

Manual técnico para diagnóstico temprano de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* mediante análisis de imágenes multiespectrales en *Musa* spp. en Tingo María – Perú

INDICE

1. Introducción
2. Objetivo
3. Justificación
4. Equipos y materiales
 - 4.1. Drone DJI Mavic 3 Multispectral
 - 4.2. Estación D-RTK2
 - 4.3. Panel radiométrico DJI
 - 4.4. Software de procesamiento (Agisoft / Pix4DFields)
5. Identificación de la parcela a monitorear
6. Preparación de equipos de vuelo
7. Configuración inicial del equipo
8. Armado y encendido del drone
9. Plan de vuelo
 - 9.1. Sincronización con estación D-RTK 2
 - 9.2. Sobrevuelo manual y delimitación de parcela
 - 9.3. Parámetros recomendados de vuelo
10. Ejecución del vuelo en campo
 - 10.1. Vinculación con la estación D-RTK 2
 - 10.2. Calibración radiométrica
 - 10.3. Toma de fotografías del panel de calibración
11. Procesamiento de datos
 - 11.1. Organización de imágenes
 - 11.2. Procesamiento en Agisoft Metashape
 - 11.3. Procesamiento de imágenes RGB
 - 11.4. Cálculo de índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI, SAVI)
12. Análisis e interpretación de resultados
13. Productos finales
14. Referencias

1. Introducción

La presencia de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) en el Alto Huallaga ocasiona pérdidas severas en los cultivares de banano ‘Manzano’, ‘Isla’, ‘Guayabo’ y ‘Seda’. La reciente introducción en el Perú de la raza Tropical 4 (TR4) incrementa el riesgo para otros cultivares previamente considerados resistentes en la selva peruana. El avance de las tecnologías de teledetección y el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) han permitido el desarrollo de herramientas innovadoras para la vigilancia fitosanitaria. En este contexto, el Proyecto SATREPS–JICA tiene entre sus objetivos establecer un protocolo de diagnóstico temprano de Foc mediante el análisis de imágenes multiespectrales capturadas con un dron y georreferenciadas con alta precisión mediante una estación móvil RTK. Estas imágenes de alta resolución permiten generar ortomosaicos y modelos digitales del terreno, así como calcular índices de vegetación como NDVI, Clgreen y GNDVI, útiles para la detección temprana de alteraciones fisiológicas asociadas a la enfermedad.

El presente manual describe los procedimientos estandarizados para la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes multiespectrales obtenidas con un dron en plantaciones de *Musa* spp. ubicadas en la región de Tingo María, Perú.

2. Objetivo

Establecer un protocolo para la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes multiespectrales obtenidas mediante un dron (DJI Mavic 3 Multispectral), con el propósito de detectar de forma temprana alteraciones fisiológicas asociadas a *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en plantaciones de plátano y banano de la selva peruana, a fin de fortalecer la vigilancia fitosanitaria en zonas de riesgo de introducción de la raza RT4.



Figura 1. Vista aérea de plantación de plátano obtenida por el dron DJI Mavic 3 Multispectral en formato RGB.

3. Justificación

El empleo de sensores multiespectrales a bordo de drones permite detectar alteraciones fisiológicas en las plantas como reducciones en el contenido de clorofila, estrés hídrico o disfunciones en la fotosíntesis— que anteceden a la manifestación visible de los síntomas de marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. Esta capacidad de detección temprana convierte a la información espectral en una herramienta estratégica para la vigilancia fitosanitaria, al facilitar la identificación oportuna de focos de infección y optimizar las medidas de manejo en zonas de alta vulnerabilidad productiva.

4. Equipos y materiales

El conjunto de equipos listados en la Tabla 1 y Figura 2, conforma un sistema integrado de adquisición y análisis multiespectral diseñado para la detección temprana y el monitoreo espacial de enfermedades en la “Marchitez vascular” del plátano y banano en la selva peruana.

Tabla 1. Equipos mínimos empleados para la adquisición de imágenes con fines de detección temprana y el monitoreo de Foc en plantaciones de plátano

| Equipo | Especificación técnica | Observaciones |
|---------------------------------|---|-----------------------------|
| Drone DJI Mavic 3 Multispectral | Sensor RGB + 4 bandas (Green, Red, Red Edge, NIR) | Alta resolución y precisión |
| Estación D-RTK2 | Corrección diferencial en tiempo real | Error < 3 cm |
| Panel radiométrico DJI | Calibración de reflectancia absoluta | Antes y después del vuelo |
| Software Agisoft / Pix4DFields | Procesamiento de imágenes multiespectrales | GPU > 8 GB recomendada |

El drone DJI Mavic 3 Multispectral, está equipado con un sensor RGB y cuatro bandas espirituales (Green, Red, Red Edge y NIR), que permite capturar imágenes de alta resolución capaces de detectar variaciones fisiológicas asociadas a estrés biótico o abiótico en las plantas, antes de que sean visibles a simple vista. La alta resolución y

precisión espacial de las imágenes permite análisis de índices NDVI, NDRE, GNDVI y otros.



Figura 2. Equipos empleados: Drone con cámara multispectral, Panel radiométrico, Estación D-RTK2 y Software sugeridos.

La estación D-RTK2, proporciona corrección geoespacial en tiempo real al drone y mejora la precisión de la georreferenciación. El error espacial es menor a 3 cm; esencial para superponer imágenes de diferentes vuelos o fechas e integrar los datos con sistemas GIS.

El Panel radiométrico DJI, se emplea para calibrar la reflectancia de las imágenes antes y después de cada vuelo, compensando las variaciones de iluminación solar y garantizando la consistencia radiométrica de los datos, indispensable para la comparación entre campañas.

Los datos obtenidos son procesados en software especializado como Agisoft Metashape o Pix4DFields, los cuales generan ortomosaicos, modelos digitales de superficie y mapas de índices de vegetación (NDVI, NDRE, GNDVI, entre otros). Estos índices permiten identificar zonas con alteraciones fisiológicas causadas por el desarrollo de enfermedades

iniciales o deficiencias nutricionales, constituyendo una herramienta avanzada para el diagnóstico temprano de Foc.

5. Identificar la parcela a monitorear

El primer paso consiste en recibir y registrar el reporte o la sospecha de un posible caso de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en una plantación de plátano o banano. Ante ello, se programa una visita técnica a la parcela afectada, previa coordinación con el productor para la verificación y toma de muestras correspondientes.



Figura 3. Identificar la parcela a monitorear.

6. Preparación de equipos de vuelo

El día anterior a la operación se realiza la preparación y verificación de todos los equipos y accesorios necesarios para la captura de imágenes en campo. Los equipos por revisar y acondicionar son los siguientes:

- Dron con sensor multiespectral
- Baterías completamente cargadas, considere que una batería de 30 minutos de vuelo
- Estación móvil D-RTK 2 con baterías cargadas
- Memorias microSD de alta velocidad
- Laptop operativa
- Panel de calibración radiométrica limpio y en condiciones óptimas
- Pista de aterrizaje portátil en buen estado



Figura 4. Equipos y accesorios necesarios para la toma de las imágenes multiespectrales

7. Configuración Inicial del equipo

- Revisar si necesita actualizar firmware del drone, control y D-RTK 2
- Formatear la microSD para liberar el almacenamiento.

7.1. Armado del Drone para su encendido

Siga el manual de operaciones del Drone DJI Mavic 3 Multispectral descrito en:
https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20230303/DJI_Mavic_3M_User_Manual_ES.pdf

8. Plan de vuelo

Una vez en el lugar del vuelo, se debe seleccionar un área despejada y nivelada, se coloca la pista de aterrizaje (Helipad) para el despegue del Drone. Encender el Drone y el control remoto. En la pantalla del control remoto seleccionar el icono DJI Pilot 2 y en ella configuraremos los parámetros de vuelo (Figura 5 y Tabla 2).

Otro paso importante es la sincronización del Drone con la estación móvil D-RTK 2; para ello, se instala la estación móvil D-RTK 2 en un punto elegido. A continuación, se procede a encenderla y sincronizarla con el Drone. Esta sincronización permite obtener imágenes con alta precisión en georreferenciación con un error de 3 cm. El procedimiento de la sincronización se presenta en la Figura 6.

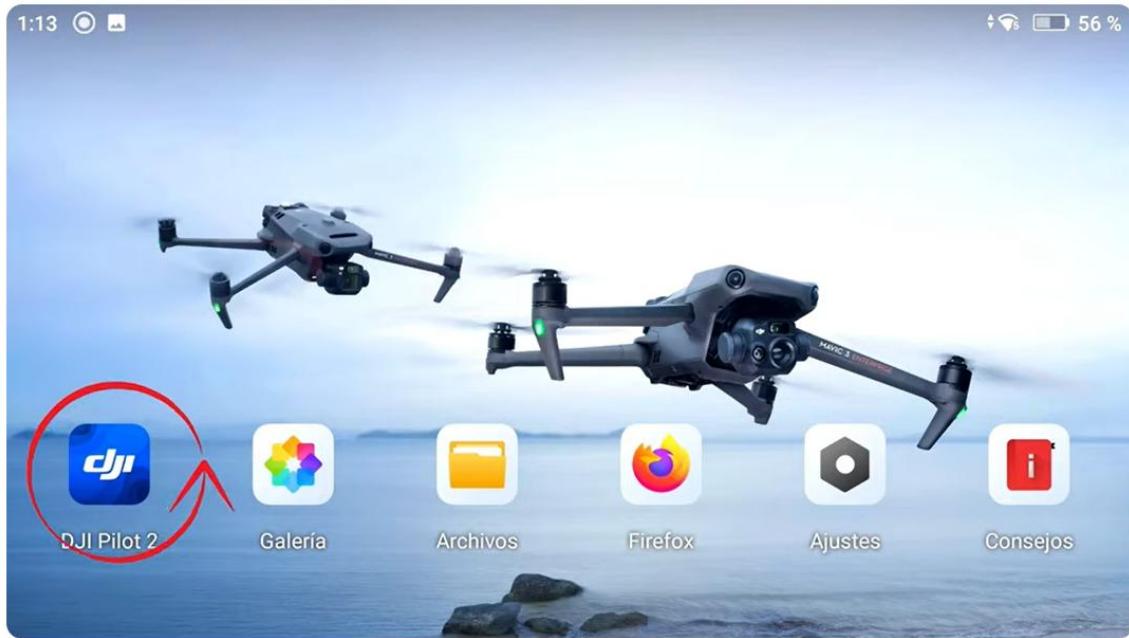


Figura 5. Pantalla del control remoto mostrando el ícono DJI Pilot 2 donde se ajusta los parámetros de vuelo.

Se realiza un primer sobrevuelo manual con el objetivo de reconocer la parcela y efectuar un monitoreo preliminar que permita evaluar en tiempo real su condición fitosanitaria. Durante este vuelo, se identifican los límites del terreno, sobre los cuales se ejecuta un recorrido adicional para generar un polígono de referencia que servirá como guía en la programación del plan de vuelo automático.

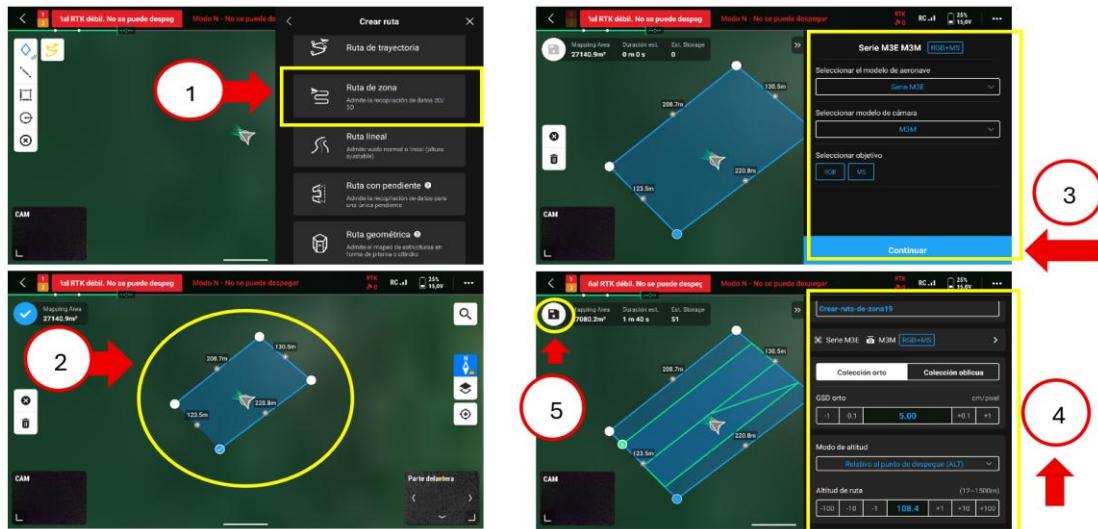


Figura 6. En el apartado vista de cámara, pulsamos el ícono de biblioteca (izquierda superior), le damos al símbolo '+' y seleccionamos 'ruta de zona', dibujamos un polígono sobre la línea que se genera al realizar un vuelo sobre los límites de la parcela; finalmente se establecen los parámetros de vuelo como altitud, velocidad, superposición, etc.

Tabla 2. Parámetros y valores recomendados para el vuelo

| Parámetro | Valor recomendado |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Altitud | 35–50 m |
| Traslape longitudinal y transversal | 70 % |
| Velocidad | 3–5 m/s |
| Hora ideal | 10:00–14:00 h |
| Condición | Cielo despejado o nubosidad uniforme |

9. Ejecución del vuelo en campo

9.1. Vinculación con la Estación D-RTK 2

1. Colocar la estación en un punto despejado y estable.
2. Encender la D-RTK 2 y el drone.
3. En DJI Pilot 2, abrir “RTK” → “Tipo de fuente” → seleccionar D-RTK 2 móvil.
4. Esperar sincronización (ícono verde indica corrección activa).
5. Calibración Radiométrica
6. Colocar el panel radiométrico DJI en una zona plana e iluminada.
7. Capturar una imagen antes y otra después del vuelo (ángulo perpendicular, 1 m de altura).
8. Registrar en la bitácora: hora, temperatura, condiciones de luz y coordenadas.



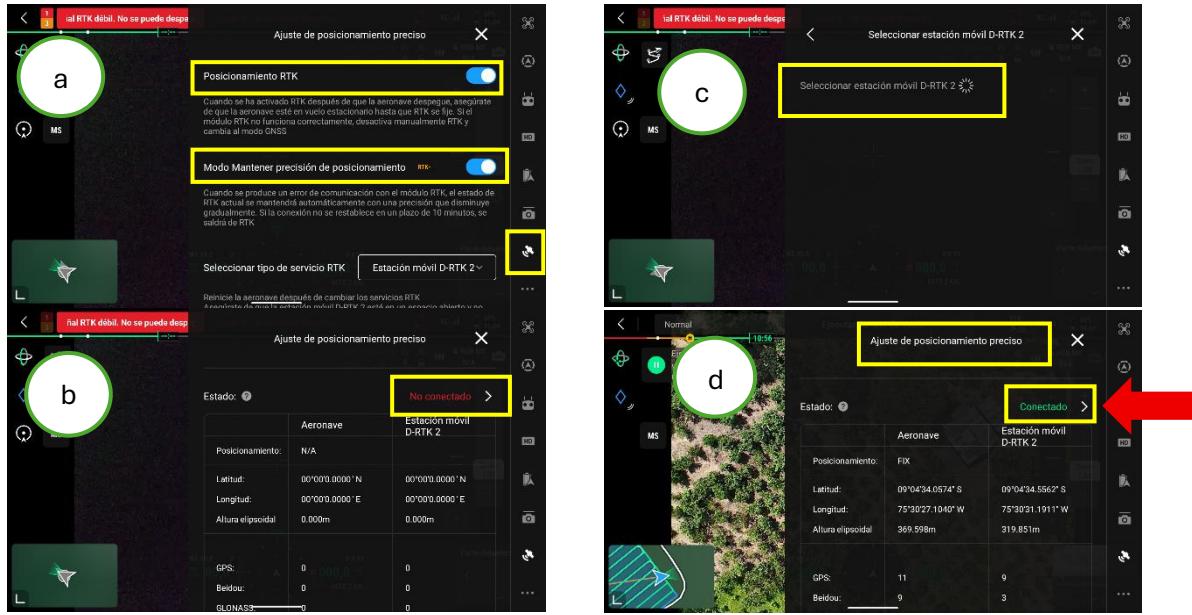


Figura 7. Proceso de conexión entre el drone DJI MAVIC 3M y estación móvil D-RTK 2

10. Toma de fotografía del panel de calibración



Figura 8. Tomar una foto del panel de calibración antes de iniciar el vuelo y otra al finalizar, para asegurar la correcta georreferenciación y la precisión de los datos obtenidos durante la misión.

11. Procesamiento de datos

Las imágenes se procesan en Agisoft Metashape, Pix4DFields o Arc Gis pro aplicando corrección radiométrica, puntos RTK y generación de ortomosaicos multiespectrales. Se calculan índices como NDVI, NDRE, GNDVI y SAVI.

11.1. Organización de las fotos en carpetas

Se descargará las imágenes del microSD del drone hacia la computadora y se organizará de la siguiente manera:

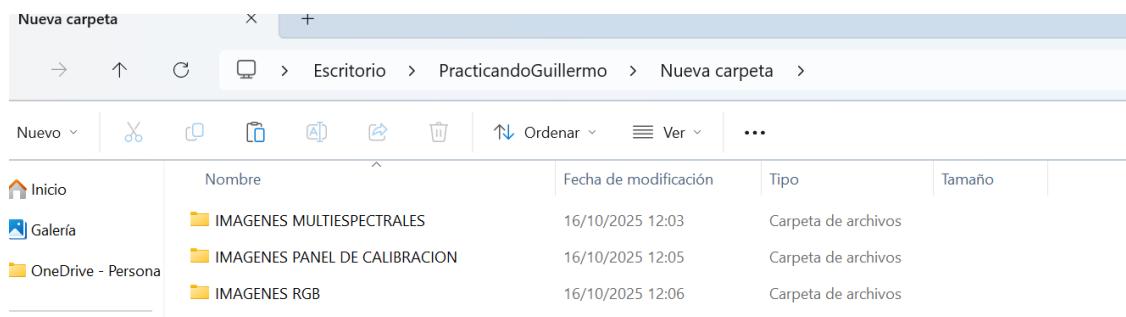


Figura 9. Organización de imágenes en carpetas.

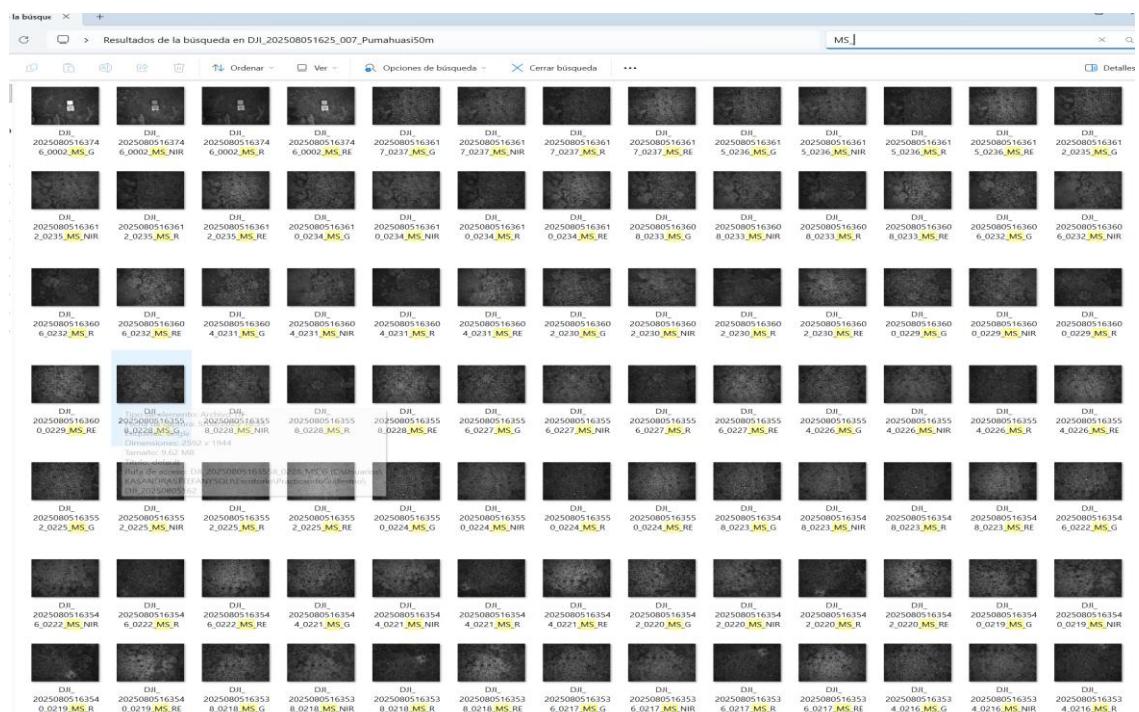


Figura 10. Antes del procesamiento en el programa Agisoft Metashape, se deben ordenar únicamente las imágenes multiespectrales, si es necesario, en una sola carpeta.

11.2. Procesamiento de las imágenes en Agisoft Metashape

Se recomienda procesar las imágenes de manera separada es decir primero las imágenes multiespectrales y luego las imágenes RGB, de acuerdo al siguiente flujo:

1. En Flujo de Trabajo → Añadir carpetas → Multicámara (Multiespectrales)
2. En Flujo de Trabajo → Orientar fotos – Alta → Verificar si todo está orientado
(De no ser así eliminar imágenes no orientadas o repetir la orientación)
3. En Flujo de Trabajo → Crear Nube de Puntos – Alta
4. Herramientas → Nube de Puntos → Clasificar puntos del terreno → Cualquier clase (por defecto)
5. Herramientas → Nube de Puntos → Filtrar por clases → Solo seleccionar Terreno → Eliminar datos extraños (Seleccionar puntos alejados y eliminar)
6. En Flujo de Trabajo → Crear DEM → En Clases de puntos → Terreno → Definir el sistema de coordenadas del estudio
7. En Flujo de Trabajo → Crear Ortomosaico
8. Parar Calcular índices → En la paleta de colores o bandas → Ingresar fórmula

Cada uno de estos pasos del flujo se describen gráficamente en las Figuras del 11 al 33.

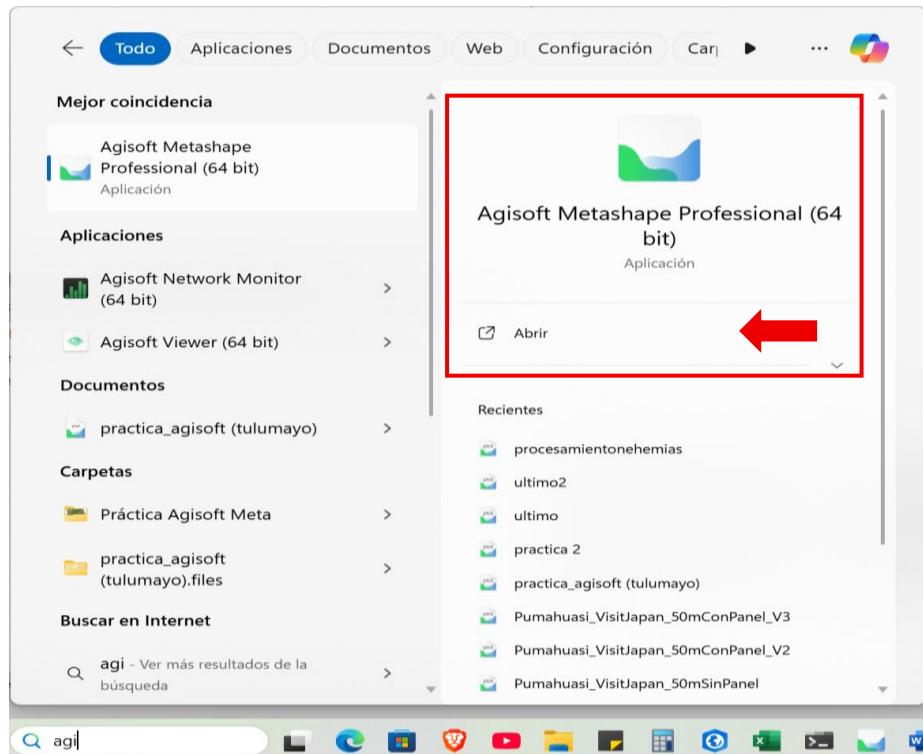


Figura 11. Abrir Agisoft Metashape.

Procesamiento de imágenes multiespectrales

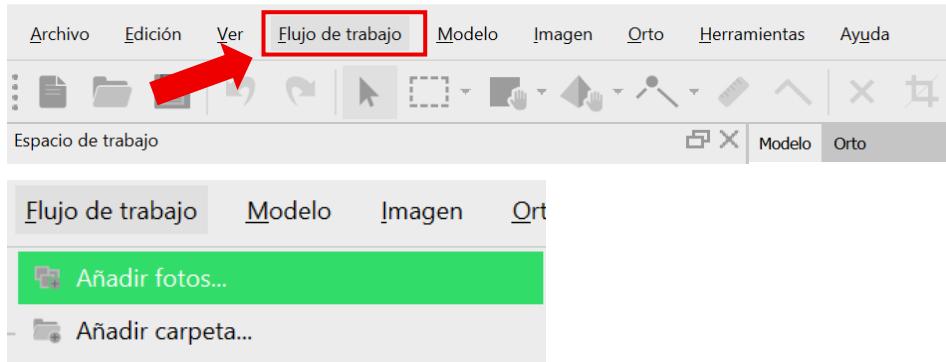


Figura 12. Seleccionar flujo de trabajo y Añadir fotos y/o carpeta

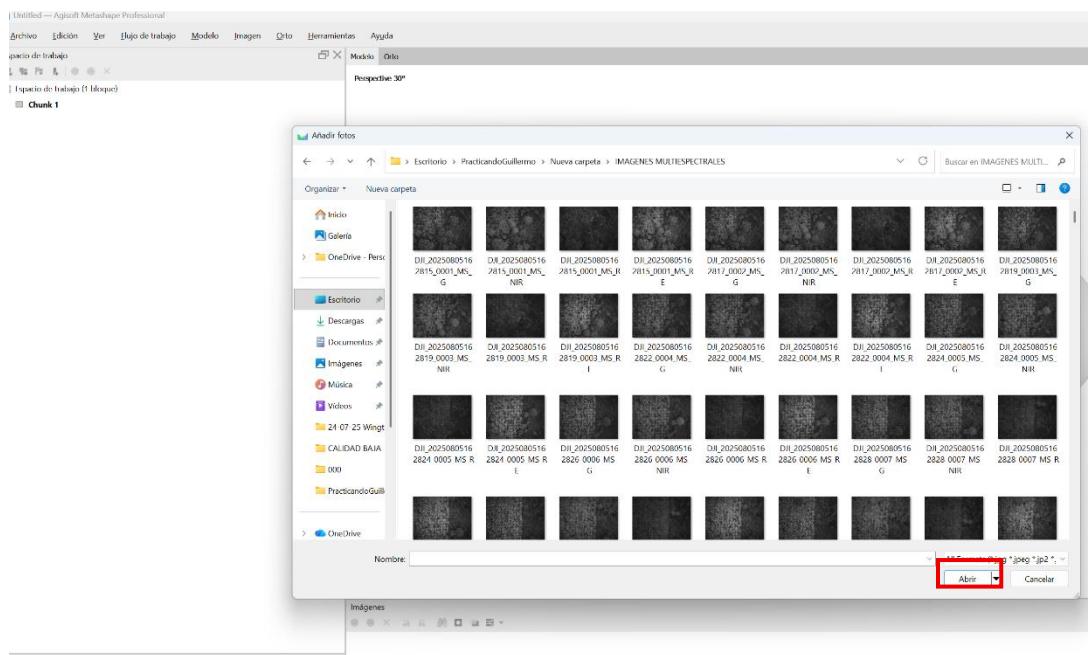


Figura 13. Cargar las fotos Multiespectrales > Abrir.

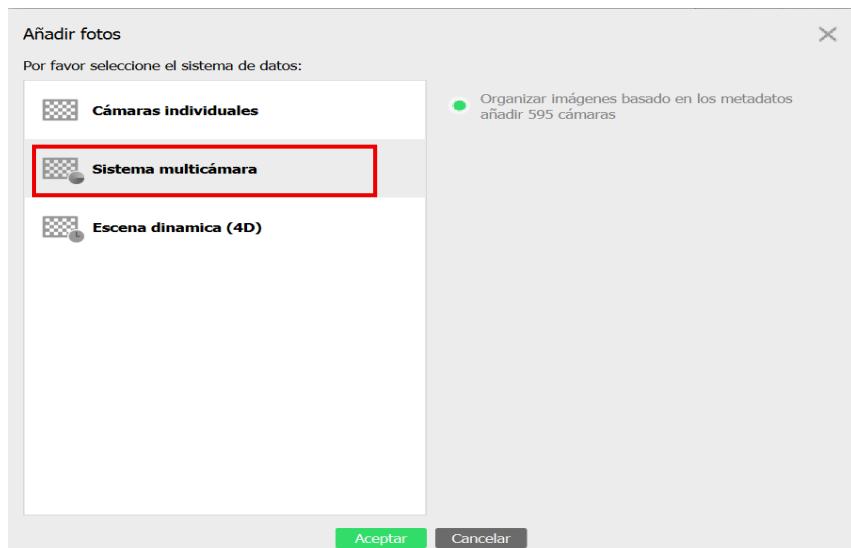


Figura 14. Selecciona Sistema Multicámara > Aceptar.

Realizar la corrección radiométrica

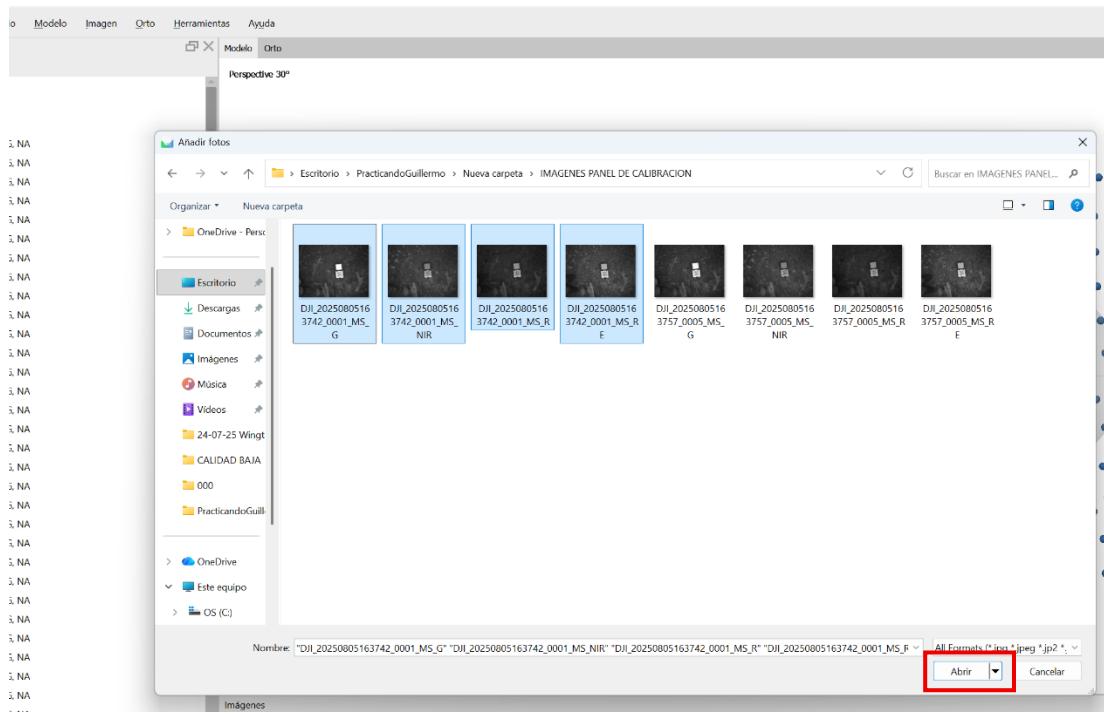


Figura 15. A continuación, se cargan las imágenes de calibración y se realiza el proceso en el programa

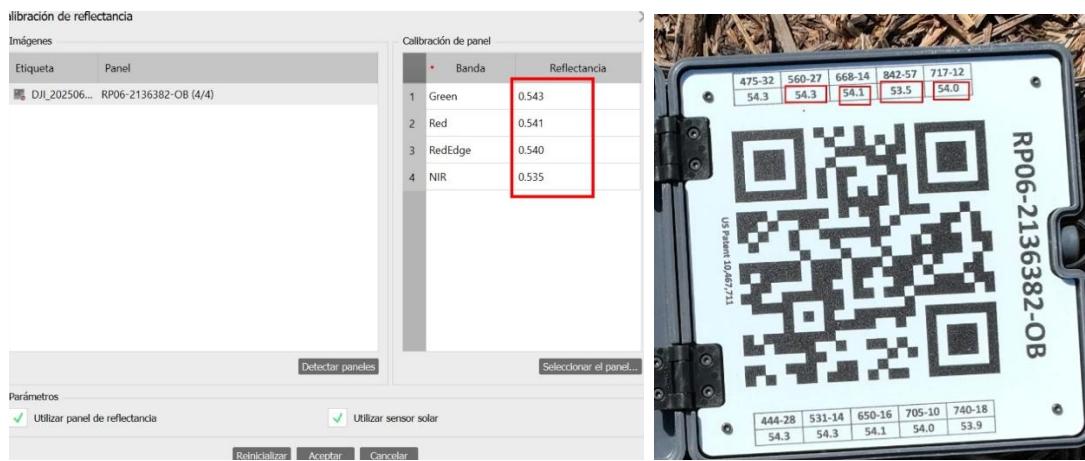


Figura 16. Ingresar de manera manual los valores de reflectancia de cada banda de acuerdo con el panel de calibración.

Procesamiento de imágenes RGB

Se seguirá los mismos pasos descritos anteriormente

Poner solo las fotos RGB a una carpeta RGB y procesarla

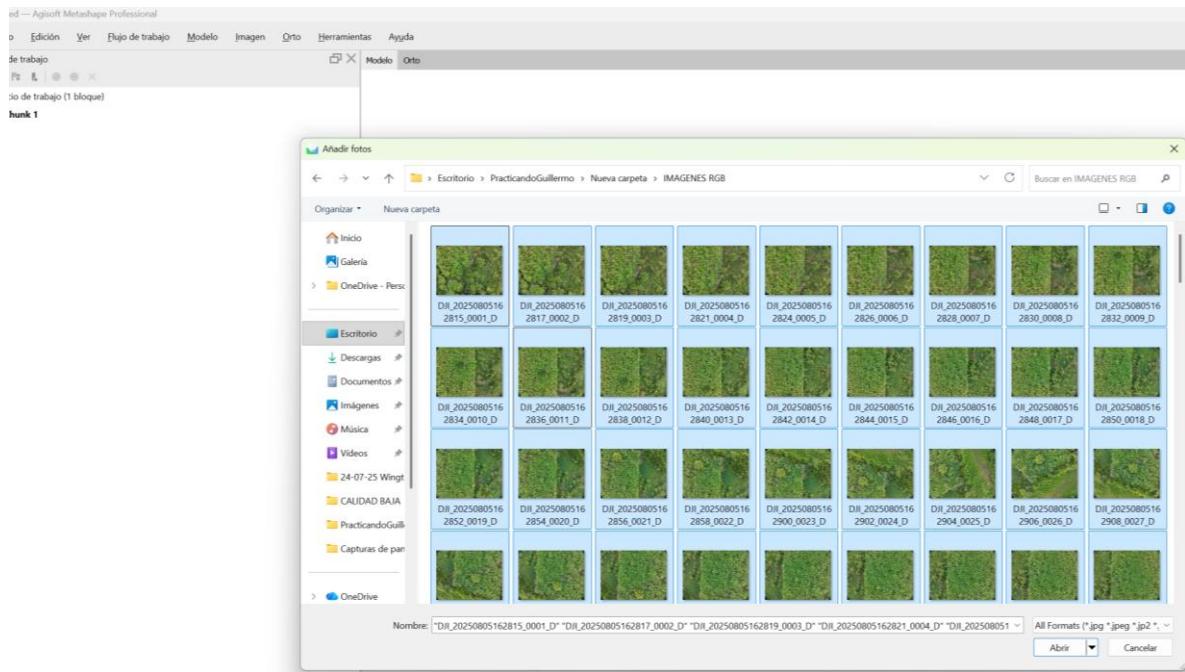


Figura 17. Continuamos con el procesamiento de imágenes RGB, cargadas en la ruta correspondiente.

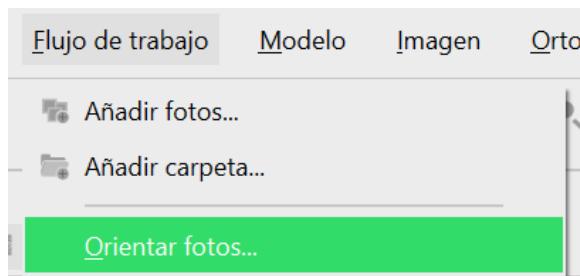


Figura 18. Seleccionar Flujo de trabajo > haz clic en Orientar fotos

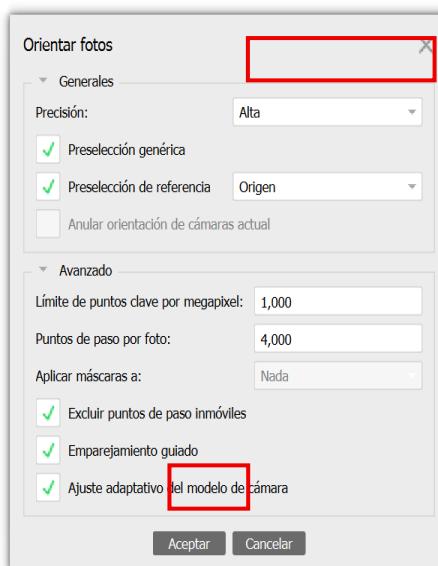


Figura 19. Selecciona el tipo de Precisión (Máxima, Alta, Media, Baja, Mínima). Si tienes una gran cantidad de imágenes y poder computacional, se recomienda seleccionar una de las opciones más altas para obtener más precisión, Y Aceptar.

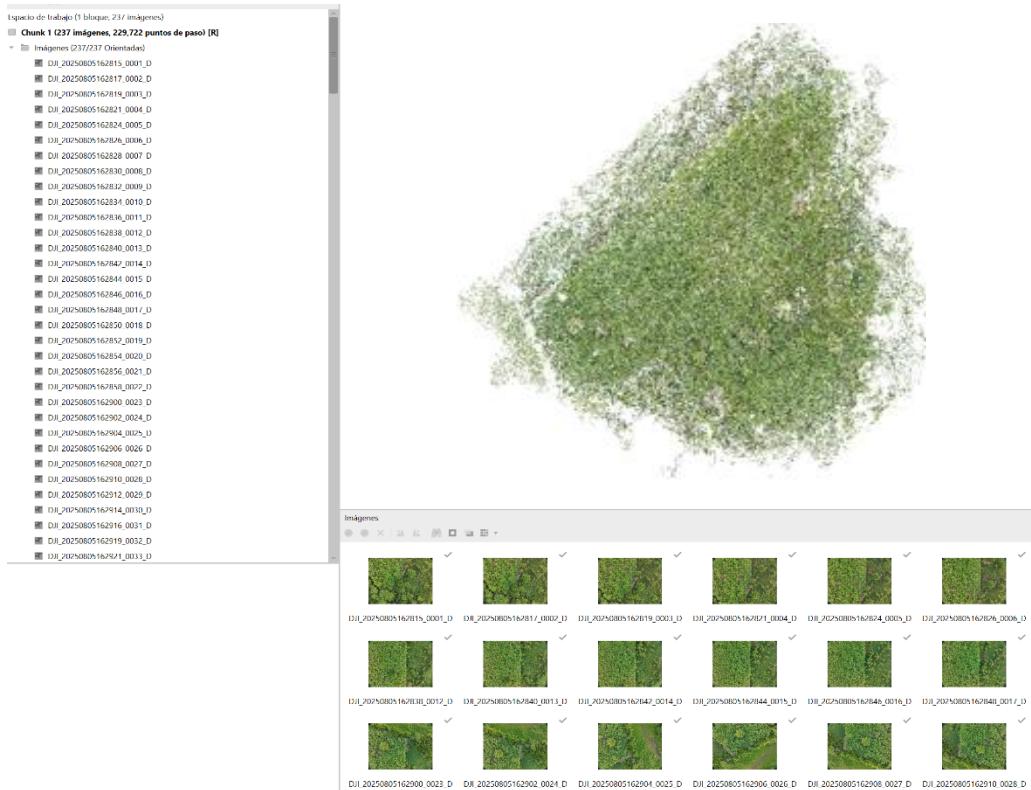


Figura 20. Imágenes orientadas.

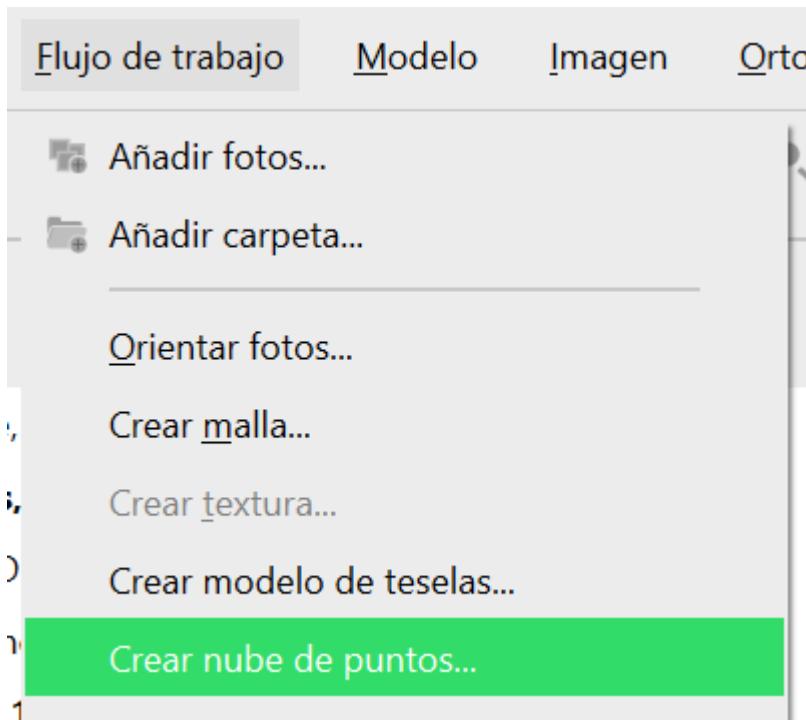


Figura 21. A continuación, creamos la nube de puntos (Seleccionar Flujo de trabajo > haz clic en Crear nube de puntos).

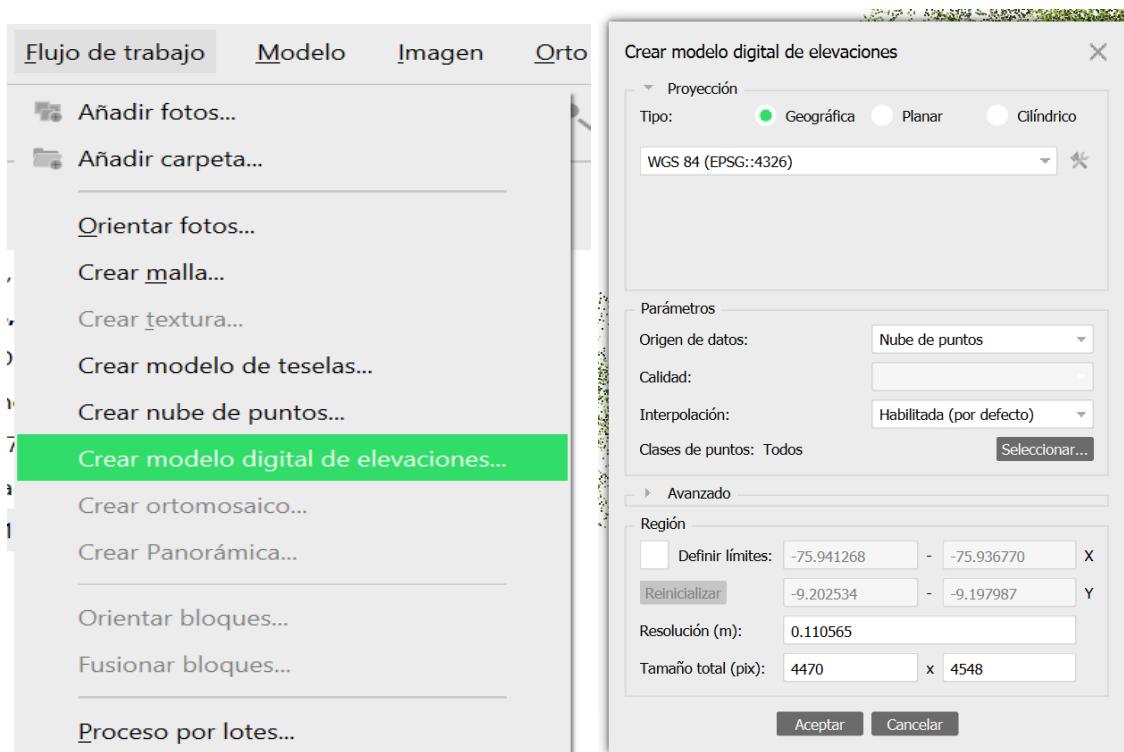


Figura 22. A continuación Seleccionar Flujo de trabajo > haz clic en Crear modelo digital de elevaciones y Aceptar.

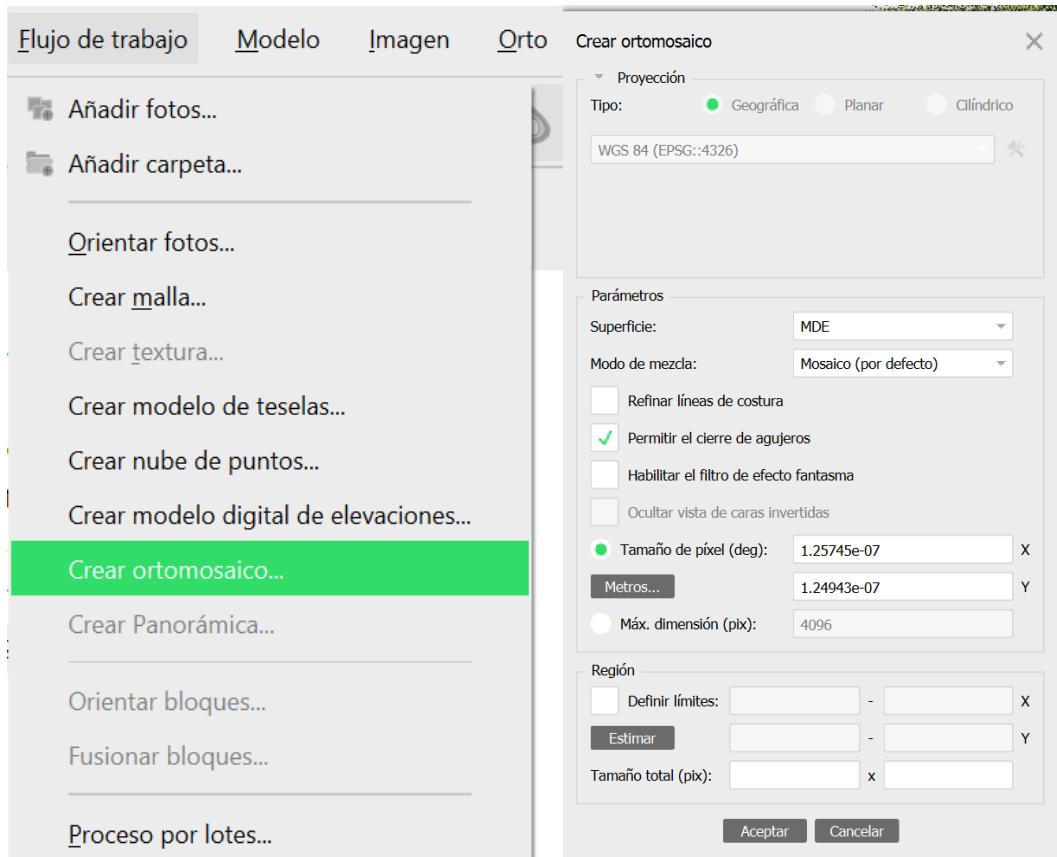


Figura 23. Seleccionar Flujo de trabajo > haz clic en Crear Ortomosaico y Aceptar.

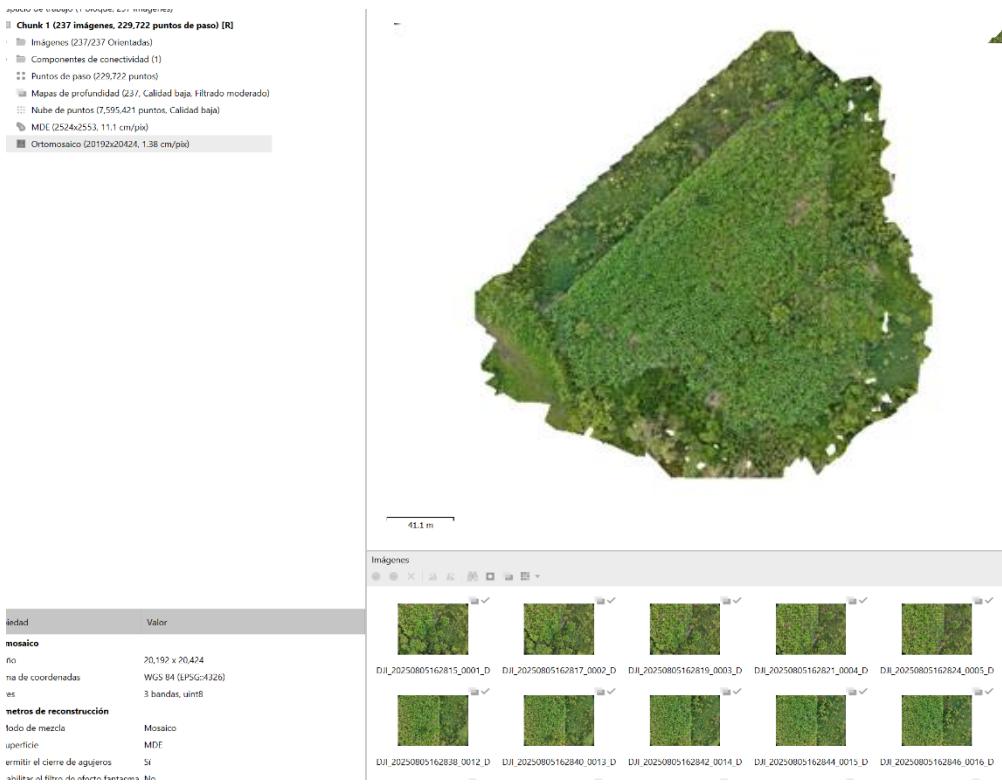


Figura 24. Obtención del Ortomosaico

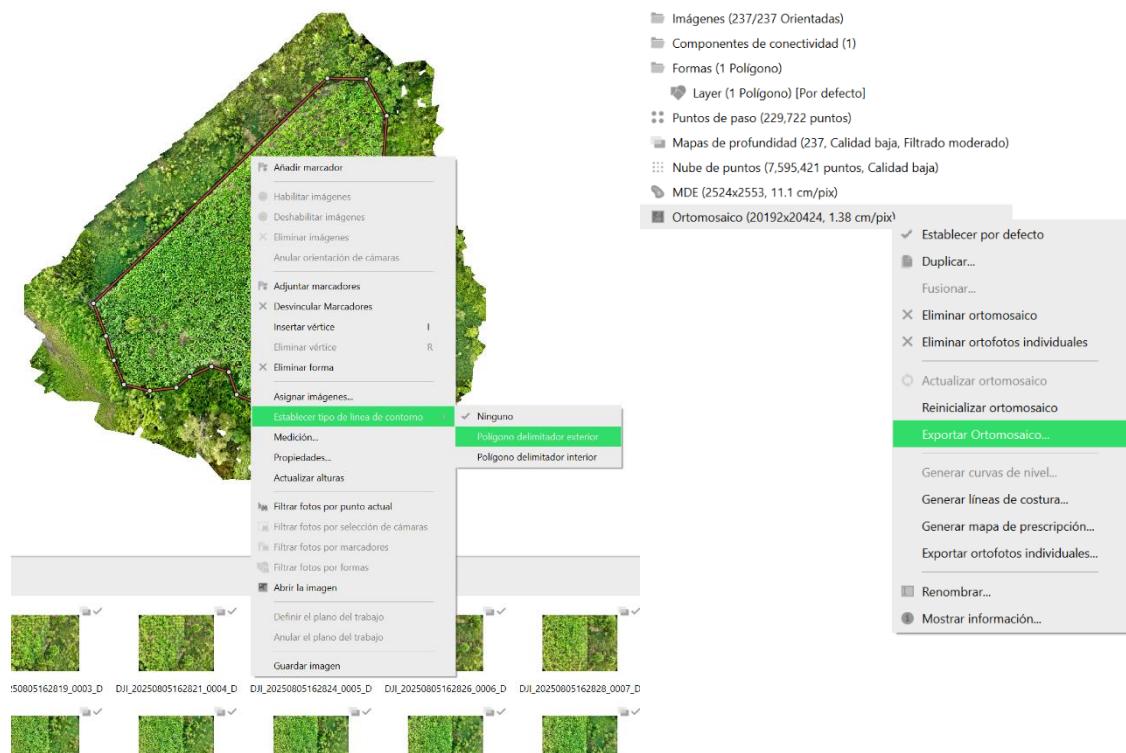


Figura 25. Paso final, delimitación el área de interés mediante un polígono en Agisoft Metashape, el Ortomosaico recortado se exporta ArcGIS Pro.

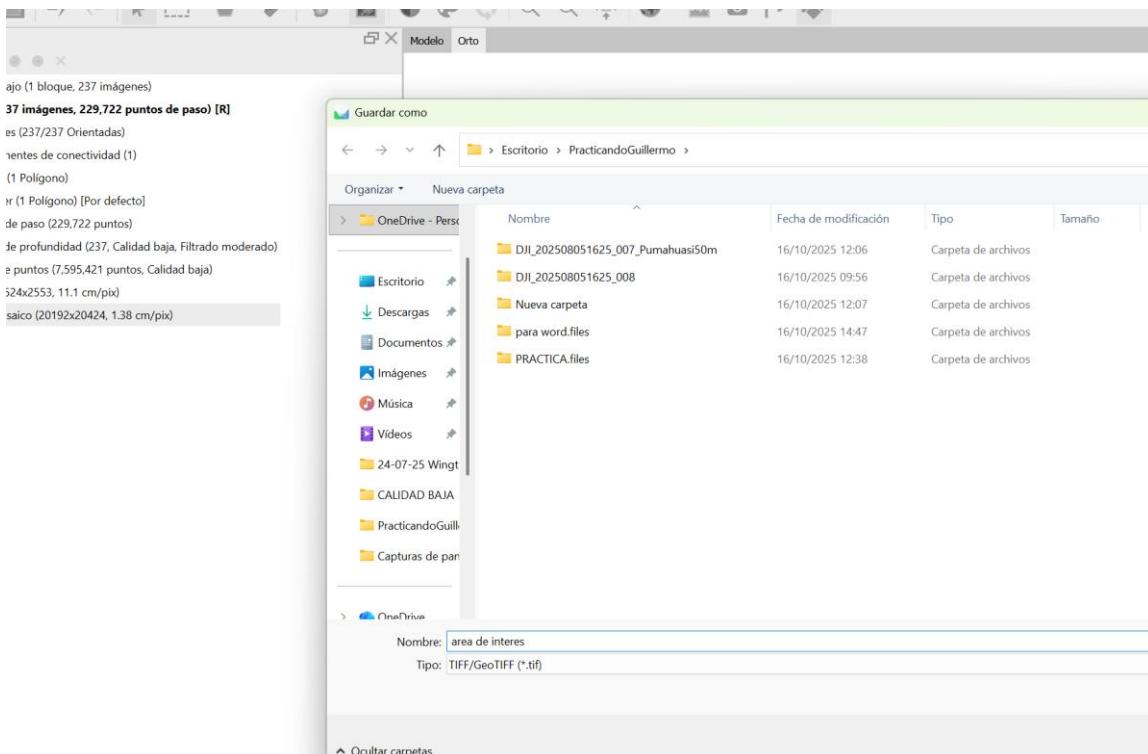


Figura 26. Exportación del Ortomosaico

Cálculo de índices de vegetación

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador que mide la salud y el vigor de la vegetación utilizando datos de reflectancia en las bandas del rojo (RED) y del infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético.

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

$$CI_{Green} = \frac{NIR}{Green} - 1$$

$$CI_{RE} = \frac{NIR}{RedEdge} - 1$$

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

Figura 27. Diferentes fórmulas de índices de vegetación con los cuales se puede trabajar.

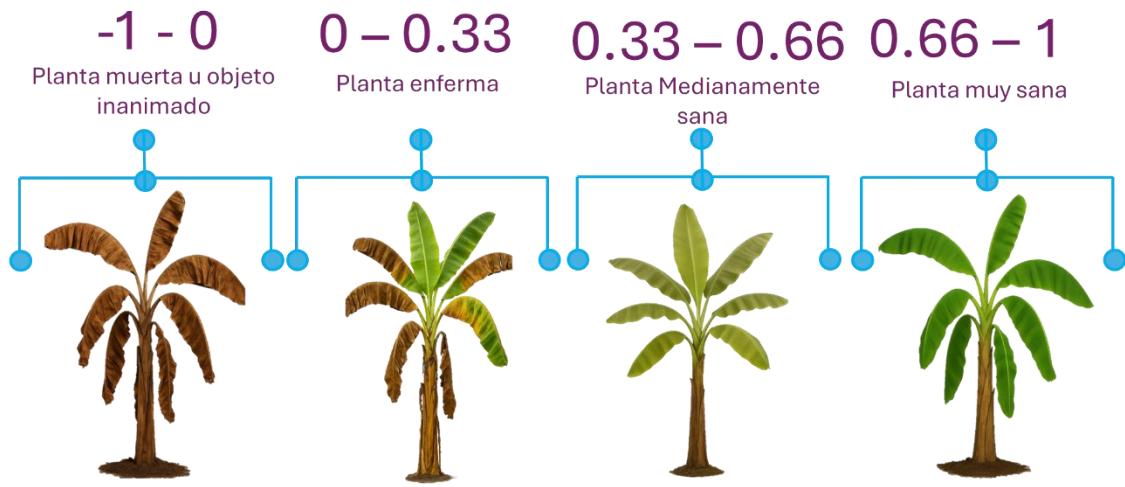
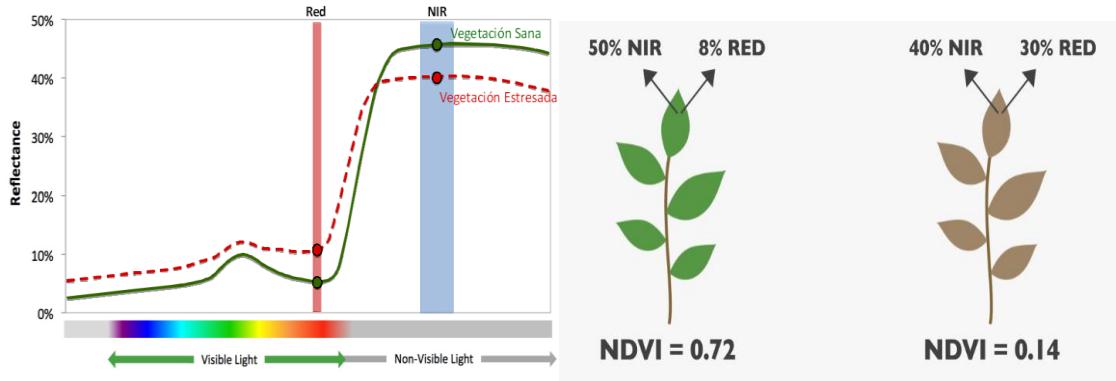


Figura 28. Relación entre evolución de síntomas y cambios en índices espectrales (NDVI/NDRE).

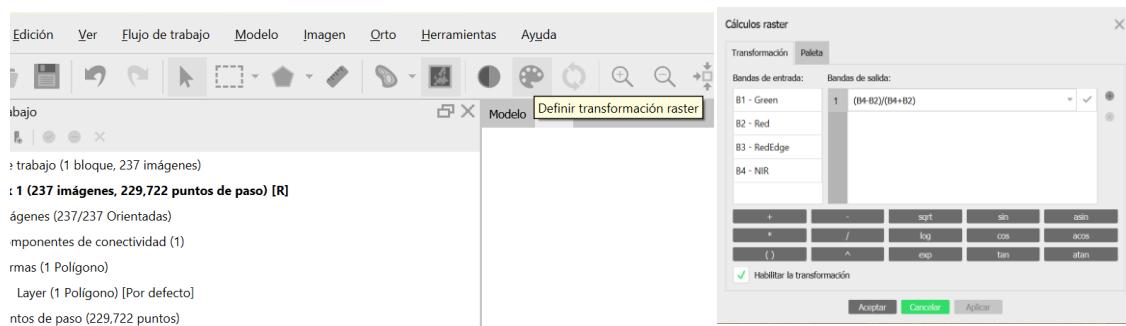


Figura 29. En la opción “Definir raster” podemos definir la formula NDVI y ejecutarla.

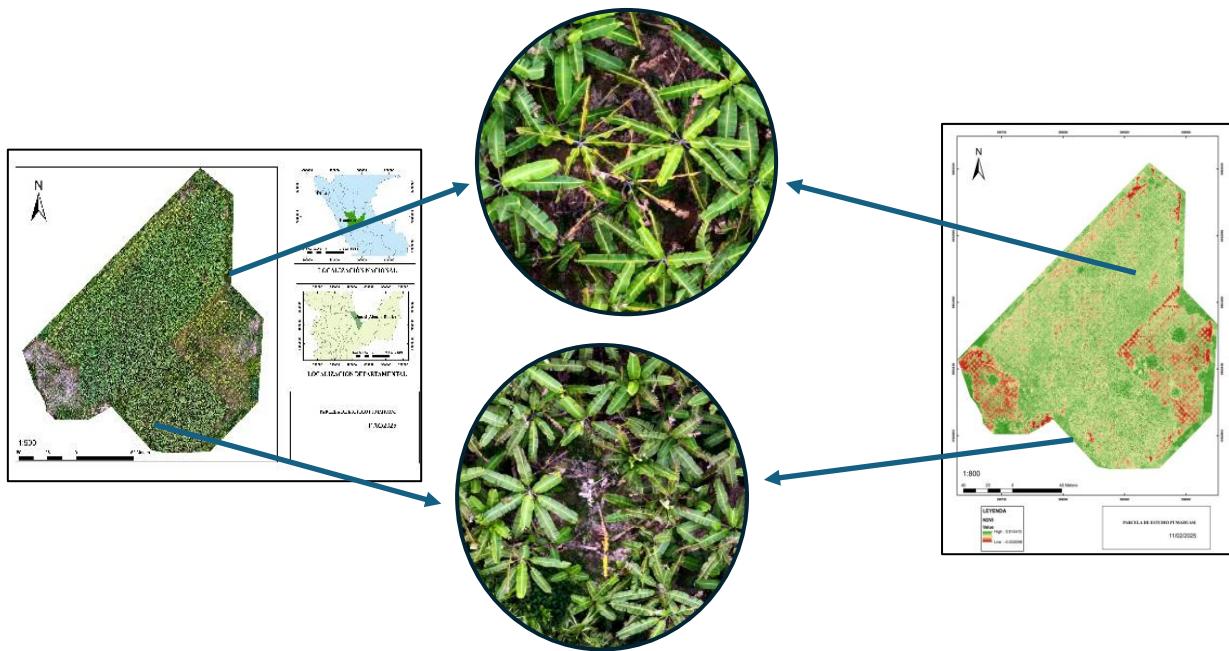


Figura 30. Reconocimiento de focos de infección por Foc, posterior a la producción de mapas y su análisis en un programa GIS.

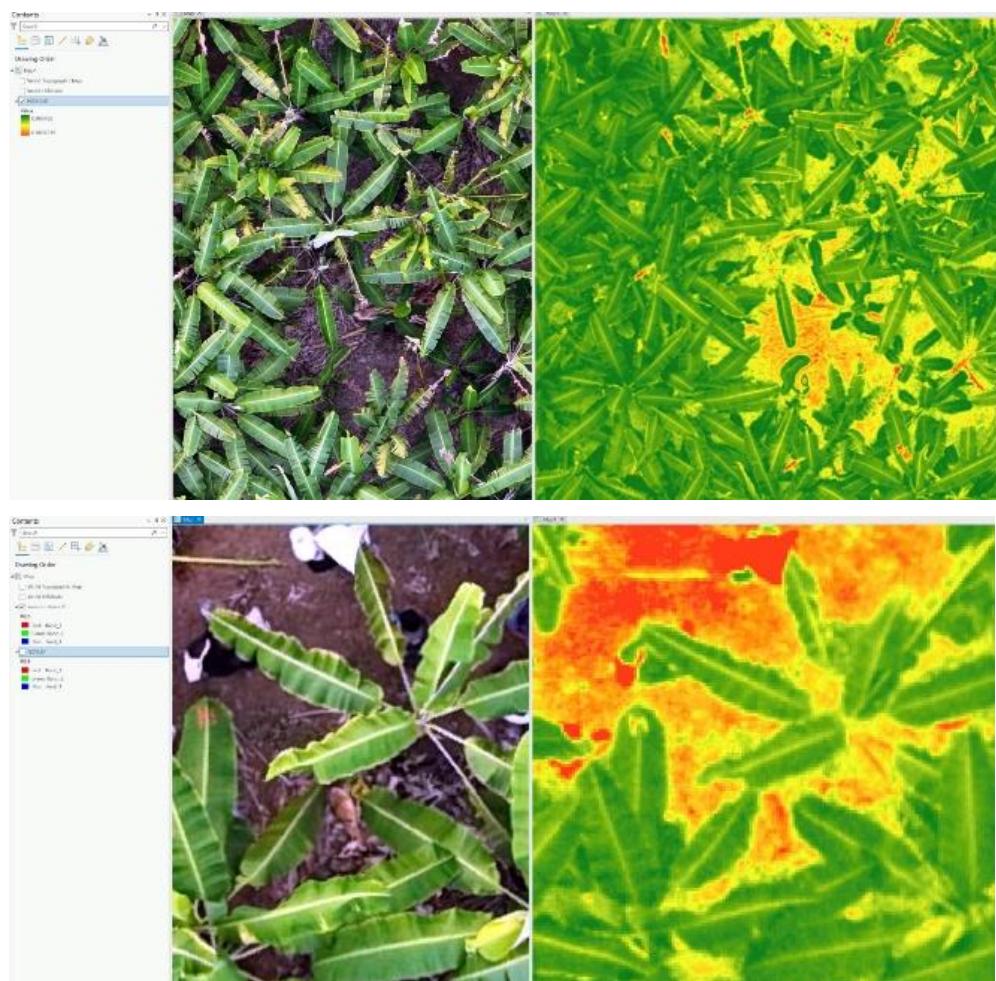


Figura 31. Comparación de valores NDVI entre plantas sanas e infectadas.

Como se visualiza en la Figura 32, se determina como casos de Foc por los síntomas característicos de la enfermedad, clorosis, marchitez de las hojas bajas o más viejas y hoja bandera aparentemente sana. Además, confirmamos estos casos con el análisis e interpretación del índice de vegetación (NDVI).

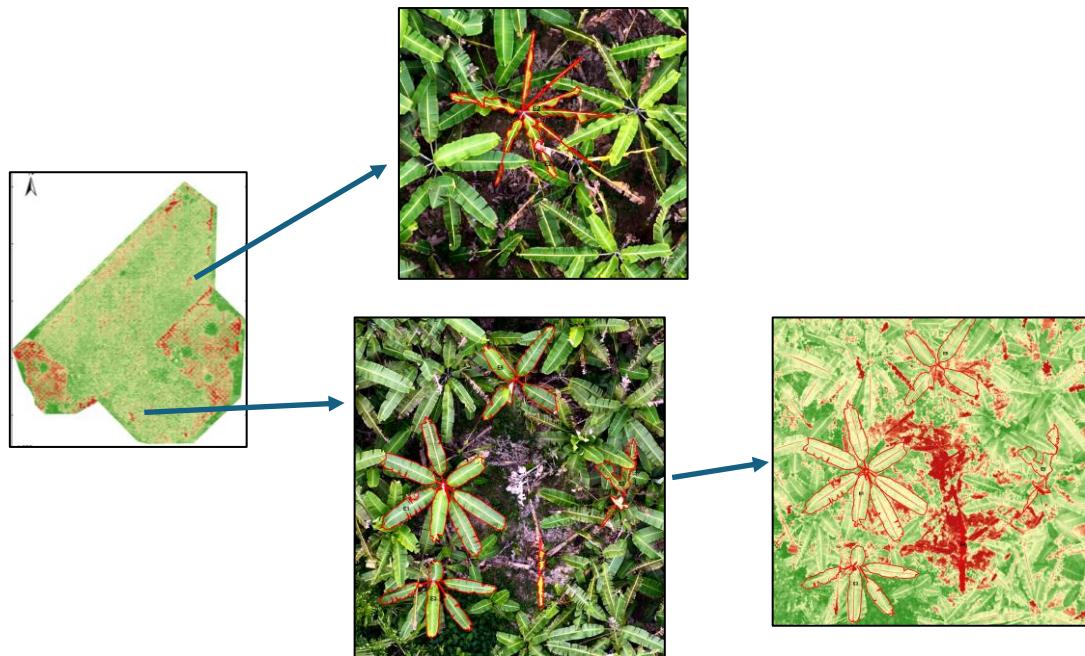


Figura 32. Delimitación y reconocimiento de cada planta que presenta la sintomatología de Foc a través de los índices de vegetación.

Se consideran como plantas posiblemente infectadas por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) aquellas que presentan un aclaramiento progresivo del follaje, con tonalidades verde pálido a amarillentas y una marcada coloración rojiza en la nervadura central, incluso antes de manifestar síntomas visibles de marchitez en campo. En estados más avanzados, estas coloraciones se intensifican y se distribuyen de manera más generalizada en la planta.

Asimismo, se realiza un ajuste en la escala cromática del mapa del índice de vegetación (NDVI), con el propósito de resaltar de manera más evidente las diferencias de coloración entre plantas sanas y aquellas con indicios de infección.

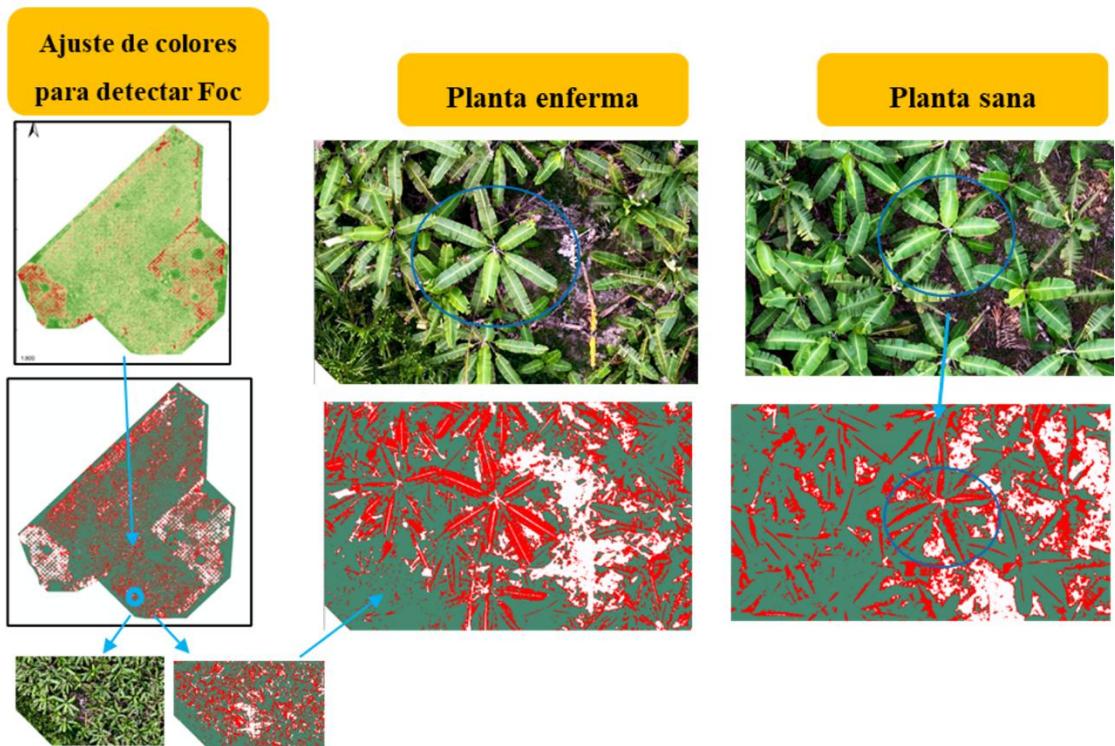


Figura 33. Proceso de ajuste de coloración a fin de generar un mayor contraste entre planta enferma y planta sana.

12. Análisis e interpretación

En las parcelas monitoreadas, las plantas que presenten valores de NDVI inferiores a 0.33 se consideran sospechosas de infección por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc). Para confirmar o descartar dicha sospecha, se realizará una inspección de campo con diagnóstico visual detallado. De cada planta sospechosa se colectarán muestras de tejido afectado, las cuales serán trasladadas al laboratorio para la detección e identificación de *Foc* y la determinación de su raza, mediante la técnica de LAMP o a través del aislamiento previo del patógeno en medio Nishimura.



Figura 34. Identificación de Foc mediante la técnica LAMP en plantas sospechosas identificadas mediante análisis de imágenes multiespectrales.



Figura 35. Identificación de Foc mediante aislamiento en medio Nishimura y técnica LAMP en plantas sospechosas identificadas mediante análisis de imágenes multiespectrales.

13. Productos finales

Se considera una planta como sospechosa de infección por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) cuando presenta valores de NDVI inferiores a 0.33; no obstante, dichos umbrales se encuentran en proceso de validación. Se clasifican también como sospechosas aquellas plantas en las que, tras dos vuelos consecutivos, se descartan otras posibles causas de estrés, tales como deficiencias nutricionales, problemas de humedad del suelo, daños por barrenadores del pseudotallo o infecciones bacterianas. Los resultados esperados incluyen la generación de mapas de NDVI y NDRE, la representación geoespacial de la distribución de Foc y el análisis de correlación entre los índices espectrales y los resultados obtenidos mediante la técnica LAMP.

14. Referencias

- Ye, H. et al. (2020). Remote sensing detection of *Fusarium* wilt in banana using multispectral UAV data. *Remote Sensing*, 12(14), 2308.
- Dita, M. et al. (2018). *Fusarium* wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9:1468.
- Li, W. et al. (2022). Early diagnosis of *Fusarium* wilt in banana based on spectral indices derived from UAV multispectral imagery. *Precision Agriculture*, 23, 122–137.
- DJI. (2023). Manual del usuario del DJI Mavic 3 Multispectral. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20230303/DJI_Mavic_3M_User_Manual_ES.pdf

