gsc.tab=0..

[20] B. Froment, «Fotografias aéreas,» 2007.

[21] M. Diago y J. Tardáguila, «Aplicación de tecnologías no invasivas en viticultura de precisión,» *I Jornadas del Grupo de Viticultura y Enología de la SECH,* vol. I, pp. 107-113, 2014.

[22] L. R. K. C. Z. E. S. J. V. R. S. G. J. V. P. N. M. A. H. C. M. O. P. N. R. K. M. J. P. Sindhuja Sankaran, «Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for,» *European Journal of Agronomy,* nº 70, pp. 112-123, 2015.

[23] W. y. Z. Y. Chen, «An improved SIFT algorithm for image feature-matching.,» *International Conference on Multimedia Technology,* pp. 197-200, 2011.

[24] Image Composite Editor (ICE), «Microsoft Research,» 5 Febrero 2015. [En línea]. Available: https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/image-composite-editor/. [Último acceso: 19 Septiembre 2017].

[25] D. G. Marcovecchio, J. Ferrari, L. F. Costa, G. Díaz y C. A. Delrieux, «Ortomosaicos utilizando Imágenes Aéreas tomadas por Drones y su aplicación en la Agricultura de Precisión,» Bahía Blanca, 2014.

[26] J. A. Beltrán Arciniegas y S. L. Ortiz Parada, «Ortofotografía del predio El Tibar perteneciente a la Universidad Distrital Francisco José De Caldas,» Bógota, 2017.

[27] «Agisoft PhotoScan: PhotoScan Fully automated professional photogrammetric kit,» 2016. [En línea]. Available: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf.. [Último acceso: 19 Septiembre 2017].

[28] AgiSoft LLC, «Agisoft Lens User Manual: Version 0.4.0,» 2011. [En línea]. Available: http://downloads.agisoft.ru/lens/doc/en/lens.pdf. [Último acceso: 19 Septiembre 2017].

[29] Martínez Bolaños, Luciano, Orozco-Santos, Mario, Manzo-Sánchez, Gilberto, García-Mariscal, Karina, Guzmán, Salvador, Beltran-García, Miguel, Garrido-Ramirez, Eduardo, Torres-Amezcua, José y Canto Canche, Blondy, «La Sigatoka Negra y su manejo integrado en banano,» SAGARPA, Colima, 2013.

[30] B. E. Ribadeneira Coloma, «Desarrollo de un modelo porcentual para la evaluación de sigatoka negra en condiciones de invernadero,» Espol, Guayaquil, 2016.

[31] MATLAB, «version 7.10.0 (R2010a),» The mathWorks Inc, Natick, Massachusetts, 2010.

[32] M. Oge, «Image Processing Basics,» de Practical Image and Video Processing using Matlab,» Willey, Florida, 2011.

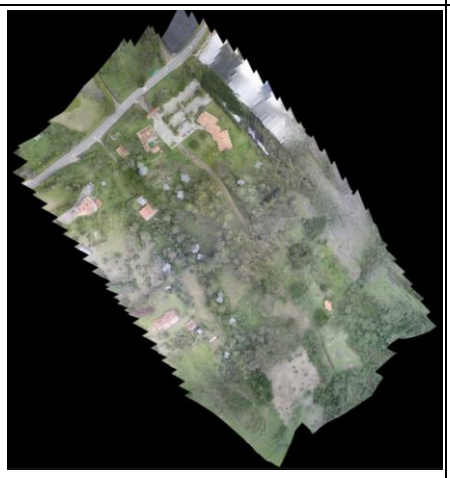
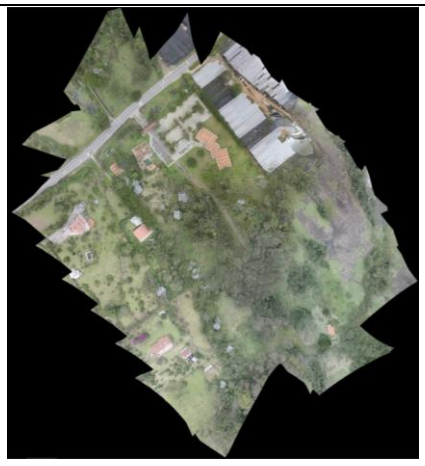
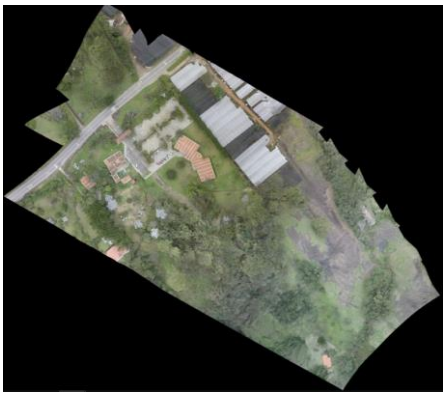
[33] 3D Robotics (3DR), «Solo User Manual V7,» California , 2015.

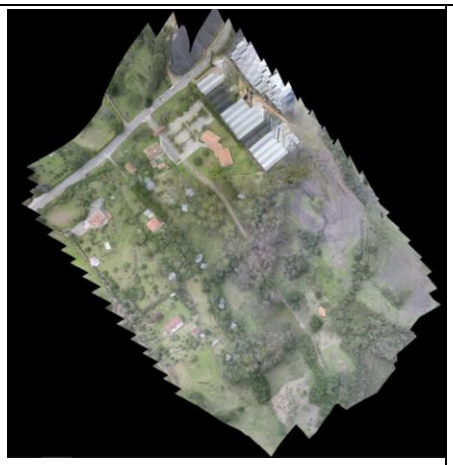
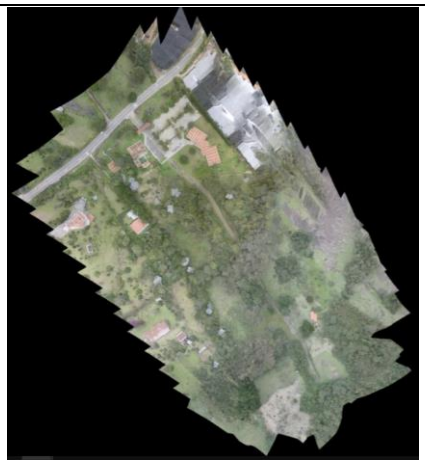
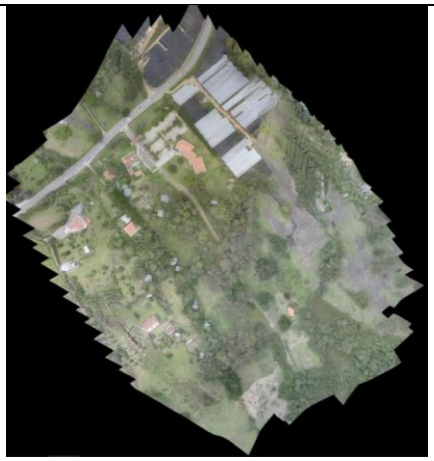
[34] Pix4D Support Site, «Step 1. Before Starting a Project > 1. Designing the Images Acquisition Plan > a. Selecting the Images Acquisition Plan Type,» 2012-2017. [En línea]. Available: https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459#gsc.tab=0. [Último acceso: 23 10 2017].

[35] J. L. Arus y J. E. Cairns, «Field high-throughput Phenotyping: The new crop breeding frontier,» *Trends in Plant Science ,* pp. 1-10, 2014.

[36] L. Bergamasco y P. Asinari, «Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy),» *El Sevier,* pp. 2741-2756, 2011.

ANEXO 1. Generación de ortoimágenes a diferentes alturas y solapamientos.

Altura de vuelo [m]	Solapamiento longitudinal - lateral		
	80% - 70%	75% - 60%	60% - 30%
60	No se realizó porque genera casi 100 imágenes y en los softwares implementados puede causar un procesamiento bastante lento.	No se realizó porque el UAV perdió comunicación con el mando de control y no se logró finalizar el plan de vuelo.	No se realizó porque el UAV perdió comunicación con el mando de control y no se logró finalizar el plan de vuelo.
70			No se realizó porque genera una sola línea de vuelo y así no se logra analizar el solapamiento.
80			

90			
100			No se realizó porque genera una sola línea de vuelo y así no se logra analizar el solapamiento.