

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TESIS DE MAESTRÍA

**Análisis de imágenes multiespectrales de
sembrados de caña de azúcar adquiridas con
vehículos aéreos no tripulados**

Autor: Ing. Samy Kharuf Gutierrez.

Tutor: Dr. Luis Hernández Santana.

Tutor: Dr. Osmany de la C. Aday Díaz.

Santa Clara

2018

"Año 60 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TESIS DE MAESTRÍA

Análisis de imágenes multiespectrales de sembrados de caña de azúcar adquiridas con vehículos aéreos no tripulados

Autor: Ing. Samy Kharuf Gutierrez.

kharuf@uclv.cu

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, FIE, UCLV

Tutor: Dr. Luis Hernández Santana

luish@uclv.edu.cu

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, FIE, UCLV

Dr. Osmany de la C. Aday Díaz

osmany.adad@inicavc.azcuba.cu

Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Santa Clara Cuba

Santa Clara

2018

"Año 60 de la Revolución"



Hago constar que la presente tesis de maestría fue realizada en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la maestría en Automática, autorizando a que la misma sea utilizada por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentada en eventos, ni publicada sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Dios no juega a los dados”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Al Dios de la vida.

A la Santísima Virgen María que siempre me carga en sus brazos.

A San Judas Tadeo, mi último refugio en la adversidad.

A mi madre que ha sido mi motor en la vida.

A mi padre que desde la distancia siempre he sentido su calor.

A mi hermana que es el miembro más importante de mi tribu.

A esas joyas que son mis amigos, ellos saben quiénes son y yo quienes son ellos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de varios años de esfuerzo, compaginando la docencia y otras responsabilidades, en una temática inicialmente desconocida para mí, pero a la vez apasionante y absorbente. Agradezco primeramente a mi tutor Luis Hernández, que tuvo el valor y la visión de confiar en mí para iniciar el trabajo del departamento de Automática en la Agricultura de Precisión mediante VANT.

Durante todo el proceso de “hacer ciencia”, múltiples manos se extendieron hacia mi persona para alentarme y apoyarme, a ellos van estas palabras.

A Pablo José Prieto Entenza (mi primer y eterno tutor) gracias, por siempre; porque muchas veces encontraba puños cerrados y tu mano siempre estuvo extendida para rescatar a este Pedro cabezón.

A mis amigos desparramados por el mundo (Homero, Anaylis, Carreño, Carlos, Sergio, Osvaldo, Aliuska, Anaibis, Yurisán, Roilan, Alexander, Aparicio); son inolvidables los momentos vividos y Uds unos de mis mayores tesoros.

A Yunier Valeriano agradezco su continua disposición y tiempo para mis innumerables dudas metodológicas (a pesar de su apretadísima agenda), nunca he oído en boca de Valeriano un “ahora no puedo”. A Richard Sosa le agradezco las tantas veces que se tiró conmigo PA LA TRINCHERA, su aliento nunca faltó en los momentos que todo se oscurecía. A Oscar, “el hombre de las barricadas”, mil gracias por siempre tenerme abierta su puerta.

A mi amiga INCONDICIONAL (familia postiza ya), Ailet Abreu y su esposo Jorge, su casa se convirtió en mi refugio y su saber ayudó a mejorar este humilde trabajo. Al profe Abreu, ha sido un honor aprender de Usted, creo que nuestro departamento no tiene mejor

ejemplo de profesional íntegro; Dios permita que en mi futuro académico pueda al menos ser su reflejo.

A los profesores Rubén Orozco, Marlen Pérez y Alan Martínez por todas las recomendaciones (sobre todo estadísticas) para mejorar este humilde trabajo.

A la Dra Emma Pineda Ruiz (la profe), por recibirme y compartir su saber con su calidez de madre y científica.

A los colegas Dr. Osmany de la C. Aday Díaz e Irenaldo Delgado Mora, de la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar, por los datos suministrados que facilitaron la pesquisa y el soporte de laboratorio para esta investigación.

Por último y más especial a mis padres, hermana, y tía, no hay palabras para reflejar lo que siempre han representado para mí en buenos y malos momentos.

A todo aquel que de una manera u otra contribuyó en mi formación, muchas gracias.

Samy

Santa Clara, 2018

RESUMEN

En la última década, el perfeccionamiento de los sensores remotos ha potenciado el progreso de la agricultura de precisión (AP). La misma es un concepto agronómico de gestión de parcelas, que hace uso de la variabilidad espacial y temporal en los sembrados, utilizando múltiples tecnologías en conjunto con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Entre las herramientas que emplea la AP está la fotogrametría multiespectral, la cual posibilita realizar el cálculo de los índices vegetativos, que permiten obtener de forma rápida y altamente fiable una amplia información de los cultivos.

En este trabajo se desarrollan procedimientos para la toma y procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas, basados en vehículos aéreos no tripulados (VANT); con el fin de obtener índices vegetativos que se correlacionen con parámetros vitales para la agricultura cañera tales como la densidad, vigor vegetal, nivel de madurez y aprovechamiento de los fertilizantes aplicados.

En este trabajo se utiliza el VANT 3DR RTF X8+, una cámara multiespectral Parrot Sequoia y los software Pix4D Mapper Pro, Agisoft Photoscan y QGIS. Se evaluaron los resultados obtenidos con los tres software anteriormente mencionados, estableciéndose una comparación en cuanto a su facilidad de uso, tiempo de procesamiento, calidad visual del producto y costo de la licencia.

ABSTRACT

The improvement of remote sensors has upgraded an evident progress in precision agriculture (PA), which is an agronomic concept in the proper management of parcels that make use of the spatial and temporal variability in the plantations using multiple technologies altogether with the Geography Information Systems (GIS).

Among the tools used by AP multispectral photometry which facilitates to calculate vegetative indexes, that permits to obtain a in a fast and reliable way, an extend information about the plantations.

In these research work different procedures are developed for taking and processing aerial multispectral images based on aerial vehicles run without human service; with the aim of obtaining vegetative indexes that are correlated with vital parameters for sugar cane agriculture such as density, plant vigor, matureness and exploitation levels of the applied fertilizers.

VANT 3DR RTF X8+, a Parrot Sequoia multispectral camera and Pix4D Mapper Pro, Agisoft Photoscan and QGIS are used in this research work. The obtained results were evaluated with the softwares mentioned previously, establishing a comparison in use facility, processing time, visual quality of the product and license cost.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	5
CAPÍTULO 1. FOTOGRAMETRÍA MULTIESPECTRAL AÉREA PARA EL DIAGNÓSTICO DE ÁREAS AGRÍCOLAS	6
1.1 Agricultura de precisión	6
1.2 Teledetección	7
1.3 Firma espectral	9
1.4 Características de las imágenes	10
1.5 Herramientas para la toma de imágenes	11
1.6 Procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas	15
1.7 Índice Normalizado Diferencial de Vegetación	16
1.8 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde	19
1.9 Software para el procesamiento de imágenes NIR e IR aéreas con vistas a calcular los índices de vegetación	21
1.10 Consideraciones finales del capítulo	26

CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS PARA LA CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	28
2.1 Vehículo aéreo no tripulado 3DR RTF X8+	28
2.2 Cámara multiespectral.....	29
2.2.1 Características del sensor Sequoia	30
2.2.2 Sensor de luz	30
2.2.3 Módulo GPS	31
2.2.4 Unidad de Medición Inercial (IMU)	31
2.2.5 Magnetómetro	31
2.2.6 Configuración del sensor. Montaje en el VANT	32
2.2.7 Activación de la cámara.....	32
2.3 GPS	33
2.3.1 Obtención de los GCP.....	33
2.4 Software para la planificación del vuelo y el procesamiento de las imágenes 34	
2.5 Agisoft Photoscan	35
2.5.1 Flujo de trabajo con Agisoft PhotoScan	35
2.5.2 Cálculo de índices vegetativos.....	39
2.5.3 Procesamiento en red	40
2.5.4 Configuración del clúster para procesar en red mediante Agisoft Photoscan	40
2.6 QGIS + SAGA ToolBox	42
2.6.1 Flujo de trabajo para el cálculo de índices vegetativos con QGIS	43
2.7 Pix4D.....	45
2.7.1 Flujo de trabajo con Pix4D	45

2.7.2	Uso de la barra de menú rayCloud para mediciones de distancias, áreas y volúmenes	47
2.7.3	Cálculo de índices vegetativos.....	48
2.8	Procedimiento general para la toma y procesamiento de imágenes aéreas NIR e IR con vistas a calcular índices vegetativos	49
2.8.1	Diseño del Plan de Vuelo.....	49
2.8.2	Apoyo Topográfico.....	50
2.8.3	Toma Fotográfica.....	50
2.8.4	Procesamiento de las Imágenes Multiespectrales	51
2.8.5	Cálculo de Índices Vegetativos.....	51
2.9	Consideraciones finales del capítulo	51
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA Y EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES		53
3.1	Zona de estudio	53
3.1.1	Características del experimento de variedades VCV-1-05	54
3.1.2	Características del experimento de nitrógeno VmNn-18.....	55
3.2	Procedimiento efectuado para la recolección y procesamiento de las imágenes multiespectrales de los campos de caña de la ETICA	56
3.3	Procesamiento de las imágenes del experimento de variedades VCV-1-05	57
3.3.1	Análisis de resultados del experimento de variedades VCV-1-05	58
3.3.2	Georreferenciación de los ortomosaicos.....	61
3.3.3	Mediciones de distancias, áreas y volúmenes.....	63
3.4	Conclusiones del capítulo	64
CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS AGRÍCOLA MEDIANTE LOS ÍNDICES VEGETATIVOS		65

4.1	Cálculo de los índices vegetativos del experimento de variedades VCV-1-05	65
4.1.2	Discriminación de variedades mediante los mapas de índices en el experimento VCV-1-05	69
4.2	Cálculo de los índices vegetativos del experimento de nitrógeno VmNn-1871	
4.3	Conclusiones del capítulo	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		78
Conclusiones		78
Recomendaciones		79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		80
ANEXOS		87
Anexo I	Cámara multiespectral Parrot Sequoia	87
Anexo II	Sensor de luz Sequoia con sus dimensiones.	87
Anexo III	GCP ubicados en el terreno para las pruebas realizadas	88
Anexo IV	Ambiente de trabajo del software Mission Planner	88
Anexo V	Menú del Agisoft para cargar la georreferenciación de las imágenes	89
Anexo VI	Esquema de procesamiento en red con Agisoft	89
Anexo VII	Interfaz para agregar imágenes en QGIS	90
Anexo VIII	Herramienta de edición de las imágenes	90
Anexo IX	Menú New Project.....	91
Anexo X	Ventana Select Images de Pix4D	91
Anexo XI	Interfaz para configurar el procesamiento en Pix4D.....	92
Anexo XII	Nivel de solape de las imágenes del Vuelo I.....	92

Anexo XIII	Modelo 3D del Vuelo I reconstruido con Agisoft Photoscan. Es apreciable las múltiples deformaciones cónicas del modelo por el mal solape.	93
Anexo XIV	Modelo 3D del Vuelo I reconstruido con Pix4d. En la zona central es apreciable la deformación del modelo por el mal solape.....	93
Anexo XV	GSD (cm/píxel)	94
Anexo XVI	Ilustración del GSD calculado	94
Anexo XVII	Cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio correspondiente a cada tratamiento aplicado en el experimento VmNn-18.....	95
Anexo XVIII	Distribución al azar de los diferentes tratamientos de nitrógeno replicados cuatro veces en el experimento VmNn-18.....	96
Anexo XIX	Cantidad de tallos de caña por parcela ante los diferentes tratamientos de nitrógeno en el experimento VmNn-18.	96
Anexo XX	Índices vegetativos derivables del sensor multiespectral Parrot Sequoia ...	97

INTRODUCCIÓN

El aumento constante de la población, la incesante demanda de alimentos, la reducción de tierras cultivables y el cambio climático son factores que han potenciado la búsqueda de nuevas formas para mejorar los niveles de productividad y sostenibilidad en la industria agrícola (1). Hoy en día existe una necesidad fundamental de técnicas precisas y eficientes que permitan a los agricultores, con un gasto mínimo de insumos, alcanzar grandes producciones. Esto ha llevado a investigadores y expertos de múltiples disciplinas a examinar diferentes formas de incorporar las nuevas tecnologías en los sistemas agronómicos (2),(3).

El procesamiento de imágenes constituye una de estas nuevas formas, el mismo tiene gran influencia en la sociedad actual y está a la vanguardia en diferentes esferas, debido a que persigue como objetivo mejorar el aspecto de las imágenes, resaltando detalles y brindando información que no puede apreciarse a simple vista (4, 5). En la esfera de la agricultura, el procesamiento de imágenes tiene como fin lograr un mejoramiento en la toma de decisiones en la gestión de cultivos (6), (7), (8), el adecuado riego que se le debe proporcionar a las plantas de acuerdo al relieve (9), (10), (11), la reducción del uso de insumos agrícolas (12), entre otras.

Las imágenes multiespectrales permiten acceder a una información muy útil, no disponible en las imágenes RGB, siendo fundamental para realizar de manera satisfactoria el monitoreo de la salud de los cultivos a mitad de temporada, la identificación de malas hierbas y la creación de recetas de fertilizantes (13),(14),(15),(16). Con dichas imágenes es posible obtener los índices vegetativos (IV), los cuales son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal (17).

Para el procesamiento de estas imágenes multiespectrales se utilizan software profesionales como *QGIS*, *Agisoft Photoscan* y *Pix4Dmapper Ag*, este último dedicado expresamente a la agricultura de precisión. Hacer uso de estos software permite calcular los índices de vegetación, crear mapas y georreferenciar imágenes para utilizarlos luego en la detección de enfermedades, la optimización de la aplicación de fertilizantes, agua y/o productos químicos a los cultivos, así como para la estimación del crecimiento de los cultivos (6, 18).

Usualmente los índices vegetativos son una combinación de bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos o multiplicados en una forma determinada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. En la literatura hay citados una gran variedad de índices vegetativos, que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación (12).

Sin embargo, a nivel nacional existe un insuficiente empleo, por parte de los productores, de tecnologías relacionadas con la agricultura de precisión (*GPS*, monitores de rendimiento, muestreos dirigidos georreferenciados) para la generación de información y conocimiento (19). En la industria azucarera hay un creciente interés por la aplicación de tecnologías de agricultura de precisión, con fines productivos (20). Poder delimitar ambientes con diferente potencial productivo, en un mismo campo de caña, sería un buen comienzo para la implementación del manejo sitio-específico en este cultivo a nivel nacional (21, 22).

Algunas instituciones como la ETICA (Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar) y AZCUBA (Empresa del Azúcar en Cuba) han comenzado a dar los primeros pasos en el procesamiento de imágenes aéreas de sembrados de caña de azúcar. A partir de estas posibles aplicaciones y la utilidad en estos campos, el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas tiene como proyecto el diseño de una metodología para el procesamiento de imágenes multiespectrales y el cálculo de índices vegetativos.

Por razones económicas y ambientales, el uso de fertilizantes en la agricultura debe ser restringido, sujeto a criterios técnicos sobre bases científicas (23),(24),(25),(26). Actualmente los procedimientos aplicados por AZCUBA para precisar los niveles de fertilizantes y el efecto de estos sobre las cepas de caña son básicamente manuales (recolección de muestras vegetales y de suelo para su análisis en laboratorios). Igualmente,

para determinar densidad vegetal, las variedades de caña sembradas y su nivel de madurez es necesario el desplazamiento de un especialista al campo. Estos procedimientos son extremadamente laboriosos y se vuelven imprácticos cuando se trabaja con grandes extensiones de caña. La fotogrametría multiespectral facilita la evaluación de extensas zonas agrícolas, pero aún la correlación entre los índices vegetativos y las características fisiológicas de la caña de azúcar no está totalmente definida; el desarrollo de este tipo de trabajo de patronamiento espectral es definitivamente superior en cultivos como maíz, trigo, arroz y soya (27),(28),(29),(30).

Situación del problema:

Aunque en Cuba existen diversos procedimientos para el cálculo de variables de interés agrícola en plantaciones de caña de azúcar, como la densidad y vigor vegetal, estrés nutricional de las plantaciones y el cálculo de índices vegetativos; estos no son todavía suficientes para analizar grandes extensiones de cultivos, al no estar definida totalmente la relación entre los índices vegetativos y la fisiología de las variedades de caña de azúcar sembradas por AZCUBA bajo condiciones de secano y clima tropical.

El problema científico se enfoca entonces en: En Cuba no está definida la correlación que existe entre los índices vegetativos obtenidos por fotogrametría multiespectral de sembrados de caña de azúcar y las principales variables agro técnicas de este cultivo.

Como **hipótesis** se plantea que, mediante el uso de VANTs, un sensor multiespectral y un software, que aproveche las prestaciones de los servidores de procesamiento de la universidad “Marta Abreu”, se podrían efectuar procedimientos para el procesamiento de las imágenes multiespectrales y establecer la correlación entre los índices vegetativos y variables agro técnicas de interés para la agricultura cañera.

Por tanto, el **objetivo general** propuesto para este trabajo es:

Establecer procedimientos para correlacionar los índices vegetativos de sembrados de caña de azúcar, obtenidos a partir de la fotogrametría aérea multiespectral mediante el uso de VANTs, con variables de interés para la agricultura cañera.

Estableciendo como **objetivos específicos**:

- Sistematizar los referentes teóricos relacionados con el procesamiento multiespectral de imágenes que aparecen reportados en la literatura especializada.
- Determinar las condiciones de vuelo del VANT bajo las que deben ser tomadas las imágenes.
- Caracterizar el desempeño de los software Pix4D, Agisoft PhotoScan y QGIS en cuanto a velocidad de la generación de los ortomosaicos y requerimientos de recursos computacionales.
- Relacionar variables agrícolas de la caña de azúcar, tales como el grado de absorción de los fertilizantes nitrogenados aplicados, nivel de madurez, variedades sembradas y vigor vegetal, con los índices vegetativos obtenidos a partir de la fotogrametría multiespectral.

Las tareas de investigación serán:

- Revisión técnico-especializada para la construcción del marco teórico de referencia general de la pesquisa.
- Configuración de las condiciones de vuelo del VANT 3DR X8+ y de la cámara Parrot Sequoia para la toma de imágenes aéreas con vista al procesamiento de las mismas y la obtención exitosa de diferentes índices vegetativos.
- Obtención de los ortomosaicos multiespectrales mediante los software Pix4D, Agisoft Photoscan y QGIS.
- Introducción de puntos de control en tierra en los modelos 3D generados para el cálculo del área de las parcelas sembradas.
- Cálculo de los mapas de índices vegetativos a partir de los ortomosaicos multiespectrales para estimar vigor vegetal en los campos de cultivos.
- Análisis de los campos de índices generados para identificar el estado fisiológico de bloques de caña que difieren en cuanto a variedad, dosificación de insumos y etapa de crecimiento.

Organización del informe

El informe de investigación estará compuesto por la Introducción, cuatro Capítulos, Conclusiones, Bibliografía y Anexos. Los capítulos están organizados de la siguiente manera:

En el **Capítulo 1**, a partir de la revisión bibliográfica, se presentan los fundamentos teóricos del empleo de imágenes multiespectrales, el cálculo de índices vegetativos y su aplicación en la agricultura. Se exponen las principales metodologías que constituyen el eje de esta investigación, introduciendo los temas relacionados. Se plantea la panorámica general existente en torno al problema que se aborda, haciendo énfasis en la descripción de las diferentes variantes de solución de la problemática del procesamiento de imágenes aéreas.

En el **Capítulo 2** se hace una descripción técnica del VANT, la cámara multiespectral, los software empleados para el procesamiento de imágenes y el cálculo de los mapas de índices vegetativos. Se establecen los pasos para el diseño e implementación del vuelo, hasta llegar al modelo tridimensional y la ortofoto multiespectral de las imágenes procesadas.

En el **Capítulo 3** se explican en detalle las condiciones climatológicas bajo las que se realizaron los vuelos, las características fenológicas de los sembrados de caña de azúcar, de los suelos y los insumos aplicados a las plantaciones sobrevoladas. Se evalúan los software de procesamiento propuestos en el capítulo 2 y se definen las condiciones de vuelo del VANT para un adecuado procesamiento de las imágenes recolectadas con la cámara multiespectral Parrot Sequoia.

En el **Capítulo 4** se presentan los diferentes mapas de índices obtenidos con los software Agisoft Photoscan, Pix4D y QGIS; examinando las discrepancias entre estos mapas en dependencia del software empleado. Se calcula con el software SPSS, la correlación que existe entre los índices vegetativos obtenidos a partir del sensor Sequoia y la edad, variedad de la caña de azúcar e incidencia en este cultivo de la fertilización nitrogenada.

CAPÍTULO 1. FOTOGRAMETRÍA MULTIESPECTRAL AÉREA PARA EL DIAGNÓSTICO DE ÁREAS AGRÍCOLAS

En este capítulo se realiza una revisión sobre la agricultura de precisión y las herramientas imprescindibles para la recolección y el procesamiento de imágenes multiespectrales, capturadas desde un avión no tripulado de pequeño porte. Además, se describen varias de las características fundamentales que deben poseer dichas imágenes. Se expone el cálculo de varios índices vegetativos y son descritos múltiples software que son capaces de ejecutar este cómputo a partir de las imágenes multiespectrales capturadas desde el VANT.

1.1 Agricultura de precisión

La agricultura como actividad vital en el progreso y sostenimiento de la humanidad ha sido objeto de constante estudio. En ella inciden, de forma casi inmediata, las recientes tecnologías obtenidas a partir de los progresos en múltiples áreas del conocimiento. Estas tecnologías favorecen la búsqueda y aplicación de nuevas herramientas que posibiliten atenuar algunos de los problemas actuales en el trabajo con los cultivos y los procesos agrícolas; entre los que se encuentran las dificultades con la calidad en la producción y el efecto perjudicial sobre el ambiente del empleo indiscriminado de plaguicidas y fertilizantes.

La Agricultura de Precisión (AP), es una concepción agronómica, que se basa en el tratamiento diferenciado de los cultivos en base del conocimiento de la variabilidad presente en un área agrícola determinada (31). Para evaluar esta variabilidad se emplean múltiples herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores planta-clima-suelo y fotografías multiespectrales recolectadas mediante satélites, aviones o VANTs (17, 19). Su aplicación posibilita definir el momento, lugar, la cuantía y

el tipo de insumo que hay que suministrar, reduciendo los costos, el efecto sobre el medio ambiente e incrementando la productividad (32). Mediante esta práctica, es posible solucionar disímiles problemas que pueden perjudicar el progreso de los cultivos; como la administración eficiente del agua, la aplicación localizada de herbicidas, empleo racional de abonos, conteo de plantas, la detección temprana de plagas y enfermedades en cultivos, entre otros (16).

La dosificación regulada de insumos se ejecuta mediante maquinarias o vehículos autónomos como tractores con dosificadores o plataformas de fumigación aérea. En algunos casos la maquinaria agrícola integra varias de las tecnologías mencionadas, haciendo viable implementar un análisis y ejecutar decisiones en tiempo real; como la localización de malezas y su eliminación inmediata empleando sistemas de aplicación selectiva de herbicidas (33).

La agricultura de precisión es una de las diez primeras revoluciones en la agricultura. Más de la tercera parte de los agricultores del medio oeste de los Estados Unidos ya emplean alguna forma de este concepto agronómico. Las tasas de adopción son elevadas en Australia, Japón, Canadá y Europa, especialmente en Alemania, Suecia, Francia, España, Dinamarca y el Reino Unido; en naciones como Argentina, Brasil, China, India y Malasia se ha comenzado a adoptar esta técnica (34).

1.2 Teledetección

La teledetección, también conocida como “observación de la Tierra”, es una técnica para monitorear la superficie terrestre empleando satélites o aeronaves (4). También puede ser definida como la compilación de datos sobre un objeto, área o evento sin estar en las inmediaciones físicas del mismo (35) y conlleva la interpretación y relación de esta información con la naturaleza y propiedades de los cuerpos (36).

Empleando una o diversas porciones del espectro electromagnético (*EMS*), la teledetección registra la radiación electromagnética (*EMR*) reflejada o emitida por los objetos; posibilitando recolectar imágenes de estos en múltiples regiones espectrales. Una de las características fundamentales de una imagen, detectada de forma remota, es la región que representa del *EMS*; que normalmente abarca múltiples bandas en las gamas visible e

infrarroja (5). Estas bandas reflectadas dependen de la propiedad del material (estructural, química y física), la rugosidad de la superficie, el ángulo de incidencia, la intensidad y la longitud de onda.

Etapas en la teledetección:

- Emisión de la radiación electromagnética (sol / auto-emisión).
- Transmisión de la energía desde la fuente a la superficie de la tierra.
- Interacción de la radiación electromagnética con la superficie terrestre.
- Transmisión de la energía desde la superficie terrestre al sensor remoto.
- Salida de datos del sensor.
- Transmisión, procesamiento y análisis de datos.

La radiación solar, cuando incide sobre la superficie de la tierra, puede ser reflejada, transmitida o absorbida por esta (35). La *EMR*, en interacción con los objetos, sufre un grupo de cambios en magnitud, dirección, longitud de onda, polarización y fase; los mismos son detectados por el sensor remoto y posibilitan al intérprete recopilar información útil sobre el objeto de interés. Los datos de teledetección brindan información espacial (tamaño, forma y orientación) y espectral (tono, color y firma espectral).

En los últimos años, las tecnologías en las que se sustenta la teledetección y sus aplicaciones han progresado sustancialmente. En la actualidad, la teledetección es una de las principales herramientas en múltiples áreas de la ciencia; como la meteorología, oceanografía, climatología, ciencias militares, ciencias de la tierra, y protección civil, entre otras (36). Novedosos detectores y tecnologías de imagen están incrementando la capacidad de la teledetección para, mediante ella, recopilar información espacial digital en una amplia gama de resoluciones finas de un modo eficiente, lo que permite adquirir información actualizada de objetos y fenómenos en la superficie terrestre en un período de tiempo breve (37). Una de las principales aplicaciones de la teledetección, es reconocer los patrones de distribución de la vegetación en el suelo y evaluar los cambios de esta en el tiempo, lo cual es de vital importancia en el progreso de la agricultura de precisión (1, 38, 39).

Con la teledetección la imagen representa a la población, dado que las mediciones se efectúan a través de toda el área de interés (40). Los datos de teledetección son capaces de

captar cambios en la fenología de las plantas durante todo el período de crecimiento, ya sean variaciones en el nivel de clorofila o cambios estructurales (41). Las aplicaciones de la teledetección en el sector agrícola se han concentrado en una gran gama de esfuerzos. Estos abarcan el rendimiento del cultivo y la biomasa (3, 42), los nutrientes, el estrés hídrico, las infestaciones de malezas (43), insectos y enfermedades de las plantas (44), y las propiedades del suelo como materia orgánica, humedad, contenido de arcilla y pH (34).

1.3 Firma espectral

La reflectancia espectral, representada como $\rho(\lambda)$, es la relación entre la energía electromagnética reflejada y la energía electromagnética incidente en función de la longitud de onda, λ . Los disímiles materiales de la superficie terrestre poseen características variables de reflectancia espectral (4). En dependencia de la reflectancia espectral, será el color o tono de la imagen fotográfica de un cuerpo determinado dentro de la gama visible, a lo que se adiciona su reflectancia a otras longitudes de onda fuera del espectro visible. Los árboles lucen verdes debido a que reflejan con mayor intensidad la longitud de onda verde. Los valores de la reflectancia espectral de los objetos, promediados en diferentes intervalos de longitud de onda bien definidos, comprenden la firma espectral de los objetos o rasgos por los que pueden distinguirse (4) y sirve como una firma única para el material (35). Para obtener la información imprescindible para la interpretación de imágenes multiespectrales, las características espectrales de diversos objetos naturales han sido ampliamente medidas y registradas.

Para cada objeto, la reflectancia espectral va a depender de la longitud de onda que incide sobre este. Esta se expresa mediante:

$$\rho(\lambda)=E_R(\lambda)/ E_I(\lambda) \quad (1.1)$$

Donde:

$E_R(\lambda)$ es la energía de la longitud de onda reflejada desde el objeto.

$E_I(\lambda)$ es la energía de la longitud de onda incidente sobre el objeto.

Para cada longitud de onda o intervalo de longitudes de onda, un factor de reflectancia indica cuánto de la radiación incidente se refleja; $\rho(\lambda)=1$ significa que toda la radiación

incidente se refleja, mientras que $\rho(\lambda)=0$ significa que toda la radiación incidente es absorbida. La gráfica de $\rho(\lambda)$ se denomina curva de reflectancia espectral. Esta cambia con la variación en la composición química y las condiciones físicas de los cuerpos, lo que deriva en una gama de valores. Los patrones de respuesta espectral se promedian para cada tipo de objeto con el fin de alcanzar una forma generalizada, que se llama patrón de respuesta espectral generalizada, para el cuerpo en cuestión.

En los inicios de la imagenología espectral, los investigadores esbozaron la hipótesis de que el espectro de reflectancia de cada material es único y, por lo tanto, constituye un medio para identificar materiales de forma exacta. El término "firma espectral", sugiere una correspondencia única entre un material y su espectro de reflectancia (45) y son justamente las diferencias en la reflectancia espectral lo que posibilita diferenciar de forma remota disímiles materiales y objetos, empleando la radiación reflejada.

1.4 Características de las imágenes

Es vital tener en cuenta varios aspectos para conseguir que los datos emanados de las imágenes digitales brinden la mayor fiabilidad y volumen de información posible. Algunas de las principales características de las imágenes son la resolución espacial, la resolución espectral y la resolución radiométrica (4).

La resolución espacial, se refiere a la dimensión del menor de los objetos que es posible distinguir en una imagen obtenida mediante un sensor remoto. Si las imágenes remotas van a ser empleadas para identificar y aminorar las complicaciones de los sembrados en el campo, el productor debe evaluar cuan afinada debe ser una imagen para que le posibilite comprender qué es lo que está sucediendo en el lote; cómo diferenciar una planta de la otra, un surco o lote del otro (29).

Las imágenes aéreas procedentes de aviones tripulados convencionales pueden llegar a alcanzar resoluciones submétricas (25 cm/píxel) que han permitido mapear las infestaciones de diversas malas hierbas en estado fenológico de floración en cultivos de girasol (46). Sin embargo, las imágenes multiespectrales provenientes de los satélites de mayor resolución espacial son las de los satélites Geo-Eyes (1.64 m / píxel) y Quickbird (2.4 m / píxel).

Respecto a la resolución espacial, los sistemas satelitales que ofrecen mayores niveles de detalles (Ikonos, Quickbird, Worldview, etc) presentan en sus cámaras multiespectrales tamaños de píxel mayores al metro; las resoluciones submétricas se verifican en sus cámaras pancromáticas (46). En el caso de que se requieran mejores resoluciones espaciales para discriminar, por ejemplo, las infestaciones de malas hierbas en estado fenológico temprano, es decir cuando presentan entre 2 y 6 pares de hojas, la resolución espacial requerida es mucho mayor (1-6 cm/ píxel) se hace necesaria la utilización de VANT para estos objetivos (17, 44) .

La resolución espectral es la capacidad que posee un sensor para diferenciar múltiples rangos espectrales (bandas) o porciones del espectro electromagnético. Esta capacidad está vinculada directamente con las características del sensor y restringida por las zonas de absorción de la atmósfera. Hace referencia al número de bandas espectrales que puede diferenciar el sensor, así como al ancho que éstas poseen. A mayor resolución espectral, más provechosa será la información que pueda ser inferida. En cuanto a resoluciones espectrales es posible diferenciar entre imágenes:

- Multiespectrales: Que generalmente capturan información entre 3 y 7 bandas con longitudes de onda de unos 100 nm de ancho.
- Hiperspectrales: Que adquieren información en varias decenas o centenas de bandas estrechas con longitud de ondas inferior a 5 nm de ancho.

La resolución radiométrica, también conocida como profundidad de bits, se define como la cantidad de niveles de gris que es posible grabar para un píxel determinado. Una resolución radiométrica de 8 bits por píxel producirá valores de tonos de gris que van desde 0-255 y una resolución radiométrica de 11 bits consigue capturar valores que van desde 0-2047. Este rango es posible calcularlo empleando la fórmula $N = 2^R$, donde N es el rango y R es la profundidad radiométrica.

1.5 Herramientas para la toma de imágenes

Años atrás, la teledetección aérea se efectuaba fundamentalmente con el empleo de aeronaves pilotadas y sensores satelitales, sin embargo, en la última década estos se han ido sustituyendo por vehículos aéreos no tripulados (VANT); que son aviones controlados

de forma remota desde una estación terrestre y con cierto grado de autonomía en el vuelo. Los VANT normalmente son de un costo bajo, poco peso y moderada velocidad, siendo ideales para la recolección de datos de teledetección. Actualmente, hay dos grandes plataformas para vehículos aéreos no tripulados, el tipo “Ala fija” y el tipo “Ala rotatoria”.

Los VANT de ala fija están preparados para sobrevolar objetivos a elevadas velocidades por un lapso de tiempo relativamente largo, con características aerodinámicas mucho más sencillas y en algunos casos no necesitan de una pista o lanzador para su despegue y aterrizaje. Los vehículos aéreos no tripulados de ala rotatoria cuentan con la ventaja de que son capaces de despegar y aterrizar verticalmente, poseen una mayor maniobrabilidad y precisión ya que pueden volar siguiendo cualquier trayectoria en las tres dimensiones; además de poder mantenerse volando sobre un objeto en específico. No obstante, debido a su complejidad mecánica y de que disponen de baterías de una menor capacidad, poseen un rango reducido de vuelo.

Numerosas prestaciones de las plataformas para VANT son expuestas por diversos autores, (47),(17),(48). Algunas de las más destacadas son el aumento de la producción respecto a otros métodos tradicionales de trabajo, menor costo, disminución del tiempo utilizado para la recopilación de datos, posibilitan la ejecución de trabajos en áreas de poca accesibilidad y cuentan con la capacidad de volar a baja altura; posibilitando tomar fotografías con una elevada resolución, algo fundamental para el manejo de sitios específicos en los cultivos.

En el GARP se dispone de un VANT 3DR RTF X8+ con sus componentes incluidos, al cual se le agrega el sensor multiespectral. Este VANT posee una reputación de fiabilidad y robustez en el mercado de aviones autónomos, siendo estas selecciones validadas por la Empresa AZCUBA.

1.5.1 Cámara Multiespectral

En este proyecto la cámara elegida debe ser capaz de capturar las bandas RGB, NIR e IR del espectro, o sea, debe poseer características multiespectrales; las cuáles se pueden conseguir si la cámara cuenta con un sensor multiespectral o si se le acopla un filtro en el lente en dependencia de la banda del espectro que se requiera capturar. Además, su peso

debe ser ligero, ya que el VANT cuenta con una capacidad de carga útil muy limitada. En el mercado existen múltiples cámaras de diversos fabricantes, entre las cuales hay una gran variabilidad en cuanto a prestaciones y precios.

La compañía Tetracam es una de las más destacadas en este sector, desarrollando varios modelos de cámaras entre los que se destaca la **Tetracam ADC Micro**, la cual es la más pequeña de sus productos (90g); calificando como una solución ideal para aplicaciones en las que el peso es un factor crítico. La misma contiene un sensor de 3,2 (Mpx) optimizado para la captura de longitudes de onda de luz visible mayores a 520 nm y de infrarrojo cercano hasta 920 nm, 2 GB de almacenamiento estándar (ampliable a 8 GB), realiza procesamiento paralelo rápido y mantiene un consumo ultra bajo de energía con un costo general de 2995 USD.

La **Tetracam MCA Mini** se presenta como una opción de más prestaciones, la cual posee un sistema de filtrado avanzado conteniendo opciones de 4, 6 o 12 sensores multiespectrales opcionales; convirtiéndose en un espectroscopio configurable capaz de detectar los diversos estados de salud o distintas etapas de crecimiento en la vegetación. Cada sensor posee un filtro de banda espectral específico que se inserta entre el lente y el sensor. Una limitación del mismo es su alto costo que varía de 10000 a 30000 USD según la cantidad de sensores.

El sensor multiespectral **MS 4100** de los desarrolladores de RedLake consta de un lente y 3 sensores CCD de 2 Mpx con una sensibilidad espectral de 8 a 10 bits. Los sensores pueden ser filtrados para proveer 3 bandas de datos o un filtro Bayer puede ser superpuesto a un sensor para obtener 5 bandas en total, siendo menor la resolución espectral de las imágenes. Esta cámara tiene algunas dificultades en su uso, debido a que se necesita una fuente externa de alimentación, por lo que habría que modificar la electrónica del avión; además requiere una PC para su control y guardado de datos con un costo completo del sistema alrededor de 30000 USD.

La cámara francesa **MultiSPEC 4C** es una opción desarrollada por los expertos en agronomía de Airinov y personalizada por eBee Ag de SenseFly. La misma contiene 4 sensores separados de 1.2 Mpx, los cuales proveen datos de imágenes en 4 bandas específicas, (Verde (550 nm), Roja (660nm), Borde Rojo (735 nm) y NIR (790 nm)); posee

un sensor de irradiación superior para compensar las variaciones de la luz solar en las fotos y un peso de 160 gramos, ideal para VANT. Además, con una lente de ángulo ancho permite una alta velocidad de mapeo gracias al gran solapamiento entre las fotos. Entre sus aplicaciones fundamentales están la detección del índice de área foliar (LAI), biomasa y fenología, con un costo de alrededor de 11000 USD. Este precio la convierte en un producto de difícil adquisición.

Las cámaras para vegetación de SenseFly tienen un alto prestigio en el mercado siendo la **S110** una buena opción pues con un sensor de 12 Mpx capta las bandas azul, verde, roja y NIR hasta 1100 nm según el modelo, y es soportada de forma completa por el software de eBee. La misma no es más que una cámara Canon modificada para la toma de fotos con VANT por la compañía SenseFly con un costo de 1400 USD.

La **MicaSense RedEdge™** es una cámara avanzada, ligera, multiespectral, optimizada para su uso en pequeños sistemas de aeronaves no tripulados, con 150 g de peso solamente y disponible para su uso en aviones tripulados también. La misma está diseñada fundamentalmente para proporcionar datos precisos en las bandas espectrales azul, verde, roja, borde rojo y NIR simultáneamente, para aplicaciones de teledetección agrícola. La misma tiene un costo de 6400 USD siendo uno de los mejores sensores disponibles en el mercado, aunque su precio es elevado.

Con un peso de solo 107 gramos, **Parrot Sequoia** es un sensor en extremo potente y compacto. Este sensor posee 4 filtros para evaluar los nutrientes y la biomasa de los cultivos, y además presenta una cámara RGB de 16 Mpx para obtener mapas con un alto nivel de detalle, excelente para el conteo de plantas recién nacidas. Tiene además 64 GB de memoria incluida, GPS unidad de medición inercial integrada, garantizando con su combinación con el software Pix4D, ejecutar con una elevada optimización, el procesamiento de las imágenes para obtener mapas aéreos de los sembrados. Esta cámara posee además un sensor que capta la luz incidente, igual a la MicaSense; gracias a este sensor que recolecta las condiciones de iluminación y calibra los 4 sensores multiespectrales, es posible generar índices de vegetación exactos. los cuales son objetivo primordial de este proyecto. Además, la misma cuenta con un precio altamente competitivo de 3500 USD siendo por lo cual el sensor de mejor relación calidad precio encontrado en el

mercado para efectuar de manera satisfactoria el procesamiento de imágenes NIR e IR. Esta cámara ha sido empleada en múltiples aplicaciones de fotogrametría en zonas agrícolas, con magníficos resultados reportados en la literatura (49), (50), (43), (51).

1.6 Procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas

La fotogrametría infrarroja es una ciencia relativamente novedosa que da acceso a información espectral extremadamente valiosa sobre la vegetación y los suelos, no disponible en las imágenes RGB, posibilitando conseguir de forma adecuada los parámetros vinculados con la AP.

La fotogrametría infrarroja es una técnica pasiva (rango infrarrojo entre 0.76-14 micrómetros) que se basa en el agua y sus propiedades. El agua incide en las propiedades térmicas de las plantas, posibilitándose su uso en plantaciones donde la hoja posee proporciones variables de agua por unidad de superficie como un parámetro primordial en las actividades de pre cosecha (52). En actividades pos recolección posibilita examinar la madurez, localizar deterioros y sustancias extrañas en los alimentos.

En (10), se determina el estado hídrico de la vegetación, empleando imágenes térmicas de elevada resolución espacial, recolectadas empleando un VANT. El estrés hídrico en los cultivos conlleva al cierre de los estomas, disminuyendo la transpiración e incrementando la temperatura de las hojas, siendo posible monitorizar esto, mediante sensores térmicos. El volumen de información conseguido facilita establecer planes para un mejor empleo del agua.

En (12), se identifica el nivel de clorofila de las plantas y en base a esta información se determina el nivel de nitrógeno de la hoja, ya que mantienen una íntima relación. De esta forma se obtiene el nivel de déficit nutricional en las plantaciones, para así optimizar el empleo de abonos, usándose estos sólo en los sectores en los que son requeridos.

En (33), se identifica el nivel de estrés en las plantas, ocasionado por la presencia de plagas y enfermedades, consiguiéndose diversos mapas que facilitan identificar procesos en los cultivos en forma localizada, así como dimensionar el problema y evaluarlo en forma puntual. Esto permite aumentar la rentabilidad económica y reduce notablemente la dosificación innecesaria de compuestos fitosanitarios.

En gran medida, estas aplicaciones se derivan de los índices vegetativos, los cuales no son más que medidas cuantitativas, fundamentadas en los valores digitales, que se correlacionan con disímiles parámetros de la vegetación física como la biomasa, la actividad fotosintética (53), la productividad (54), el índice de área foliar (IAF), el contenido de clorofila y contenido de nitrógeno (34) o el nivel de cobertura vegetal de la tierra, aprovechando el hecho de que son indicadores sensibles de la presencia y condición de la vegetación verde (55), (56), (57), (58).

Normalmente los IV se calculan a partir de varias bandas espectrales, siendo el resultado de sumar, dividir o multiplicar diversos valores espectrales de una manera específica, para generar un valor que revele la cuantía o robustez de la vegetación dentro de un píxel; posibilitando estimar y evaluar el estado fisiológico de las plantas, basándose en la cuantificación de la radiación que las plantas emiten o reflejan (17).

De todos los IV obtenidos tras décadas de investigación, los más empleados y derivables de un sensor multiespectral tribanda son: NDVI, GNDVI y SAVI (12). Otros IV son el CWSI y el PRI normalizado, empleados para evaluar el estrés hídrico de los sembrados, un parámetro básico en la agricultura debido a las consecutivas sequías que se están sucediendo en la última década.

1.7 Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

El índice de vegetación más conocido y utilizado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés). El mismo se fundamenta en el comportamiento radiométrico distintivo de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, posibilitando establecer la robustez de la planta.

Los valores del NDVI dependen directamente de la energía absorbida o reflejada por la vegetación en diversas regiones del espectro electromagnético. La respuesta espectral de las plantas sanas, presenta un claro contraste entre el espectro visible, sobre todo la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR por sus siglas en inglés) (Figura 1.1). Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayoría de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que presentan una elevada cantidad de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En cambio, cuando las plantaciones padecen alguna clase de

estrés, ya sea por efecto de las plagas o por déficit hídrico, la proporción de agua en las paredes celulares se reduce; por lo que la reflectividad en el NIR decrece y se incrementa a su vez en la banda roja, al poseer menor absorción clorofílica.

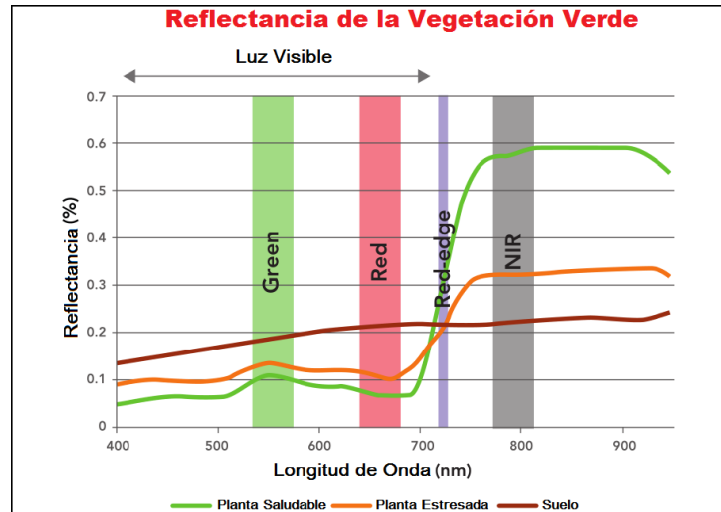


Figura 1.1. Reflectancia de la vegetación en dependencia del vigor vegetal.

Este contraste en la respuesta espectral facilita determinar con relativa simplicidad la vegetación saludable. Calcular el NDVI requiere el empleo de una fórmula sencilla con dos bandas espectrales, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1.2)$$

NIR = Valor espectral de la banda infrarroja cercana

R = Valor espectral de la banda roja

Los valores del NDVI van desde el -1 al 1, un valor próximo al 1 es interpretado como una especie vegetal con un elevado vigor y un valor cercano a cero refleja áreas sin vegetación como agua, hielo, arena, nieve o nubes (2). El rango común para la vegetación es de 0.2 a 0.9, siendo de 0.2 a 0.3 para arbustos y césped y de 0.4 a 0.9 para bosques y cultivos (59). El término vigor es empleado para definir la tasa de crecimiento de una planta, siendo

posible cuantificarlo por la medición del incremento total en tamaño, en un espacio definido de tiempo, con respecto al tamaño de partida (60).

Con el NDVI es posible estimar el nivel de salud de la vegetación en general, la actividad fotosintética, la posible carencia de nutrientes así como evaluar las tendencias espaciales y temporales en la dinámica de los cultivos, su rendimiento y distribución (61, 62). Además, posibilita obtener mapas de vegetación que pueden ser catalogados en categorías de vegetación y exhibidos como imágenes con disímiles colores que simbolizan niveles variables de vegetación.

Respecto a otros IV más complejos, el NDVI cuenta con las ventajas de poseer una gran simplicidad para su cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. En cambio, posee el inconveniente de que cuenta con una capacidad reducida de mermar la influencia del suelo y de la atmósfera. Además presenta problemas cuando se emplea en masas vegetales muy densas porque se satura, puesto que la región roja no cambia mucho y la infrarroja continua incrementándose a medida que el follaje aumenta (63, 64).

Múltiples artículos vinculados al NDVI se han publicado hasta el presente. En (41), se calcula el NDVI para reconocer sembrados de caña de azúcar y apreciar su condición de salud a partir de imágenes del satélite IRS LISS II, posibilitando estimar el área de la superficie terrestre cubierta por el cultivo y qué sectores estaban enfermos. También en (65), se empleó el NDVI, entre otros índices, para corroborar el efecto del déficit de agua en la disminución de la producción de frutas en un sembrado de árboles de manzana.

En (66) el NDVI se utiliza para identificar zonas con carencias hídricas, mediante sensores satelitales remotos, pudiéndose cuantificar qué porción de la radiación fotosintéticamente activa es absorbida por la vegetación. La absorción y la reflexión de la radiación fotosintéticamente activa, durante un período específico de tiempo de un sector determinado, se puede manejar para obtener un valor de NDVI; que con el tiempo, es posible promediarlo para precisar el escenario "normal" de desarrollo de las plantas y determinar el estado fisiológico de la vegetación, con relación a la norma. Empleando la información de NDVI a nivel mundial con que cuentan la NASA y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), se hizo un balance de los datos de un cultivo

con la media de 20 años mostrando si el rendimiento en un área en específico es típico, o si el desarrollo de los cultivos es superior o menor a la media.

Los autores (30), mostraron las enormes potencialidades del NDVI para identificar el rango, patrón de verdura de la cubierta del cultivo del trigo y estimar el valor de herencia de la expresión verdura en la madurez fisiológica del mismo, independientemente de los efectos de su fenología. Los resultados conseguidos se correlacionaron satisfactoriamente con la cosecha obtenida y el rango de verdura del trigo reflejó un potencial de herencia moderada.

Con el empleo de NDVI fue creado un modelo predictivo de distribución de especies de plantas en (67). Se examinó la contribución de los datos de teledetección, concretamente el NDVI, para los modelos de distribución de una especie de *Coccocypselum* en Brasil obteniéndose dos modelos; el primero empleando información topográfica y medioambiental, y el segundo sumando a esto los datos del NDVI. En este estudio se reflejó el potencial de incorporar datos de NDVI en modelos a gran escala de distribución de las especies vegetales. Los datos de NDVI reflejaron su potencial para obtener modelos ecológicos ya que se apreciaron ligeras variaciones estadísticas entre los modelos obtenidos de distribución de especies.

Varios autores (36), emplean los índices NDVI, NGDI y EXG (Índice de Exceso Verde) para discriminar las plantas del suelo. Aquí concluyen que los mejores índices para separar plantas de malas hierbas o parches de malezas son los NGRDI y EXG, pero para conseguirlo se requiere efectuar los vuelos a poca altura. Es necesario establecer un compromiso entre la resolución espectral y la espacial; de forma tal que sea posible sobrevolar la mayor área posible y discriminar de manera satisfactoria entre el suelo y las malezas.

1.8 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) es un índice asociado al color verde de la vegetación o la actividad fotosintética, de los más empleados para establecer los niveles de absorción de agua y nitrógeno en el follaje de la vegetación. El mismo se define por la ecuación:

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{GREEN}}{\text{NIR} + \text{GREEN}} \quad (1.3)$$

Se ha validado ampliamente que las lecturas del medidor de clorofila son un indicador razonable del estado del nitrógeno en los cultivos, con el que es posible disminuir el potencial de contaminación del medio ambiente por nitrógeno en la producción de maíz (68). No obstante, los medidores de clorofila son herramientas pocas prácticas para la gestión de nitrógeno a escala de campo. Para ello se desarrolló un medio de detección práctico, para calcular los niveles de clorofila en la hoja, de forma remota mediante el índice GNDVI. Las variaciones en las lecturas del sensor (GNDVI) estuvieron fuertemente correlacionadas con los tratamientos de nitrógeno efectuados y las lecturas del medidor de clorofila en tierra.

En (69) se implementó un método para cuantificar el índice de área foliar (IAF) en campos de trigo a partir del GNDVI. Cada sembrado se fraccionó en 6 capas de norte a sur con tratamientos variables de nitrógeno, lo que originó una gran variación en el índice de área foliar. El examen de las fotografías infrarrojas mostró múltiples variaciones espaciales en el índice de biomasa y área foliar dentro de cada bloque de tratamiento. El GNDVI se correlacionó linealmente con el índice de área foliar y biomasa mostrando su efectividad en esta tarea.

Las áreas estresadas por déficit de nitrógeno en trigo fueron localizadas mediante el GNDVI en (70). Se evaluaron 4 parcelas con distintas aplicaciones de nitrógeno; las imágenes se obtuvieron de dos sensores aéreos y por satélite. Las parcelas con dosificaciones de 195 y 150 libras de N/Acre no mostraron grandes diferencias entre ellas, reflejando muy poca variabilidad en el trigo; no obstante, las parcelas con 60 libras de N/Acre poseían valores notablemente menores. Como se había pronosticado, el bloque sin atención pretemporada de nitrógeno reflejó los menores rendimientos. Estos resultados corroboraron la expectativa de que las fotografías aéreas y satelitales, en conjunto con el cálculo de IV como el GNDVI, posibilitan detectar las áreas con carencia de nitrógeno en trigo, las cuales podrán ser eliminadas sin derrocharlo, estimándose con este estudio un ahorro de 42 dólares por hectárea (ha) en años estándar en este cultivo.

1.9 Software para el procesamiento de imágenes NIR e IR aéreas con vistas a calcular los índices de vegetación

En la actualidad, en el mercado existen múltiples software para el procesamiento de imágenes vinculadas a la agricultura de precisión, perfilándose dos tipos fundamentales: los que son provistos como paquetes de software con una licencia de un costo determinado según las operaciones que se vayan a realizar, por ejemplo: obtención de ortomapas, procesamiento de imágenes NIR o cálculo de índices vegetativos, siendo gratis en algunos casos del software libre y los que poseen plataformas de procesamiento en la nube con un precio establecido según la cantidad de información a manejar. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, en el caso de los primeros es necesario adquirir computadoras con altas capacidades de cómputo que pueden ser extremadamente caras, aunque esto permite llevar a cabo estudios de forma independiente en cualquier momento. En los segundos se necesitan efectuar pagos por cada una de las tareas a ejecutar, aunque si la tarea es de una complejidad reducida y no se va a hacer frecuentemente puede ser mucho más factible económicamente que la opción anterior.

Data Mapper es un software que brinda un servicio automático de procesamiento de imágenes en la nube, compatible con la mayoría de los formatos de fotos del mercado, siempre que se envíe la información telemétrica de las mismas. El precio del servicio varía según el sensor utilizado, la altitud y la cantidad de información. Además, con vista al mercado creciente de la agricultura de precisión, ofrece servicios como el mapeo 3D, determinación de la altura de las plantaciones, detección de malas hierbas, conteo de plantas, índices de salud de la cosecha entre otros.

Otro software muy empleado en el mercado es el **Eagle View**, el mismo provee la revisión de las imágenes infrarrojas, el establecimiento de las zonas, y de la receta de insumos como abonos o pesticidas a aplicar por zona. Las imágenes generadas pueden ser modificadas en el terreno, según la apreciación del agricultor, para mejorar aún más el análisis del campo con esta herramienta. En el caso de las imágenes infrarrojas, las mismas son analizadas directamente para la planificación de riego, detectando fugas de agua, atascos y cabezas de riego rotas, además del cálculo de IV. Este software es un servicio en la nube también, con un costo en dependencia de las operaciones solicitadas a realizar. Además, cuenta con

versiones móviles en iOS y android para administrar y modificar las operaciones de forma remota.

Para realizar el cálculo de índices, a partir de videos grabados desde los VANT, está el software **Agro Vision-Vision Studio**. Es un software de procesamiento de imágenes, obtenidas a partir de los videos tomados desde un avión no tripulado, capaz de prescindir del tradicional armado de mosaico, especialmente diseñado para la agricultura de precisión. El mismo genera mapas de prescripción para la fertilización, informes de sectores geolocalizados cubiertos de malezas, estimación de rendimiento e informes de detección de daños en el cultivo, incluyendo la infestación por hongos con un 90% de efectividad comprobado. También genera mapas de NDVI y LAI fundamentales a la hora de realizar estudios de AP.

El software **Drone Mapper** es uno de los más completos en el cálculo de índices de vegetación; para ello realiza el procesamiento de fotos NIR georreferenciadas. Este software tiene una plataforma de procesamiento en la nube, por lo que su costo está sujeto a la cantidad de datos a procesar.

Uno de los software más completos e integrales de agricultura de precisión en el mundo es **PAM**, que cuenta con un módulo de cartografía y un módulo procesador de datos de precisión (PDP); PDP es el nombre utilizado para el módulo de procesamiento de datos de la agricultura de precisión completa. Este módulo puede ser conectado a cualquier versión de **PAM**. El mismo es capaz de crear mapas de tasas de aplicación variable, para una gama de diferentes controladores disponibles en el mercado.

Además, está el **GpMapper**, un motor de mapeo utilizado como la base del Módulo de Cartografía de PAM. El software ha sido empleado en proyectos del Departamento de Agricultura de Australia Sur (SARDI) y Landcorp Farming Ltd, que es la mayor empresa granjera en Nueva Zelanda con más de 500 granjas por todo el país, obteniendo resultados excelentes. Este programa tiene un nivel de satisfacción del 89% de sus clientes, lo que muestra su eficiencia y adaptabilidad a los más disímiles tipos de plantaciones y campos.

Para trabajar con mapas e información geográfica fue creada la plataforma **ArcGIS**, la cual es un sistema de información geográfica que tiene como principales funcionalidades la

creación y el uso de mapas, la compilación de datos geográficos y el análisis de información mapeada, administrando la información en bases de datos y procesándola en los distintos software integrados en la misma. El 40% del mercado de software GIS desde hace más de 10 años utiliza esta herramienta, mostrando continuidad en la funcionalidad y la implementación de las nuevas técnicas de procesamiento de los últimos años como el cálculo de índices vegetativos. Una restricción de esta plataforma es su compatibilidad limitada al sistema operativo Windows, y su licencia tiene un precio muy variable en dependencia de los software que la integren.

Mediante el software **Pixel Wrench 2** es posible calcular con elevada exactitud los IV a partir de las imágenes multiespectrales capturadas por las cámaras de Tetracam. Este software provee en un solo paquete la posibilidad de administrar las cámaras de Tetracam, editar las fotos DCM10, RAW 8 y RAW 10 y acceder a sus metadatos, manejar grandes cantidades de datos y calcular IV e imágenes de cubierta de la canopia. Es ofertado por la compañía Tetracam a todos los usuarios de sus cámaras, siendo su uso limitado a las mismas; dificultando su adquisición, debido a que el costo de los productos de esta empresa es sumamente elevados.

Agisoft PhotoScan es una solución de software no libre de fotogrametría para la generación automática de modelos de textura poligonales, ortomosaicos georreferenciados y DEMs / DTMs (Modelos Digitales del Terreno). El cálculo de índices vegetativos le fue agregado recientemente, aprovechando su capacidad de procesamiento de imágenes multiespectrales. Agisoft se emplea en la fotogrametría aérea para múltiples aplicaciones de la industria como la minería, la agricultura, el mapeo aéreo, arqueología, arquitectura, los efectos visuales entre otros (7),(36),(46),(71),(72),(73). Ofrece un proceso rápido (típicamente dentro de un par de horas), brindando resultados extremadamente exactos al mismo tiempo. Permite manipular miles de imágenes y todo el proceso es ejecutado localmente, sin que sea necesario transmitir los datos fuera de la compañía, algo esencial para el procesamiento de datos sensibles (18).

Otro de los software más empleados en el mercado es el **ENVI**, el cual ha sido utilizado en múltiples trabajos para determinar el área cubierta de maíz y otros cultivos (9, 74, 75). Este software posee una herramienta para calcular el NDVI que emplea las fórmulas

convencionales consiguiendo resultados satisfactorios, pero es necesario señalar que, debido a las regulaciones del embargo estadounidense, no es posible adquirir licencias para su empleo en Cuba.

En (76) el software **Sim Active Correlator 3D** fue empleado para generar modelos de superficie digital y ortomosaicos a partir de fotografías aéreas, es capaz de realizar el procesamiento de las imágenes de alta calidad recolectadas por los VANT (1cm por píxel). El mismo realiza la triangulación aérea, genera modelos de superficie digitales densos, ortomosaicos, características 3D vectorizadas, mapas NDVI entre otras tareas. El procesamiento emplea las GPU y CPU simultáneamente, posibilitando el empleo de múltiples PC; garantizando así una elevada velocidad de ejecución de los proyectos con largas cantidades de datos. La licencia de la versión para VANT del mismo tiene un costo de 5600 USD.

Un sistema distribuido para monitoreo de los cultivos fue empleado en Ucrania (77); en el mismo se utilizó el software **QGIS** para operar con las bases de datos SQLite y generar mapas vectorizados de los sembrados. Este software está especializado en el trabajo con datos geoespaciales con soporte para la mayor parte de los formatos de datos y proveedores, además cuenta con una interfaz de software de código abierto en los lenguajes de programación C++ y Python para implementar componentes adicionales posibilitando extender sus funcionalidades de ser preciso. El mismo proporciona dos vías para generar los índices, la “Calculadora Ráster” que posibilita incorporar la fórmula específica y los índices radiométricos que contienen los IV más empleados hoy en día en el sector agropecuario. Es un programa multiplataforma libre de costo, ideal para trabajar con sistemas de información geográfica en Linux, Windows y Macintosh.

El efecto de la deforestación en la biodiversidad endémica de plantas y animales en el Himalaya hasta el año 2100 fue analizado en (78) mediante el software **ERDAS Imagine**. El mismo fue empleado en la confección de todos los mapas y los análisis efectuados a partir de GIS en la investigación; además brinda un set de herramientas sumamente amplio, ofreciendo la posibilidad de ejecutar análisis espectrales, modelados espaciales, edición de mosaicos entre otros, su valor varía según los módulos a utilizar.

Ensomosaic es un software de fotogrametría capaz de hacer ortomosaicos libres de distorsión en zonas con ondulaciones significativas en el terreno. Como entrada, precisa imágenes en cualquier formato común (jpg, png, entre otros), coordenadas de GPS y los parámetros de la cámara empleada. Además, el mismo posee una versión especializada en agricultura, el **Ensomosaic Agri**, que presenta entre otras potencialidades el cálculo de índices vegetativos; con una elevada efectividad sobre todo en el NDVI. Este software tiene 2 licencias para VANT, la VANT Mini de 700 euros que permite la obtención de proyectos de menos de 100 fotos y 5 km cuadrados y la VANT de 2900 euros permitiendo generar proyectos de hasta 50 km cuadrados con un número ilimitado de fotos.

El procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas con el objetivo de extraer las características de las plantaciones de maíz fue realizado en (25) mediante el software **IDRISI**. Las bandas visibles y NIR fueron georreferenciadas y separadas, siendo utilizadas en el cálculo de índices NDVI y GVI. **IDRISI** consiste en una interfaz principal desde la cual se accede a una colección de cerca de 200 módulos que proveen distintas técnicas de entrada, análisis y exposición de los datos. Además del NDVI, **IDRISI** ofrece la posibilidad de calcular más de 20 índices de vegetación. La licencia de este software varía desde la general que es de 1250 USD a 295 en el caso de la licencia para estudiantes, aunque la misma está protegida bajo las leyes de EEUU dificultando su obtención.

Pix4DMapper está diseñado para los productores de cartografía, basada en imágenes recolectadas con cámaras de bajo peso transportadas por VANT. Este es un software para el completo procesamiento de imágenes que permite convertir miles de fotografías 2D en mosaicos georreferenciados y modelos 3D. El software Pix4D procesa automáticamente las imágenes terrestres y aéreas adquiridas por los VANT. Soporta resoluciones de imagen de entrada desde 1 hasta 200 megapíxeles y puede procesar hasta 10 000 imágenes RGB, infrarrojas o térmicas, a la vez. Este software convierte estas imágenes con resultados exactos, precisos y personalizables para una extensa gama de aplicaciones GIS y CAD, además se encarga de toda la calibración y procesamiento de las imágenes, cuenta con herramientas como el editor *rayCloud*, el editor de mosaico y la calculadora de índices vegetativos, que posibilitan editar y asignar propiedades a los resultados (79).

Este software fue lanzado en conjunto con el sensor multiespectral Sequoia de Parrot, el cual también fue diseñado específicamente para la AP y fue abordado anteriormente en este capítulo. Este software tiene una licencia anual con costo de 6500 USD, que incluye la adquisición del sensor Sequoia. La integración entre estos dos elementos y las potencialidades que brindan, aseguran calidad y prontitud en la adquisición y el procesamiento de imágenes NIR e IR de elevada resolución y la obtención de IV de los sembrados a partir de las mismas.

El trabajo desarrollado por (80), tuvo como objetivo primordial efectuar una aproximación al uso y aplicabilidad de los VANT en el monitoreo de las labores agronómicas del cultivo de palma de aceite. Para ello, se ejecutaron múltiples ensayos de vuelo en algunas plantaciones, en las cuales fue posible encontrar la variedad de condiciones fenológicas y fitosanitarias de los sembrados. Se utilizaron tres tipos de modelos de VANT para la captura de las imágenes y se evaluó el desempeño de dos software especializados (Pix4D y Agisoft Photoscan) para el procesamiento de las imágenes y la generación de los respectivos ortomosaicos, quedando evidenciadas las elevadas prestaciones de dichos software en esta clase de proyectos.

1.10 Consideraciones finales del capítulo

En el presente capítulo se ha patentizado el auge logrado a escala mundial por los sistemas de procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas en la agricultura de precisión. Se demostró la importancia del uso de los índices vegetativos obtenidos mediante estos sistemas y sus aplicaciones en una amplia gama de cultivos.

Presentado el marco teórico y analizada la bibliografía consultada, se arriban a las siguientes conclusiones:

- La aplicación de la Agricultura de Precisión es la vía más segura para aumentar las producciones, ahorrando insumos agrícolas y protegiendo el medio ambiente; por sus virtudes es necesaria su aplicación en los sembrados de caña para lograr la imperiosa modernización de la industria azucarera cubana.

- El procesamiento de las imágenes multiespectrales aéreas, con vistas a la obtención de índices vegetativos que puedan ser relacionados con las características biofísicas de la vegetación, es fundamental en la aplicación de la AP.
- Para la toma de las imágenes aéreas se utilizará el VANT 3DR RTF X8+ con sus respectivos componentes incluido el sensor Sequoia, realizándose la planificación del vuelo con el software Mission Planner.
- Los software Pix4D Ag, QGIS y Agisoft Photoscan son las soluciones de fotogrametría más convenientes para realizar el procesamiento de las imágenes multiespectrales y el cálculo automático de los IV en plataformas de escritorio.

CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS PARA LA CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

En este capítulo se describen los detalles técnicos fundamentales del sistema de adquisición de las imágenes multiespectrales: el VANT, la cámara multiespectral y los software de procesamiento. También se presentan otros elementos empleados para efectuar mediciones sobre las áreas de interés. Son presentados los flujos de trabajo con los software Agisoft PhotoScan, Pix4D y QGIS, así como el uso de las prestaciones que brindan los mismos para ejecutar de manera satisfactoria los trabajos de procesamiento relacionados a la agricultura de precisión.

2.1 Vehículo aéreo no tripulado 3DR RTF X8+

El VANT es un elemento que es necesario seleccionar con extremo cuidado en dependencia del trabajo de fotogrametría que se desee realizar; ya que si posee una capacidad de carga reducida puede que le sea imposible realizar el vuelo con la cámara multiespectral durante un tiempo mínimo para recolectar fotos, o que su velocidad de desplazamiento sea excesivamente elevada para las capacidades de disparo de dicha cámara. El VANT a emplear en este proyecto es el **3DR RTF X8+** (ver Figura 2.1), que sobresale en el mercado por sus elevadas prestaciones en estudios relativos a la fotogrametría. El **3DR RTF X8+** es un pequeño avión autónomo de ala rotatoria; su diseño específico permite un funcionamiento flexible y se puede implementar de forma segura en diferentes entornos y condiciones meteorológicas. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la

fotogrametría, la Agricultura de Precisión, el estudio medioambiental, la búsqueda y salvamento, informes de noticias, entre otras aplicaciones.

Descripción del VANT **3DR RTF X8+**:



Figura 2.1. VANT 3DR RTF X8+

Características del modelo **3DR X8+**:

- Batería LiPo: 4S 14.8V 10.000 mAh 10C.
- Equipo del piloto automático: Pixhawk v2.4.5.
- Firmware del piloto automático: ArduCopter 3.2.
- GPS: 3DR u-blox GPS con brújula (módulo LEA-6H, actualización de 5 Hz).
- Estación terrestre Radio: 3DR Radio v2 (915 MHz o 433 MHz).
- Controlador: FlySky FS-TH9X con módulo de telemetría FrSky.
- Dimensiones: 13.7 in x 20.1 in x 11.8 in (35 cm x 51 cm x 20 cm).
- Capacidad de la carga útil: 800 g (1.7 libras).
- Velocidad Máxima de Vuelo: 30 m / s.
- Tiempo de vuelo máximo estimado: 15 min.

2.2 Cámara multiespectral

El sensor Sequoia, desarrollado por los especialistas de Parrot y MicaSense (Anexo I), presenta una adecuada proporción calidad-precio; valiendo en la mayoría de los casos menos de la mitad que sus análogos en el mercado como se expuso en el capítulo 1 y completamente especializado para realizar proyectos vinculados a la agricultura de precisión. Su diseño se fundamenta en tres criterios esenciales: una excelente precisión, tamaño y peso reducidos al máximo y una gran facilidad de empleo. Este sensor está diseñado para adecuarse a todas las clases de VANT: aviones de ala fija y multirrotor. Su

empleo posibilita recolectar imágenes de sectores cultivados, en múltiples bandas espectrales (Tabla 2.1), para evaluar el estado de las plantaciones.

2.2.1 Características del sensor Sequoia

- Cámara multiespectral para la agricultura.
- Autocalibrada usando el sensor de irradiación.
- Tasa de toma fotográfica de 1 foto por segundo.
- Posee 4 cámaras espectrales de 1.2 Mpx, tamaño del píxel de 3.75 μm y distancia focal de la lente de 3.98 mm.
- Cámara RGB: 16 Mpx, tamaño del píxel de 1.34 μm y distancia focal de la lente de 4.88 mm.
- Protocolo estándar PTP para la comunicación con los drones.
- Memoria interna de 64 GB.
- Peso: 72g.

Tabla 2.1. Bandas espectrales que pueden ser obtenidas mediante el sensor Sequoia.

Espectro	Longitud de Onda	Ancho de Banda
Verde	550 nm	40 nm
Rojo	660 nm	40 nm
Borde Rojo	735 nm	10 nm
Infrarrojo Cercano	790 nm	40 nm

2.2.2 Sensor de luz

El sensor de luz (Anexo II) brinda la posibilidad de calibrar las imágenes en dependencia de la incidencia solar; de esta forma es posible cotejar imágenes en el tiempo, a pesar de los cambios en la intensidad de la luz durante la toma. El sensor de luz se sitúa en la parte

superior del VANT, de cara al cielo; durante el vuelo, él se alimenta a través del sensor multiespectral. Si los niveles de luz solar varían por cualquier factor, la proporción de luz reflejada de los cultivos variará y los resultados de los datos procesados presentarán distorsiones. Para minimizar los efectos de esta variabilidad de la luz, Sequoia adiciona este segundo sensor. El mismo, detecta continuamente y guarda las condiciones de luz en las mismas bandas espectrales que el sensor multiespectral durante toda la duración del vuelo. Los datos de luz así obtenidos posibilitan validar los valores de las firmas espectrales identificadas. La inclusión de un sensor de sol en la solución Sequoia posibilita su empleo en condiciones ambientales tanto de cielo despejado como nublado, incrementando así la flexibilidad de su uso.

2.2.3 Módulo GPS

Sequoia posee un módulo *GPS* incorporado, mientras que los módulos *GPS* integrados en los VANT posibilitan monitorear su posición durante un vuelo, el módulo *Sequoia GPS* posibilita identificar la posición de cada imagen capturada. El mismo garantiza de forma significativa la precisión de los datos recolectados por el sensor, sin emplear los datos recogidos por la plataforma de transporte: avión, vehículo aéreo no tripulado, tractor, etc. La integración de un módulo *GPS* en el sensor cumple el objetivo de convertir a Sequoia en un sensor completamente autónomo, dispensando así el control de imagen por el piloto automático del VANT.

2.2.4 Unidad de Medición Inercial (IMU)

La *IMU* es una característica única de este sensor. Esta tecnología, instalada por primera vez en un sensor multiespectral, posibilita refinar la precisión de los cálculos de imagen suministrando datos sobre la orientación del sensor. De esta forma, la *IMU* permite remediar variaciones en la orientación del sensor debido a los movimientos del VANT. Por lo tanto, el sensor ya no requiere una cesta estabilizada y puede conectarse directamente a cualquier VANT.

2.2.5 Magnetómetro

El magnetómetro facilita al sensor conservar un rumbo determinado. Operando como una brújula, el magnetómetro suministra una dirección a las imágenes capturadas. Este

elemento facilita que la Sequoia se ajuste a todos los vehículos aéreos, en específico aquellos que no disponen de una interfaz de comunicación con sus sensores de a bordo.

2.2.6 Configuración del sensor. Montaje en el VANT

El sensor Sequoia es posible instalarlo en una base GoPRO estándar. En el marco de GoPro se sitúa la abrazadera a aproximadamente 1/3 del sensor con el fin de poder realizar la conexión de todos los cables. El sensor requiere ser energizado con un voltaje de 5V y una corriente de 2A, para esto se puede emplear un paquete de baterías compatibles o la batería del VANT a través de un regulador de 5V a 2A.

2.2.7 Activación de la cámara

Sequoia dispone de una interfaz Wi-Fi que posibilita definir un procedimiento de disparo de imágenes al sensor, accediendo a una URL web específica en cualquier navegador. Sequoia es también accesible a través del protocolo PTP / PTP-IP a través de USB. Este protocolo posibilita acceder a varias funciones de la cámara, incluyendo la captura y el obturador para el control automático con un software de planificación de vuelo.

La obturación se hace por tiempo, debido al error inherente al sistema GPS (5m) que podría provocar la pérdida de imágenes o el no cumplimiento de los solapes. Esto trae como factor negativo la obtención de un mayor número de imágenes, con el consecuente esfuerzo para su procesamiento.

Modos de captura de imágenes:

- Lapso de tiempo: Los menores valores a los que se puede configurar son de 0,5fps (cuadros por segundo) para los sensores multiespectrales y 1fps para el sensor RGB.
- GPS: Los límites a los valores que es posible configurar son 5 metros (m) como mínimo y máximo de 1 kilómetro.

Extracción de los datos de los sensores:

- Lapso USB: Se emplea el cable micro USB (proveído) para conectar el sensor multiespectral al ordenador. En Windows se accede por “Inicio/Informática/Sequoia/Interno”. Para Mac: Se abre la transferencia de imágenes. De esta manera se ingresa a la memoria interna del sensor multiespectral y se recobran las fotos capturadas durante el vuelo.

- Wi-Fi: Se chequea si la conexión Wi-Fi está disponible. Si no es así, pulsar cuatro veces el botón del sensor multiespectral. El indicador del sensor emite destellos de luz azul cuando la Wi-Fi está activada. Consecutivamente se conecta el ordenador, a la red Wi-Fi: Sequoia_XXXX. Se abre el navegador de Internet y se ingresa a la dirección IP 192.168.47.1, luego en la ficha “Galería” se accede a las fotos recolectadas durante el vuelo.
- Tarjeta SD: Se inserta la tarjeta SD en el ordenador. El sensor de irradiación también puede actuar como un lector de tarjetas SD; para ello, el puerto micro USB del sensor es el ordenador.

Las imágenes se almacenan en la memoria interna o en la tarjeta SD como un archivo GEOTIFF de 10 bits RAW para las 4 bandas y como un archivo JPG de cámara RGB. Acumula 5 imágenes por cada captura fotográfica (una por banda + RGB).

2.3 GPS

El GPS WALKER 2 de Stonex, provee datos fiables con una exactitud centimétrica, en tiempo real. Emplea correcciones SBAS (WAAS, ENOS, etc.) o módulo GPRS para conseguir correcciones diferenciales de red con CORS u otro WALKER 2. Software y datos es posible importarlos fácilmente, empleando conexión USB o tarjeta de memoria SD, que también se emplea para el almacenamiento extendido.

2.3.1 Obtención de los GCP

Los levantamientos topográficos efectuados con estos equipos posibilitan brindar muy buenas precisiones (centimétricas) tanto horizontales como verticales. Esto se consigue mediante los denominados puntos de control en tierra o Ground Control Points (GCP) que son medidos con procedimientos GPS. Un GCP es un objeto que es posible reconocer en una serie de imágenes y posee coordenadas conocidas. El posicionamiento se efectúa mediante instrumentos topográficos convencionales, como las estaciones totales, GPS y GPS-RTK (*Real Time Kinematic Global Position System*); éste último más empleado en estudios de fotogrametría (81, 82).

Sin GCP, todavía se pueden producir ortofotos y modelos 3D, pero en el caso de que las fotos no estén georreferenciadas, el resultado no tendrá escala, carecerá de orientación y no

habrá información de la posición absoluta. Además, el área encuestada en el modelo 3D puede tener un resultado de mala reconstrucción relativa, o simplemente dicho, puede no ser capaz de preservar la forma original del sector sobrevolado. La disponibilidad de GCP en el procesamiento de imágenes aumentará la exactitud absoluta de la imagen en su ubicación geográfica con la menor variación en escala posible. La diferencia de con o sin GCP es de metros a centímetros.

Con la ausencia de GCPs contruidos, GCPs naturales o puntos artificiales también pueden ser elegidos como las esquinas de un bosque, intersecciones de carreteras o afloramientos rocosos. Otro factor a considerar es el color y el contraste del marcador de tierra en comparación con el fondo; puede ser preferible utilizar otro color que no refleje tanto como el blanco. La pendiente del terreno también puede dar una desventaja al determinar el punto central del marcador, ya que el marcador aparecerá sesgado.

En el presente trabajo, se seleccionan la cantidad y la distribución de los puntos de control (GCP) en base al criterio del investigador; debido a que, a la fecha, no existe soporte teórico que establezca la cantidad de puntos de control en tierra, relacionados directamente con el tamaño del terreno, para proyectos de cartografía aérea digital con plataformas VANT. En (82), se recomienda que la cantidad de GCP no sea inferior a 5 puntos distribuidos de manera uniforme. Estos puntos pueden ser de control vertical, horizontal o ambos, y pueden ser identificados mediante targets o puntos de quiebre.

Se ubican 6 puntos de control (GCP), para reconocer y georreferenciar el área total del proyecto y se distribuyen uniformemente, en consonancia con la topografía del terreno. La identificación de los GCP, se ejecuta por medio de unos targets de color blanco y negro diseñados en un círculo de plástico (ver Anexo III), y estos fueron enclavados en los centros de los puntos posicionados con el GPS para tal fin.

2.4 Software para la planificación del vuelo y el procesamiento de las imágenes

Para planificar el vuelo se emplea el software Mission Planner (Anexo IV) que es una estación de control en tierra con todas las funciones de proyecto de piloto automático de código abierto APM (*Multiplatform Autopilot*). Es compatible únicamente con Windows y se puede emplear como una utilidad de configuración o como complemento de control

dinámico de un vehículo autónomo. Mission Planner propone una serie de cámaras, incluida la Sequoia empleada en este proyecto, de las cuales conoce sus características y a partir de estas calcula el recorrido del vuelo y la altura sobre el suelo a la que debe sobrevolar el VANT, lo que es fundamental para recolectar imágenes con la resolución adecuada (36).

En el capítulo anterior fueron evaluados 16 software de disímiles características, presentes en el mercado del procesamiento de imágenes. De ellos 3 tienen características superiores al resto en cuanto a especialización en agricultura de precisión y más concretamente en el cálculo de índices de vegetación que es una de las directrices de este proyecto. Estos software son Agisoft PhotoScan, QGIS y Pix4D Ag, los cuáles serán detallados con mayor detenimiento en los epígrafes a continuación.

2.5 Agisoft Photoscan

Agisoft PhotoScan es una solución de software propietario de fotogrametría, para generar modelos de textura poligonales, ortomosaicos georreferenciados y DEMs / DTMs (Modelos Digitales del Terreno). En la Tabla 2.2 se presentan las características del hardware para el uso de Agisoft PhotoScan.

Tabla 2.2. Requerimientos de hardware para el software Agisoft Photoscan

Configuración	Básica	Avanzada	Extrema
CPU	Dual-core Intel Core 2 Duo	Quad-core Intel Core i7	dual socket Intel Xeon Workstation
RAM	DDR3-1600, 4-8GB	DDR3-1600, 16-32GB	DDR4-2400, 64 GB
GPU	AMD o NVidia posterior al año 2008 compatibles con OpenGL 3.2	NVidia GeForce GTX 780 o GeForce GTX TITAN	GTX 980, TITAN BLACK

2.5.1 Flujo de trabajo con Agisoft PhotoScan

Añadir fotos:

Se selecciona el comando “*Add Photos*” desde el menú “*Workflow*” y se localiza la carpeta que guarda las imágenes para seleccionar los archivos deseados.

Cargar datos GPS y ángulos de las imágenes:

En este paso el sistema de coordenadas se ajusta a las posiciones de la cámara para el futuro modelo. Si las imágenes están georreferenciadas, no es necesario este paso. La forma más simple es cargar archivos de texto que contienen las coordenadas X, Y, Z para cada posición de la cámara (datos de orientación de la cámara, es decir los valores del cabeceo, balanceo y guiñada). Estos archivos son suministrados por el propio software utilizado para crear el plan de vuelo, Mission Planner.

Para generar este archivo se abre uno de los menús con *ctrl + f* (Figura 2.2) y se selecciona la opción “*geo ref images*”, en el cuadro de dialogo emergente en “*Browse Log*” para examinar la ubicación del archivo .BIN, preliminarmente descargado desde la memoria del controlador de vuelo, y luego en “*Browse Pictures*” para adicionar la carpeta de imágenes. Posteriormente se selecciona “*Pre-process*” y se comprueba que la cantidad de imágenes concuerde con el número de mensajes CAM presentes en el archivo .BIN; si no existe tal correspondencia es preciso ejecutar ajustes. Con clic en “*Location Kml*” es creado el archivo .txt que posee la información GPS y los ángulos de las cámaras.

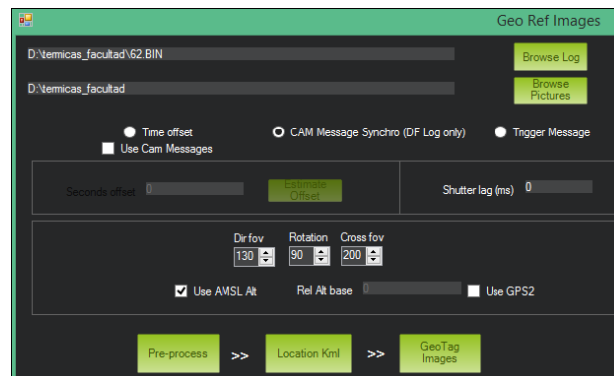


Figura 2.2. Menú de Mission Planner para georreferenciar imágenes.

En el menú “*View*” de PhotoScan, se abre “*Ground Control*” y en “*Import*” se elige el archivo *txt* anteriormente creado. Es trascendental escoger el sistema de coordenadas correcto, así como verificar el orden de las columnas de los datos importados (Anexo V).

Introducir los Puntos de control en tierra (GCP)

Los puntos de control en tierra es posible crearlos a través del panel de “*Reference*”, mediante el comando “*Create Markers*” (Figura 2.3), o es posible cargarlos desde un archivo de texto a través del comando “*Import*”, considerando siempre el orden de las coordenadas de los mismos. La georreferenciación de los modelos, se concibe a través de los targets ubicados en el terreno a la hora del vuelo, para lo cual se realiza la identificación de los mismos en dos *frames* inicialmente, luego el programa correlaciona la localización de dichos puntos en los *frames* siguientes, y aproxima una ubicación que es posicionada adecuadamente por el usuario.

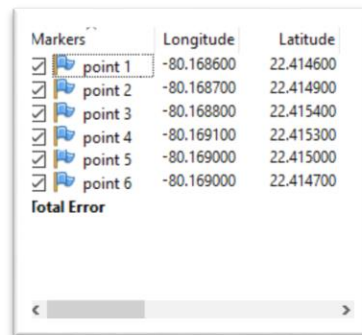


Figura 2.3. Introducción de puntos de control mediante el software Agisoft Photoscan.

Introducir distancias entre los marcadores

Para conseguir una superior georreferenciación y precisión en los ortomosaicos, es vital disponer de las distancias entre los marcadores. En el panel de “*Reference*” con el comando “*create scale bars*”, el usuario establece las distancias preliminarmente obtenidas en el terreno entre los distintos *markers* (Figura 2.4).

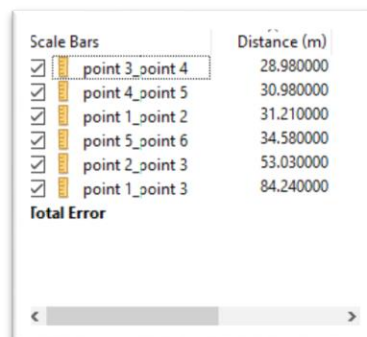


Figura 2.4. Introducción de distancias entre los puntos de control mediante el software Agisoft Photoscan.

Alinear Fotos:

Una vez que las imágenes se cargan en PhotoScan deben ser posteriormente alineadas. En esta etapa el software encuentra la posición de la cámara y la orientación de cada fotografía y genera un modelo de nube de puntos dispersos. Esto lo realiza calculando el solapamiento entre imágenes, que debe ser aproximadamente de 60% lateral y 80% frontal, y por las coordenadas del GPS. Para alinear un conjunto de fotos se elige el comando “*Align Photos*”... desde el menú “*Workflow*” y se escogen las opciones de alineación que se desean.

Optimizar la alineación de las imágenes:

Esta funcionalidad se debe aplicar para conseguir una precisión superior en el cómputo de los parámetros externos e internos de la cámara y para corregir posibles distorsiones. Este paso se recomienda principalmente si las coordenadas de la cámara cuentan con una precisión alta. Se pulsa el botón “*Settings*” del panel “*Ground Control*” y en la opción “*Ground Control Settings*”, se elige el correspondiente sistema de coordenadas de la lista.

Construcción de nube de puntos densa:

En la fase de reconstrucción de la nube de puntos densa, PhotoScan genera mapas de profundidad para cada fotografía. Debido a ciertos factores, como una deficiente textura de varios elementos de la escena, ruidos o imágenes mal centradas, es posible que aparezcan valores atípicos entre los puntos. Para ordenar los valores atípicos, PhotoScan posee diversos algoritmos de filtrado que responden a los desafíos de los disímiles proyectos. Se elige “*Build Dense Cloud*” en el menú “*Workflow*” y se seleccionan los parámetros de acuerdo a los requerimientos.

Construcción de la malla poligonal:

Luego de componer la nube de puntos densa es viable obtener el modelo de malla poligonal basado en los datos de nubes densas. Se selecciona “*Build Mesh*” en el menú “*Workflow*” y se fijan los parámetros recomendados.

Construcción de la Textura:

Este paso no es imprescindible en el flujo de trabajo de exportación de ortofotos, pero en ocasiones es necesario evaluar un modelo texturizado antes de exportarlo o podría ser útil

para la colocación exacta de marcadores. Se escoge el comando “*Build Texture*” en el menú “*Workflow*” y se instituyen los parámetros recomendados.

Generar la Ortofoto:

Se elige el comando “*Export Orthophoto*” en el menú “*File*” y se instauran los parámetros recomendados.

Generar DEM (Modelo digital de elevaciones):

Para exportar el DEM se selecciona el comando “*Export DEM! Export GeoTIFF / BIL / XYZ*” en el menú “*File*” y se establecen los parámetros recomendados.

Mediciones de volúmenes, áreas y distancias en las ortofotos:

Para medir la distancia entre dos puntos se elige la herramienta “*Draw Polyline*” y con un clic en el punto del modelo se comienza la medición y con doble clic en el punto que termine se establece la distancia deseada; con clic derecho sobre la línea y el comando “*Measure*”, se muestra automáticamente la distancia entre dichos puntos. Para calcular el volumen se escoge un polígono, el cual es dibujado con el clic izquierdo por todo el contorno de la región deseada, cerrando la misma con doble clic. Con clic derecho sobre la región enmarcada y el comando “*Measure*”, se consiguen los valores de volumen y área de dicho sector.

2.5.2 Cálculo de índices vegetativos

Para calcular los índices vegetativos se emplea la herramienta “*Raster Calculator*” (Figura 2.5) que aparece en la barra de menús luego de creado el ortomosaico; en el cuadro de diálogo emergente, se establece la fórmula del índice vegetativo deseado.

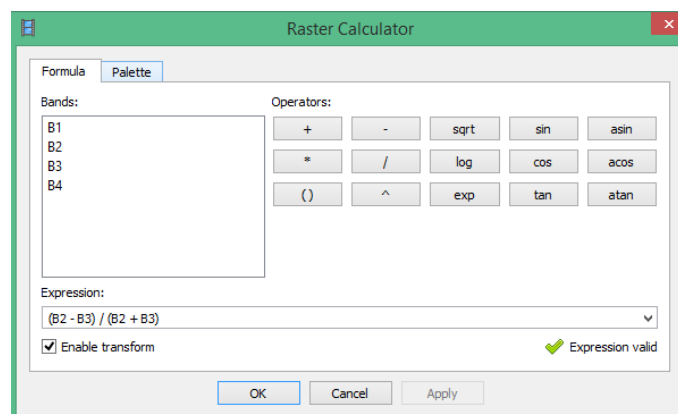


Figura 2.5. Calculadora de índices vegetativos en Agisoft Photoscan.

2.5.3 Procesamiento en red

Es posible configurar Agisoft PhotoScan para realizar el procesamiento en un clúster, donde el trabajo se distribuye en varios nodos de ordenadores interconectados a una red local. De esta forma, varias instancias de PhotoScan se ejecutan en varios nodos de procesamiento y son capaces de ejecutar la misma tarea en paralelo, disminuyendo consiguientemente el tiempo total de cómputo. La comunicación entre los nodos de procesamiento, el servidor y los clientes se efectúa mediante conexiones TCP. Además, el almacenamiento de red compartida es accesible para todos los nodos de procesamiento; los clientes se emplean para recopilar los datos de origen y los resultados del procesamiento intermedio (Anexo VI).

2.5.4 Configuración del clúster para procesar en red mediante Agisoft Photoscan

Primeramente, es necesario asegurarse que los nodos de procesamiento y los clientes tengan la misma ruta de almacenamiento de red compartida.

Inicialización del servidor:

Se recomienda configurar el servidor con una dirección IP estática. Se necesitará esta dirección IP en cada nodo de procesamiento. El proceso de inicialización se puede realizar ejecutando en Agisoft PhotoScan las siguientes líneas de comandos.

```
photoscan --server --control <ip>[: port] --dispatch <ip>[:port] [--root prefix]
```

server- parámetro que especifica que se debe iniciar en un modo de servidor.

control- parámetro que especifica la interfaz de red que se utiliza para la comunicación con los clientes. En caso de omitir el valor del puerto, se utiliza el puerto por defecto 5840.

dispatch- parámetro que especifica la interfaz de red que se utiliza para la comunicación con los nodos de procesamiento. En caso de omitir el valor del puerto, se utiliza el puerto por defecto 5841.

root- parámetro que se puede utilizar para especificar el punto o prefijo de ruta, en caso de que no sea la misma del almacenamiento en red.

Inicialización de la red de nodos:

El nodo de procesamiento se puede iniciar mediante la ejecución de las siguientes líneas de comando:

```
photoscan --node --dispatch <ip>[:port] [--root prefix]
```

node- parámetro que especifica que debe iniciarse como un nodo de procesamiento.

dispatch- parámetro que especifica la dirección IP del servidor para conectarse. En caso de omitirse el valor del puerto, se utiliza el puerto por defecto 5841.

root- parámetro que se puede utilizar para especificar el punto o prefijo de ruta, en caso de que no sea la misma del almacenamiento en red.

Inicialización del procesamiento en red:

1. Configurar Agisoft PhotoScan para el procesamiento de red.

Primeramente, se inicializa Agisoft PhotoScan en cualquier ordenador conectado a la red de clústeres. Luego se abre “*Preferences dialog*” con el comando “*Preference*” de la barra de herramientas, se comprueba que el procesamiento en red esté habilitado y se especifica la dirección IP del servidor utilizado.

2. Preparar el proyecto de procesamiento de la red.

Para llevar a cabo la preparación del proyecto se vuelve a guardar el proyecto en una carpeta en formato de almacenamiento de red compartida (*.psx). Es importante chequear que las imágenes de origen se encuentran en el almacenamiento de red compartida y no en un disco duro local.

3. Inicio del procesamiento.

Comenzar a procesar mediante el comando correspondiente del menú de “*Workflow*”, o con el comando “*Batch Process*” para ejecutar una secuencia de comandos. Debe aparecer un cuadro de diálogo mostrando el progreso actual.

Puede desconectarse del servidor en cualquier momento utilizando el botón “*Disconnect*” en el cuadro de diálogo “*Network Progress*” en caso de tener que trabajar en otros proyectos, el proceso continuará en el fondo. Para monitorear el estado de procesamiento después de desconectarse del servidor, abrir el proyecto .psx en el almacenamiento de red.

4. Guardar el resultado del procesamiento como proyecto .psz.

Una vez que se haya completado el procesamiento, se puede volver a guardar el proyecto en formato .psz. En caso de que se haya desconectado del servidor, es necesario abrir el proyecto .psz y a continuación, guardarlo en un lugar deseado seleccionando el tipo de archivo PhotoScan Project Files (*.psz).

2.6 QGIS + SAGA ToolBox

QGIS conocido anteriormente como “Quantum GIS” es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Admite manejar formatos ráster y vectoriales a través de sus bibliotecas, así como bases de datos. Está desarrollado en C++, empleando la biblioteca Qt para su interfaz gráfica de usuario. Como software de código abierto facilita la integración de plugins desarrollados tanto en C++ como Python.

El SAGA *Toolbox* es una librería para el trabajo con imágenes censadas remotamente. Sus módulos son desarrollados como *plugins* de procesamiento para QGIS, estando los algoritmos de SAGA disponibles en QGIS a través del framework “Caja de herramientas”; este *Toolbox* posee una licencia libre al igual que el software.

Funcionalidades: Al igual que en otros software de sistemas de información geográfica, QGIS posibilita a los usuarios realizar mapas con múltiples capas con disímiles proyecciones. Los mismos pueden ser cargados en formatos variables y para distintos usos. QGIS posibilita que los mapas sean compuestos de capas de mapa de bits o vectoriales. Típico de este tipo de software, los datos vectoriales se guardan, ya sea como puntos, líneas o polígonos. Disímiles variedades de imágenes de mapa de bits son compatibles, y el software es capaz también de georreferenciar imágenes.

Requerimientos del software: Es un software multiplataforma siendo compatible con los sistemas operativos Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Ya en la versión 2.4 tiene soporte completo para procesamiento multihilos, o sea que se recomiendan procesadores de 4 o más núcleos.

Costo económico: QGIS es un software libre de código abierto, siendo la mejor herramienta GIS en la comunidad FOSS. El mismo tiene una licencia pública general GNU GPL por lo que su adquisición es gratuita.

Es válido aclarar que el QGIS no es capaz de construir un ortomosaico a partir de las imágenes recolectadas por un sensor. Necesita que se le cargue un ortomosaico ya reconstruido por otro software para a partir de este poder ejecutar todas sus funcionalidades.

2.6.1 Flujo de trabajo para el cálculo de índices vegetativos con QGIS

Para obtener los índices vegetativos, el software QGIS posee dos herramientas principales; la Calculadora ráster y el SAGA Toolbox. Mediante las mismas se efectúan una serie de pasos que serán presentados a continuación para lograr los resultados deseados.

Primeramente, se ejecuta QGIS Lyon. Desde el menú proyecto se da clic en “*Guardar*”, localizándose la carpeta en la que se desea salvar el proyecto.

Para añadir fotos:

En el “*Panel del explorador*” se localiza la carpeta donde están las imágenes y se escogen las que le serán calculadas los índices vegetativos. Estas imágenes serán cargadas en el “*Panel de capas*” (Anexo VII).

Es importante que el formato de las imágenes sea GeoTIFF georreferenciado, debido a que este formato no presenta compresión alguna; o sea, que en el mismo no se pierde información al digitalizar la imagen, no siendo así, por citar un ejemplo el caso del formato “JPG”. Además, como este formato posee la información georreferencial incluida, es ideal para la generación de mapas de aplicación variable en la agricultura.

Extraer las bandas de las fotos multiespectrales:

En “*Bandas ráster*” se mostrarán todas las *bandas ráster* que conforman todas las imágenes cargadas en el “*Panel de Capas*”. Es vital conocer el espectro de las bandas de cada foto, ya que si se extraen de forma errada (por ejemplo, la banda NIR sea extraída como Roja) según la fórmula del índice, el mismo será calculado equivocadamente. Se da doble clic sobre la banda que se desea extraer y la misma aparecerá en la “*Expresión de la calculadora de campos*”. En el menú “*Capa de resultado*” se accede al submenú “*Capa de*

salida”, se escoge la carpeta donde se quieren guardar las capas y se escribe el nombre de la capa. El formato de salida por defecto es GEOTIFF, pero esto puede ser variado por el usuario.

Calcular los índices vegetativos mediante fórmulas:

En este paso se realiza el cálculo de los índices mediante la herramienta “*Calculadora ráster*” (Figura 2.6). En el caso del presente proyecto el índice GNDVI no es posible calcularlo mediante SAGA por lo que sus fórmulas serán introducidas en la “*Calculadora ráster*”.

Se abre la “*Calculadora ráster*” y se eligen las bandas; estas imágenes previamente debieron ser cargadas en el “*Panel de capas*”. En este caso será calculado como ejemplo el NDVI por lo que se cargarán las bandas Roja y NIR. En “*Capa de salida*” se editan la dirección y el nombre del archivo a generar. Se define el *Formato de salida*, que debe ser GEOTIFF. Se escribe la fórmula del índice a calcular en “*Expresión de la calculadora de campos*”, teniendo especial cuidado en los paréntesis y las comillas de la expresión.

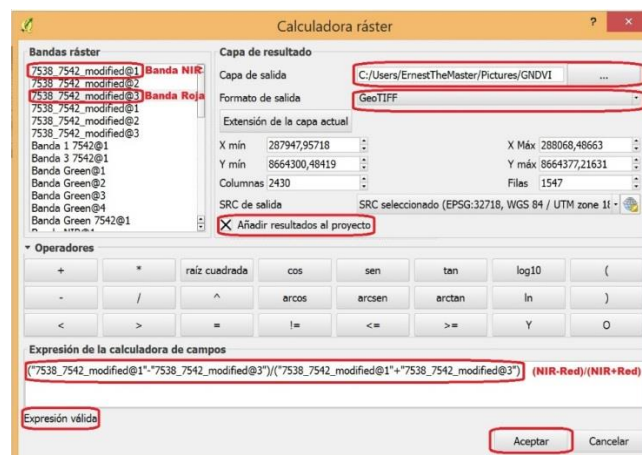


Figura 2.6. Herramienta Calculadora Ráster del software QGIS.

Editar los Índices Vegetativos:

En este paso se modifican los índices vegetativos obtenidos en dependencia del tipo de cultivos, la lectura que se desee potenciar en la imagen, entre otras características, con la edición de una leyenda en colores, debido a que las imágenes son obtenidas en escalas de grises.

Se selecciona la imagen que se desee editar en el “*Panel de capas*”, en “*Propiedades de la capa*” se elige la pestaña “*Estilo*” y posteriormente en “*Tipo de renderizado*” la opción “*Unibanda pseudocolor*”. En “*Interpolación del color*” se escoge si la banda de colores será *Lineal* o *Discreta*, precisando si la escala de los colores variará de forma continua en la imagen, o sólo serán elegidos los colores prefijados por el usuario (Anexo VIII).

2.7 Pix4D

Pix4D es un software para el completo procesamiento de imágenes que permite convertir miles de imágenes 2D en mosaicos georreferenciados y modelos 3D. El software Pix4D procesa automáticamente las imágenes terrestres y aéreas capturadas por los VANT. En la Tabla 2.3 se muestran las características del hardware necesarias para el uso de software Pix4D.

Tabla 2.3. Características del hardware para el uso del software Pix4D.

Configuración	Básica	Avanzada	Extrema
CPU	Quad-core Intel core i7	Exa-core Intel core i7	Octa-core Intel core i7
RAM	DDR4-2400, 16 GB	DDR4-2400, 32 GB	DDR4-2400, 64 GB
GPU	NVidia Geforce 2-4 GB	NVidia GTX 770, GTX 970, GTX 780 T	GTX 980, TITAN BLACK

2.7.1 Flujo de trabajo con Pix4D

Para generar un nuevo proyecto se inicia Pix4Dmapper, en la barra de menús, en “*Project*” > “*New Project*”, se asigna un nombre al proyecto; en el nombre y la ruta del proyecto no pueden utilizarse caracteres especiales (véase Anexo IX).

1. Añadir fotos

En la ventana “*Select Images*”, en “*Add Images*” se adicionan las imágenes (Anexo X); estas no deben contener ningún símbolo, como los sellos de fecha y hora, no se deben editar manualmente, es decir, no deben ser escaladas, giradas, etc. Las imágenes tomadas durante el despegue o aterrizaje no deben emplearse.

2. Introducir los GCP

Para adicionar un GCP, en la barra de menú, se accede a “*Project > GCP/MTP Manager*” (Figura 2.7); para seleccionar el sistema de coordenadas GCP (de forma predeterminada, el sistema de coordenadas GCP será el mismo que el sistema de coordenadas de salida GCP escogido al crear el proyecto). Si los GCP poseen un sistema de coordenadas diferente, se elige el sistema de coordenadas correcto, y luego se importan las coordenadas de los GCP. Las coordenadas de los GCP es posible importarlas manualmente, una por una; o desde un archivo comprensible por Pix4Dmapper.

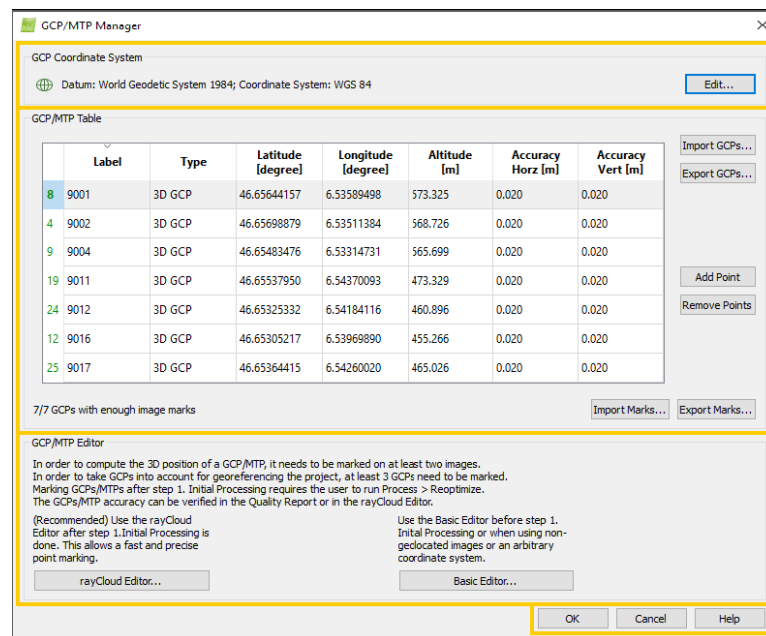


Figura 2.7. Opciones para introducir GCP mediante el software Pix4D.

Para importar las coordenadas GCP una por una, en el “*GCP > MTP Manager*”, se marca en “*Add Point*” y se editan las propiedades del GCP, eligiendo el tipo de GCP y se fijan las coordenadas del punto (X, Y, Z o Latitud, Longitud, Altitud). Para importar las coordenadas del archivo GCP, es necesario que el archivo tenga el formato de entrada correcto. En la ventana “*GCP > MTP Manager*”, se elige “*Import GCPs*” y aparecerá el

menú emergente “*Import Ground Control Points*”. Se escoge el orden de coordenadas; por defecto, se selecciona X, Y, Z (latitud, longitud, altitud). Luego se selecciona el archivo GCP que contiene las coordenadas.

Una vez determinados los GCP, es posible corregir los puntos en las imágenes. Empleando el “*Basic Editor*”, es preciso chequear la presencia del punto foto a foto. A través del “*rayCloud Editor*” el procedimiento es más sencillo, puesto que el software detecta todas las imágenes donde aparece el punto deseado y solo hay que corregir su ubicación.

3. Generar ortofotos y DEM

Las opciones de procesamiento son elegidas en el menú “*Processing Options*” (Anexo XI) y para iniciar a procesar el proyecto, en la barra de menús, se elige en “*View > Processing, Initial Processing, Point Cloud and Mesh, Orthomosaic and Index*” (Figura 2.8).

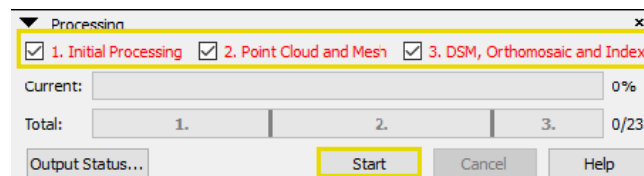


Figura 2.8. Ventana para inicializar por etapas el procesamiento en Pix4D.

Una vez terminado el procesamiento inicial es vital hacer un chequeo del informe de calidad (Quality Report), para verificar si todas o casi todas las imágenes se calibran en un bloque, si la diferencia relativa entre los parámetros internos de la cámara, iniciales y optimizados, es menor al 5%, que el error GCP sea inferior a 3 x GSD y todos los GCP se hayan tenido en cuenta, que las geolocalizaciones de las imágenes corresponden con las del plan de vuelo y que se hayan computado suficientes coincidencias entre las imágenes.

2.7.2 Uso de la barra de menú rayCloud para mediciones de distancias, áreas y volúmenes

La barra de menú “*rayCloud*” ofrece varias herramientas para la estimación de superficies enmarcadas en los ortomosaicos a trabajar (Figura 2.9). La herramienta “*New Polyline*” permite trazar una línea continua compuesta por una o más sublíneas que se establecen especificando los vértices de cada línea y así efectuar mediciones de distancias. La opción de “*New Surface*” permite crear objetos, se emplea para definir áreas planas. La

herramienta de “*New Volume*” se emplea para cálculos de volumen; se define por una superficie 3D llamada base. El volumen se calcula entre la base y la superficie del terreno.

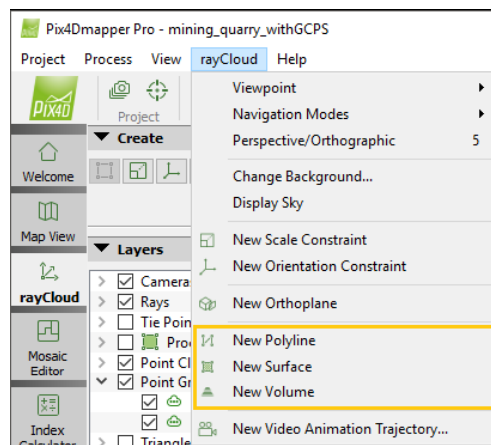


Figura 2.9. Interfaz para definir superficies medibles en Pix4D.

2.7.3 Cálculo de índices vegetativos

Para acceder a la calculadora de índices vegetativos (Figura 2.10), se busca en la barra de menú “*View / Index Calculator*”. Se utiliza un DSM para obtener los mapas de reflectancia que se obtienen para cada banda de cada grupo de imágenes, pero sólo se crea un DSM, independientemente del número de imágenes. Estos contienen los valores de reflectancia de cada píxel y se emplean para formar los mapas de índices, que se calculan manejando algunas bandas específicas de uno o más grupos de imágenes. Los mapas de índice de colores se constituyen aplicando las reglas de coloración definidas.

Con el objetivo de calcular el índice vegetativo de un área específica del campo se debe realizar un procedimiento previo en las regiones 2 y 3 de la calculadora que consisten en:

- Creación de la región de estudio: se añade una nueva región en la sección “2. Regions” haciendo click en el botón “*Regions*”, y luego se dibuja en el campo la región mediante la herramienta “*Draw*”.
- Selección del índice vegetativo a calcular: se selecciona el índice a calcular en el combobox presente en la sección “3. Index Map”.
- Obtención de los datos: se procede a realizar el cálculo pulsando el botón “*Generate*” de la región “3. Index Map”, donde se visualizan también los resultados del cálculo realizado.

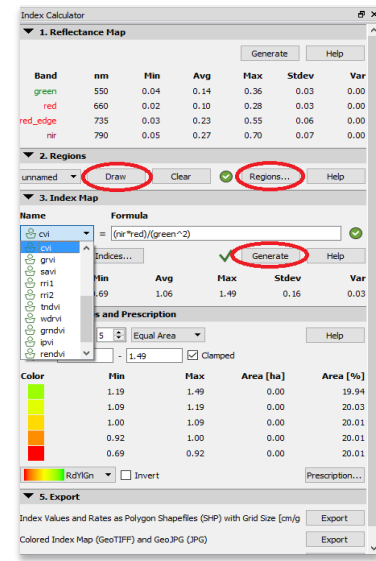


Figura 2.10. Interfaz para generar los mapas de índices vegetativos en Pix4D.

2.8 Procedimiento general para la toma y procesamiento de imágenes aéreas NIR e IR con vistas a calcular índices vegetativos

El flujo de trabajo para obtener de manera satisfactoria imágenes NIR e IR a partir de las cuales se realice el cálculo de índices vegetativos consiste en 5 pasos fundamentales.

2.8.1 Diseño del Plan de Vuelo

Primeramente, se realiza el plan de vuelo. En este se define la altura a volar por el VANT, la cual estará determinada por el sensor, la resolución que se pretende obtener (o la escala), de la orografía del terreno y la distancia de muestreo del suelo (GSD) que se desee obtener en las fotos. Además, la trayectoria trazada debe tener en cuenta el ángulo de visión de la cámara para asegurar una buena superposición de las imágenes. Las condiciones meteorológicas son fundamentales también, siendo un ambiente óptimo el soleado y con vientos de poca velocidad, ejecutándose el vuelo de forma autónoma (excepto el despegue y el aterrizaje). Teniendo en cuenta estos requisitos, mediante el software Mission Planner no solo se programará la ruta, sino las velocidades de ascenso o desplazamiento y los ángulos de giro del avión entre otros parámetros.

2.8.2 Apoyo Topográfico

La georreferenciación es la técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas y geometría de referencias específicas. Es una operación habitual dentro del sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) tanto para objetos ráster (imágenes de mapa de píxeles) como para objetos vectoriales (puntos, líneas, polilíneas y polígonos que representan objetos físicos) (14).

Con el objetivo de realizar una correcta georreferenciación de las imágenes, es necesaria la obtención de posiciones precisas de determinados puntos sobre el terreno. Estos puntos servirán para transformar el modelo fotogramétrico en el modelo del terreno. La precisión de los puntos de apoyo está acorde con la escala del producto. Además de captar la posición de los puntos sobre el terreno, estos también deben identificarse claramente en las fotografías, para poder establecer una correcta correlación. Para su obtención, dependiendo de la zona de estudio y de la escala, se reparten estratégicamente unas dianas en la zona de trabajo para que en las fotos aparezcan claramente identificados los puntos de apoyo y de esta manera minimizar errores de apreciación. Esta técnica se ha importado de la fotogrametría aérea convencional y es utilizada en el flujo de trabajo de muchos software de la actualidad.

2.8.3 Toma Fotográfica

Simultáneamente a la fase anterior, se toman las fotos. Siguiendo el plan de vuelo, se ejecutará la ruta donde se realizará la captura de imágenes. Se podrá visualizar en la PC en tiempo real toda la información de telemetría, estado del aparato y posición del mismo mediante GPS. Tras finalizar el plan de vuelo se realizará la descarga de las fotografías y los datos de telemetría de vuelo, para el posterior procesamiento de dicha información.

Para poder trabajar con las fotografías resultantes, los centros de las mismas tienen que tener una desviación mínima tomando como referencia la vertical del avión; no obstante, las cámaras que se utilizan en los trabajos fotogramétricos tienen una calibración óptima de este parámetro. El sensor Parrot Sequoia será capaz de tomar las fotos deseadas, teniendo en cuenta el solapamiento deseado entre las fotos y la resolución de la superficie del suelo en las imágenes.

2.8.4 Procesamiento de las Imágenes Multiespectrales

Una vez tomadas las fotografías (con sus parámetros asociados que aparecen en la telemetría descargada) y obtenidas las coordenadas de los puntos de apoyo, se realiza el cálculo de los parámetros de orientación de cada una de las fotografías. Al proceso de cálculo se le denomina aerotriangulación, el resultado de este proceso es la obtención de los parámetros de orientación externos de cada una de las fotografías. Con estos datos, se hace posible la obtención de un ortomosaico multiespectral con un alto nivel de exactitud; la cual es fundamental para su aplicación en AP, debido a las altas GSD utilizadas en estos estudios.

2.8.5 Cálculo de Índices Vegetativos

A partir del ortomosaico multiespectral generado anteriormente se calculan los IV con el software seleccionado. Según el IV serán las bandas del espectro a utilizar; por ejemplo, si se calcula NDVI, la banda Roja y la NIR serán las empleadas y las demás no se utilizarán debido a que no están presentes en la fórmula matemática de dicho índice.

2.9 Consideraciones finales del capítulo

Para obtener la ejecución satisfactoria de una misión con VANT, es vital la elaboración previa de un plan de vuelo. Luego de evaluar todos los elementos que van a integrar la misión, se establece la trayectoria, la altura y la velocidad del vuelo y se concibe un procedimiento donde se puntualiza el conjunto de medios precisos y la forma de emplearlos para conseguir una ejecución del vuelo satisfactoria.

- Las herramientas fundamentales en la captura y procesamiento de las imágenes multiespectrales: el VANT, el sensor y el software de procesamiento deben trabajar como un conjunto, para garantizar resultados adecuados en el cálculo de los índices vegetativos. En este proyecto fue seleccionado el VANT 3DR RTF X8+ y el sensor Sequoia los cuales son perfectamente acoplables para efectuar las labores de mapeo a una altura relativamente baja de 40 metros logrando una GSD y un solapamiento de las imágenes adecuado para el procesamiento por parte de los software elegidos, Agisoft PhotoScan, Pix4D y QGIS.

- Las exigencias de CPU, tarjeta gráfica, memoria RAM y almacenamiento, que precisan estos software, también dependen de la magnitud del proyecto, así como del número de imágenes a procesar y su calidad.

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA Y EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES

En este capítulo se presentan las características técnicas de los dos experimentos de caña de azúcar sobrevolados en la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar, el flujo de trabajo empleado para el procesamiento de imágenes multiespectrales, y las soluciones propuestas para la obtención de los ortomosaicos georreferenciados de los sembrados sobrevolados. Se evalúan los software de procesamiento propuestos en el capítulo 2 en cuanto a facilidad de uso, tiempo de procesamiento y calidad visual del producto y se definen las condiciones de vuelo del VANT para un adecuado procesamiento de las imágenes recolectadas con la cámara multiespectral Parrot Sequoia.

3.1 Zona de estudio

Las pruebas se realizaron en la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA), que se encuentra en el municipio de Ranchuelo de la provincia de Villa Clara, en el Km 246 de la Autopista Nacional. El objetivo esencial de esta entidad es dar respuesta a las necesidades que plantean las provincias centrales con respecto a la producción cañera, por lo que su principal misión es diseñar, validar y ejecutar proyectos de ciencia e innovación tecnológica que contribuyan a obtener producciones de caña de azúcar de más calidad y a menor costo, con criterios de sostenibilidad del agro ecosistema y de adaptación a los cambios climáticos, así como programas de alcance provincial y territorial.

Las pruebas y estudios presentados en este trabajo enriquecen el servicio del ordenamiento territorial de la estación; el cual permite desarrollar e implementar un sistema geoespacial que a través de información temática sobre suelos, cultivos, vegetación e infraestructura

sirva de soporte a la toma de decisiones en las unidades productoras de la provincia. Se sobrevolaron dos campos experimentales de caña de azúcar en las instalaciones de la ETICA; el experimento de variedades nombrado VCV-1-05 y el de dosificaciones varias de nitrógeno llamado VmNn-18.

3.1.1 Características del experimento de variedades VCV-1-05

El terreno sobrevolado contaba con un campo de caña de catorce meses (fase de maduración), sembrado con catorce variedades diferentes (Figura 3.1), y otro campo de caña de seis meses (fase de crecimiento) sembrado con veinticinco variedades (Figura 3.2); las variedades fueron sembradas en un diseño de bloques al azar, en condiciones de secano. Cada variedad ocupa una parcela que mide 6,4 m de largo y 6,4 m de ancho (41 m²), las parcelas están formadas por cuatro surcos, con un surco de barrera en ambos laterales. La dosificación del campo de catorce meses fue 217.39 kg / ha de Urea, 212.76 kg / ha de superfosfato triple, 333.33 kg / ha de KCL (Cloruro de potasio). Al campo de seis meses se le suministraron 212.76 kg / ha superfosfato triple y 333.33 kg / ha de KCL. El suelo donde se desarrolló este experimento se clasifica como Vertisol Pélico.

C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12
C1051-73	C05-178	C05-249	C05-166	C05-237	C86-12	C05-250	C05-181
C05-237	C05-166	C05-250	C05-181	C05-234	C05-171	C05-249	C05-178
C05-250	C86-12	C1051-73	C05-178	C05-229	C05-167	C05-237	C05-172
C05-249	C05-172	C05-237	C86-12	C05-186	C05-166	C1051-73	C05-171
C05-186	C05-167	C05-229	C05-172	C1051-73	C05-181	C05-234	C86-12
C05-234	C05-181	C05-186	C05-171	C05-249	C05-178	C05-229	C05-167
C05-229	C05-171	C05-234	C05-167	C05-250	C05-172	C05-186	C05-166
C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12

Figura 3.1. Diseño de bloques al azar con las 4 réplicas en que fueron sembradas las variedades de 14 meses del experimento VCV-1-05.

R III					R II					R I				
C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12
C266-70	C323-68	C90-530	C88-380	My5514	Co997	C85-102	B80250	C92-325	C86-156	SP70-1284	B7274	C89-147	C86-56	C120-78
C46-12	CP52-43	C86-456	C86-156	C90-469	C86-503	C120-78	C137-81	C89-147	C90-530	My5514	C92-325	C88-380	C86-12	C1051-73
C86-12	C86-12	C87-51	Co997	C89-147	C1051-73	C90-317	My5514	C323-68	C86-56	CP52-43	C90-530	C86-503	C85-102	C266-70
C1051-73	B7274	B80250	C90-317	C85-102	C87-51	SP70-1284	C266-70	C86-12	C88-380	Co997	C90-469	C86-456	C137-81	C323-68
C86-56	C86-503	C92-325	SP70-1284	C120-78	C86-12	C86-456	B7274	CP52-43	C90-469	B80250	C90-317	C86-156	C132-81	C87-51
C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12	C86-12

Figura 3.2. Diseño de bloques al azar con las 3 réplicas en que fueron sembradas las variedades de 6 meses del experimento VCV-1-05.

En la figura 3.3 se puede apreciar enmarcado en las flechas azules el campo de variedades de 14 meses ya maduro, en la parte inferior de la imagen se puede visualizar parte del campo de 6 meses en verde claro.



Figura 3.3. Ortofoto RGB del experimento VCV-1-05 reconstruida con Pix4D.

3.1.2 Características del experimento de nitrógeno VmNn-18

En Cuba la caña de azúcar se fertiliza inmediatamente después del corte o lo más próximo posible a este; por esa razón la caña que se fertiliza ni siquiera ha brotado, el año de crecimiento está por transcurrir y con él las condiciones en las que se desarrollará el cultivo (clima, malezas, plagas, enfermedades, entre otros). Además debido a problemas logísticos el rendimiento del campo se infiere con al menos cuatro meses de antelación a la cosecha, lo que hace del rendimiento esperado más que una estimación sea una predicción. A ello se

une el falso criterio de que la solución para los campos de bajo rendimiento es una elevada aplicación de nitrógeno, lo que provoca que se declare un rendimiento superior en los peores campos. Todo esto hace que el estudio del efecto del nitrógeno en las zonas cañeras sea de sumo interés para la ETICA.

El experimento (VmNn-18) viene realizándose desde el 25 de mayo de 1986, y se encuentra ahora en su quinto ciclo, que fue sembrado el 16 de junio de 2017, encontrándose por tanto en la etapa de “caña planta” (primera germinación, sin haber realizado aún ningún corte). El campo se sobrevoló tres veces entre el 29 de enero y el 10 de abril del 2018; cuando la caña estaba en el “gran período de crecimiento” (entre los tres y siete meses luego de la siembra). Los ensayos fueron conducidos según las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). Se aplicaron dosificaciones crecientes de nitrógeno a 10 parcelas de caña de la variedad C 86-12; los niveles estudiados de nitrógeno variaron desde 0 – 200 Kg / ha de nitrógeno, excepto la primera parcela que no poseía ningún tipo de fertilizante.

En cepas de caña planta el fertilizante se aplicó en el fondo del surco al momento de la plantación. Los portadores nitrogenados utilizados fueron indistintamente urea, nitrato de amonio y sulfato de amonio. Los portadores para los fondos de fósforo y potasio fueron: superfosfato sencillo, superfosfato triple y cloruro de potasio. Las parcelas experimentales tienen cuatro surcos de 7.5 m de largo, separados a 1.60 m, con un área total de 48 m². Las muestras del suelo se tomaron en los primeros 25 cm de profundidad del perfil, según las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica de la INICA; el tipo de suelo donde se desarrolla el experimento se califica como Pardo Vértico.

3.2 Procedimiento efectuado para la recolección y procesamiento de las imágenes multiespectrales de los campos de caña de la ETICA

Después de solicitado el servicio por un cliente, se procede al estudio del área a sobrevolar para la toma de las fotos. Si el terreno presenta características desfavorables para el desarrollo de la misión como grandes ondulaciones del terreno, o fuertes vientos, la misión será descartada, previamente consultado el cliente. De lo contrario, se traza el plan de vuelo mediante el software Mission Planner, asegurando que exista un solapamiento longitudinal del 80% y lateral del 60% entre las imágenes. Luego se comprueba el estado del VANT y de

la cámara, ambos deben estar listos, y si se presenta alguna avería se valora su reparación en el terreno, de no ser posible se cancela la misión. Si los dos elementos están listos, y el clima es el idóneo, se realiza el vuelo y la toma de las imágenes. Posteriormente, se extrae la información de la cámara y se realiza el procesamiento previo; generando los ortomosaicos multiespectrales y RGB mediante los software Photoscan o Pix4D. Entonces se pueden realizar mediciones de áreas, volúmenes, distancias y calcular los índices vegetativos utilizando las bandas espectrales correspondientes a cada fórmula. Al finalizar el cálculo, los datos de los índices vegetativos pueden ser utilizados en la generación de mapas de aplicación variable y los resultados son entregados al cliente, concluyendo la misión. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 3.4.

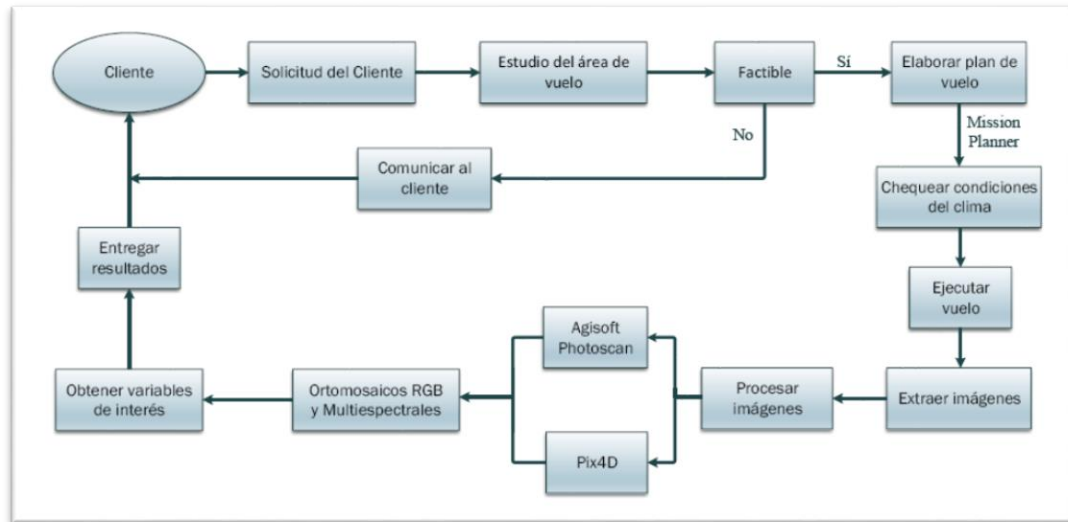


Figura 3.4. Flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes multiespectrales.

3.3 Procesamiento de las imágenes del experimento de variedades VCV-1-05

Las imágenes para las pruebas experimentales fueron tomadas con la cámara multiespectral Sequoia el 4 de abril del 2017, el 29 de enero del 2018 y el 10 de abril del 2018. En cada fecha se realizaron tres vuelos a diferentes alturas, 40 metros (vuelo I), 80 metros (vuelo II) y 120 metros (vuelo III), todos a una velocidad de 6 m/s y bajo un clima soleado, por lo que las condiciones de iluminación fueron buenas. Para cada grupo de imágenes se construyeron con los software Pix4D y Agisoft PhotoScan los respectivos ortomosaicos

RGB y multiespectrales, para así calcular las diferentes variables de interés y establecer comparaciones entre los resultados obtenidos.

3.3.1 Análisis de resultados del experimento de variedades VCV-1-05

Los diferentes grupos de imágenes fueron procesados en más de una ocasión, para considerar el impacto en los resultados de algunas opciones de procesamiento como, tomar cada una de las capturas fotográficas completas para reconstruir el ortomosaico y aumentar la resolución a la hora de darle textura al mismo. Las variaciones de dichos parámetros mostraron cambios favorables en la textura de los ortomosaicos. En este subepígrafe se analizan los resultados de diferentes vuelos para determinar las condiciones bajo las que deben ser tomadas las imágenes.

Vuelo I

El vuelo I se realizó en todas las fechas a 40 metros de altura, y se tomaron como media un total de 2425 imágenes. El procesamiento de las imágenes RGB con el software Pix4D, empleando la plantilla *3D Maps*, no reveló una ortofoto de calidad; como se puede observar en la Figura 3.5 a), hay varios huecos en la zona central de la ortofoto. Con esta plantilla también se obtienen la nube de puntos y la malla texturizada 3D, las cuales en este caso tampoco aportan mucha información valiosa por su mala calidad. La causa de estos resultados adversos se debe a que no se logró el solape necesario con estas condiciones de altura y de velocidad del vuelo, (Anexo XII). En la Tabla 3.1 se muestra el tiempo que tardó este software para ejecutar cada uno de los procesos. Mediante el modelo Ag RGB sí fue posible construir una ortofoto de calidad, para imágenes tomadas bajo estas condiciones de vuelo, pero sus aplicaciones se limitan a cálculos de distancias y áreas.

El procesamiento de las imágenes del vuelo I con Agisoft PhotoScan arrojó resultados similares, aunque se logró construir una ortofoto más completa (ver Figura 3.5 b)) y en menor tiempo (ver Tabla 3.2). En cuanto a la elaboración de ortomosaicos multiespectrales y mapas de índices, ambos software cumplieron las tareas exitosamente. Los ortomosaicos RGB realizados por los dos software son de muy mala calidad como se pueden apreciar en los Anexos XIII y XIV.

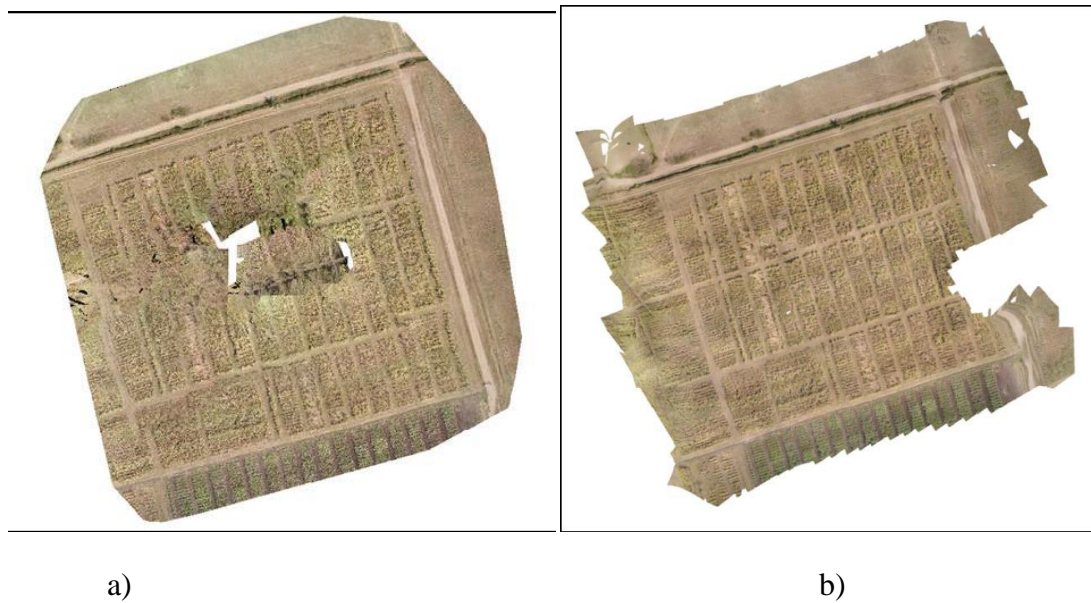


Figura 3.5. a) Ortofoto RGB a 40 metros (vuelo I) con Pix4D, b) Ortofoto RGB a 40 metros (vuelo I) con Agisoft PhotoScan.

Tabla 3.1. Tiempo requerido por la computadora disponible para procesar el experimento de variedades en Pix4D

Proceso	Tiempo
Procesamiento inicial	7h:29min:12seg
Densificación de nubes de puntos	52min:24seg
Generación de la superficie	29min:24seg
Generación de MDS	22min:55seg
Generación del ortomosaico	2h:37min:57seg
Total	11h:51min:52seg

Tabla 3.2. Tiempo requerido por el clúster de computadoras para procesar el experimento de variedades en Agisoft Photoscan

Proceso	Tiempo
Alineamiento de puntos	9h:29min
Densificación de nubes de puntos	14min:13seg
Generación de la superficie	3min:17seg
Generación de MDS	1min
Generación del ortomosaico	1 min
Total	9h:48min:30seg

El software QGIS no permite reconstruir un ortomosaico a partir de las imágenes recolectadas por el VANT. Es necesario cargarle el ortomosaico (sea RGB o multiespectral) ya construido por otro software y a partir de este punto QGIS permite una infinidad de tareas de carácter estadístico y topográficas disponibles para este sistema de información geográfica. La construcción del ortomosaico a partir de las fotos es la etapa que más tiempo lleva y el paso de cargar el ortomosaico por QGIS es prácticamente instantáneo, por lo que no se presenta en este trabajo ninguna tabla del tiempo de procesamiento para este software.

Vuelo II y III

El procesamiento de las imágenes de los vuelos II y III reveló muy buenos resultados con ambos software, logrando ortofotos precisas, sin huecos ni distorsiones; independientemente de la fecha en que fueron realizados. Los ortomosaicos también

presentan la calidad requerida para realizar las mediciones de las distintas variables de interés.

A partir de las deducciones anteriores se puede inferir que no es posible realizar, con el sensor Sequoia, ortomosaicos RGB a 40 metros de altura y volando a una velocidad de 6 m/s. Se pudieran generar ortomosaicos a esta altura si se disminuyera la velocidad de vuelo; sin embargo esto imposibilitaría mapear y procesar áreas extensas con éxito y rapidez. Con las imágenes tomadas a mayores alturas sí se lograron construir modelos 3D y ortofotos de calidad, por lo que queda a elección del usuario la selección de la altura de vuelo, según lo exijan sus aplicaciones.

Uno de los aspectos que se sugiere tener en cuenta son las resoluciones GSD (del inglés *Ground Sample Distance*) que se logran a diferentes elevaciones. Partiendo de la fórmula:

$$GSD = \frac{H * Ps}{F} \quad (3.1)$$

Donde:

H es la altura de vuelo.

Ps es el tamaño del pixel.

F es la distancia focal del lente de la cámara.

Con las características técnicas de la cámara, se tiene para el sensor multiespectral (*tamaño de píxel*=3.75 μ m y la *distancia focal* =3.98mm), para el Sensor RGB (*tamaño de píxel*=1.34 μ m y *distancia focal* = 4.88mm). Los resultados de tamaño de píxel (cm/píxel) obtenidos en uno de los vuelos se muestran en el Anexo XV. En el Anexo XVI se muestra una imagen multiespectral capturada a 40 metros de altura, resaltando en el círculo una de las marcas establecidas para los GCP utilizados, el cual tiene aproximadamente 20 centímetros de diámetro. Un acercamiento sobre este, permite validar el valor GSD obtenido para imágenes tomadas a esta altura, que es de 3 cm/píxel.

3.3.2 Georreferenciación de los ortomosaicos

Todos los vuelos realizados en la zona de estudio contaron con puntos de control en tierra y además se optimizaron los ortomosaicos, mediante la introducción de escalas; con el propósito de lograr resultados más precisos. En la Figura 3.6 se muestra la corrección de un

modelo con GCPs de coordenadas conocidas y en la Figura 3.7, con la introducción de distancias.



Figura 3.6. Ubicación de los GCPs en un ortomosaico RGB en el software Agisoft PhotoScan.

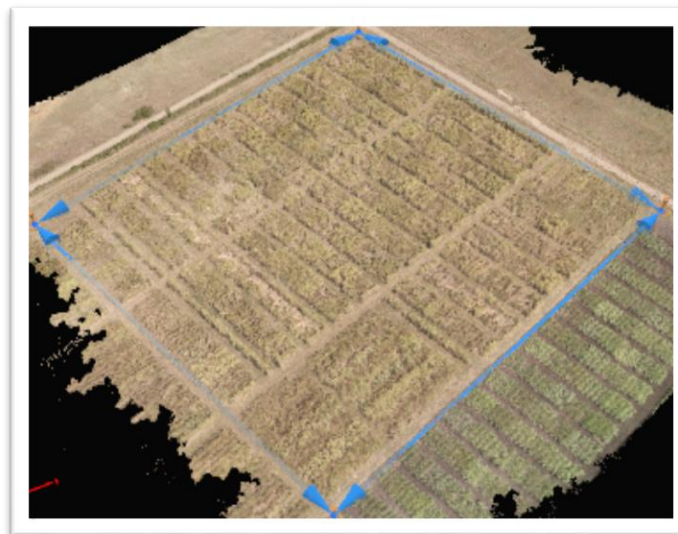


Figura 3.7. Ortomosaico RGB del experimento VCV-1-05 construido con Pix4D volando a 120 metros de altura con 4 puntos de control foto insertados en los extremos de las flechas azules.

Para la introducción de los puntos de control en el programa Pix4D se utiliza una herramienta en la que aparece una única subventana, para la visualización de cada imagen. En el caso del programa Agisoft PhotoScan, la imagen será abierta de manera individual para marcar cada uno de los puntos. Además, muestra una ventaja con respecto a Pix4D, que es que los puntos de control se muestran automáticamente en todas las imágenes en las que aparecen y simplemente se deben corregir en la imagen. Esto supone un ahorro de tiempo en la georreferenciación al evitar la búsqueda del punto en cada foto.

3.3.3 Mediciones de distancias, áreas y volúmenes

Luego de introducir los GCP y las distancias reales entre estos puntos para corregir los ortomosaicos georreferenciados, ambos software exigen reprocesar todo el proyecto para optimizar las mediciones del ortomosaico. A través de estos métodos de georreferenciación se logran eliminar errores de aproximadamente un metro en los ortomosaicos, ajustándolos a sus dimensiones reales. Este método permite garantizar mediciones de distancias, áreas y volúmenes de una mayor fiabilidad. Ambos software presentan un entorno de trabajo sencillo para lograr estos resultados. En la Figura 3.8 se muestra un cálculo de área realizado con Pix4D y en la Figura 3.9 las mediciones de área y perímetro con Agisoft PhotoScan.

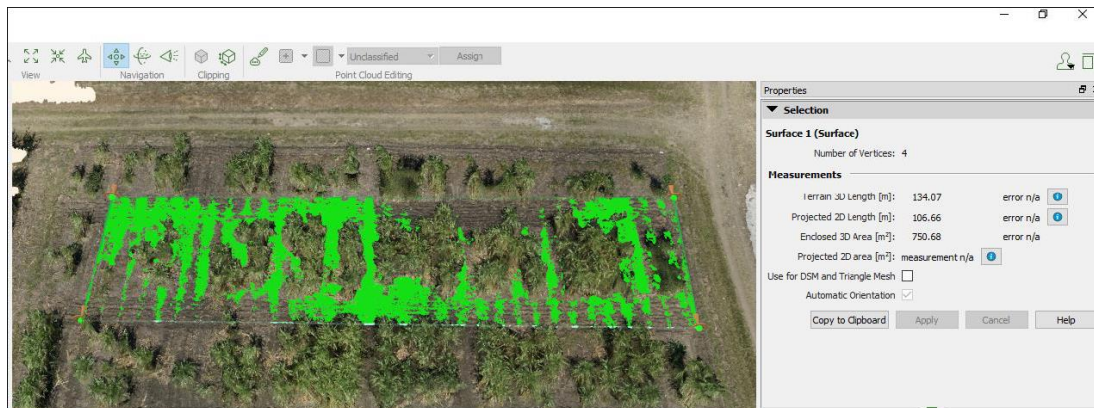


Figura 3.8. Interfaz para el cálculo de área (Pix4D).

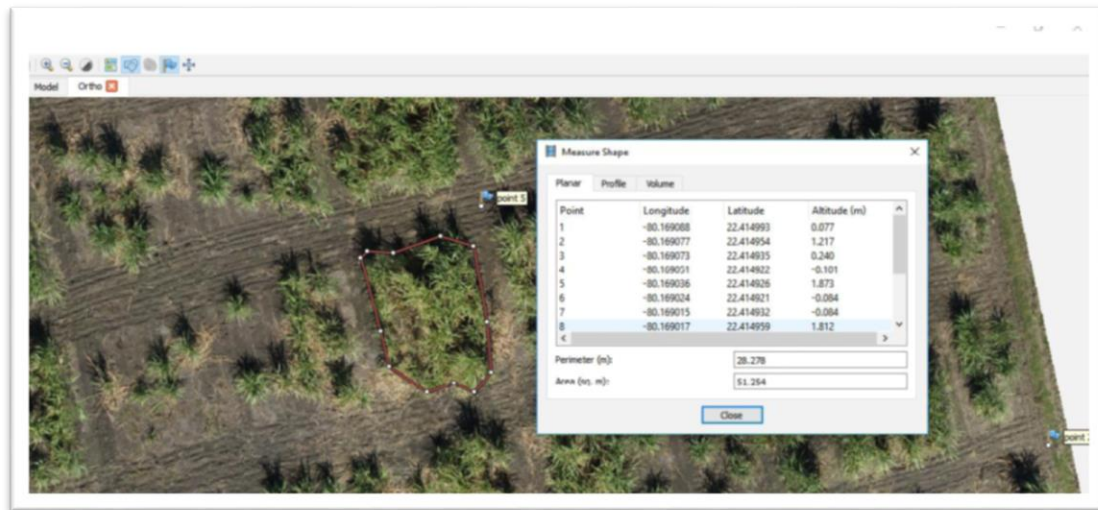


Figura 3.9. Interfaz para el cálculo de área y volumen (Agisoft PhotoScan).

3.4 Conclusiones del capítulo

- Las imágenes tomadas con sensores multiespectrales integrados en los VANT y utilizando programas fotogramétricos pueden ser utilizadas para producir ortofotos precisas y modelos 3D que permiten realizar distintos estudios relacionados con la agricultura de precisión.
- Mediante la introducción de GCP y las correcciones de distancias se logra la georreferenciación de los modelos 3D para realizar cálculos de áreas de mayor fiabilidad.
- Para la introducción de puntos de apoyo, Agisoft PhotoScan automáticamente genera los GCP en todas las imágenes en las que aparece, una vez se han introducido en dos imágenes; lo que supone un ahorro de tiempo en el proceso con respecto a Pix4D.
- La confección de ortomosaicos RGB a través del procesamiento de imágenes, se ejecuta en menor tiempo con el software Agisoft PhotoScan; al permitir esta aplicación la creación de varios nodos de procesamiento.

CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS AGRÍCOLA MEDIANTE LOS ÍNDICES VEGETATIVOS

En este capítulo se presentan los diferentes mapas de índices obtenidos con los software Agisoft Photoscan, Pix4D y QGIS; analizando las discrepancias entre estos mapas en dependencia del software con el que ha sido generado. Se estableció la correlación entre los índices vegetativos y determinadas variables agro técnicas de la caña de azúcar, mediante pruebas experimentales realizadas a diferentes campos y con dosificaciones variadas de nutrientes, elaborando un análisis estadístico para evaluar el comportamiento de cada índice.

4.1 Cálculo de los índices vegetativos del experimento de variedades VCV-1-05

Los mosaicos obtenidos a 80 y 120 metros fueron analizados y procesados para la obtención primeramente del índice NDVI; haciéndose una identificación de puntos de respuesta espectral específica en el cultivo. El mapa NDVI fue evaluado con varios expertos de la ETICA, corroborándose la relación entre sectores con elevados niveles de NDVI y bloques de caña con un alto vigor vegetal. Las parcelas deben evaluarse agrupándose por la edad en la que fueron sembradas, ya que la caña en crecimiento mostrará un índice NDVI más alto que la caña madura (debido a una mayor intensidad del verde en la caña joven). Estos valores variables no indican que la caña joven sea más saludable que la madura, sino que se encuentran solamente en ciclos biológicos diferentes. Los mapas de índices NDVI generados facilitan la interpretación directa de los parámetros biofísicos de las parcelas, que hayan sido sembradas en igual fecha; permitiendo, gracias a que los mapas están georreferenciados, que el agricultor conozca de manera exacta el área

de su campo cubierta por cultivos saludables y que sectores de caña presentan déficit nutricional. Esto permite determinar la cantidad de fertilizante necesaria antes de realizar la compra de los insumos y aplicarlos solamente en los sectores estresados, lo que conlleva un ahorro monetario significativo.

En la Figura 4.1 se pueden apreciar las variaciones del vigor vegetal y los niveles de clorofila que se manifiestan en los cultivos de caña de azúcar; pudiéndose caracterizar su distribución espacial, así como su evolución a lo largo del tiempo. También en esta figura se pueden distinguir en la parte inferior, las parcelas de caña joven con un elevado nivel de clorofila en tonalidades amarillas y rojas, correspondientes a valores de NDVI entre 0.60 y 0.80 respectivamente. El mapa NDVI obtenido permite clasificar las parcelas dispersas a lo largo del campo, en dependencia de si la respuesta espectral es alta, baja o nula y en base a esta información trazar planes para una dosificación diferenciada de insumos.

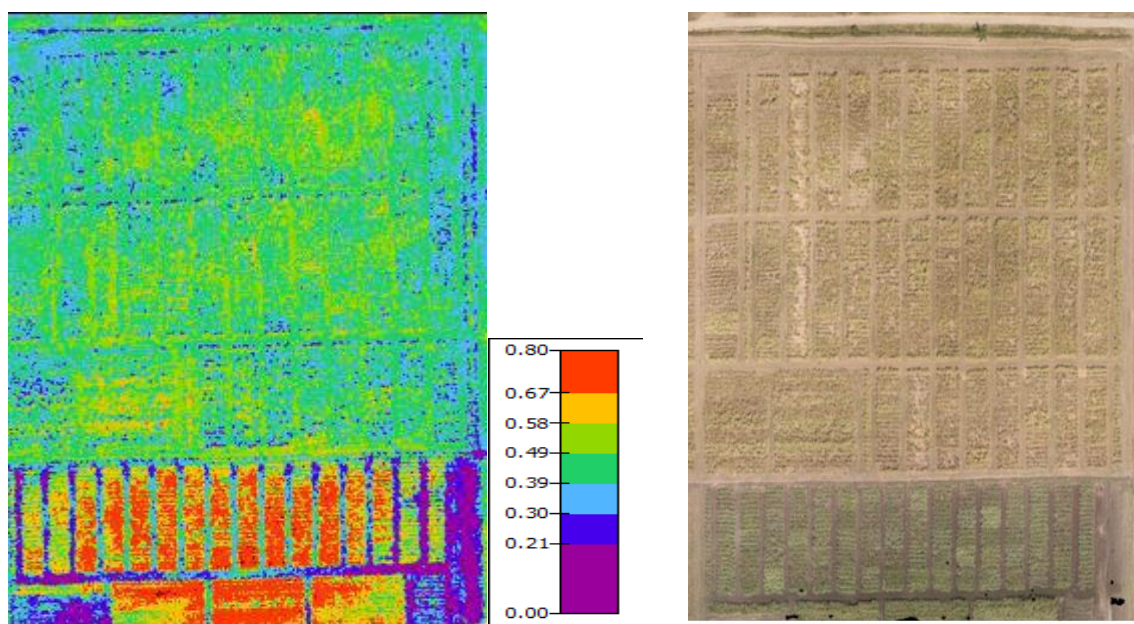


Figura 4.1. Mapas del índice vegetativo NDVI (izquierda) y ortofoto RGB (derecha) obtenidos en Pix4D, representando el valor 0.8 de la escala el máximo nivel de vigor vegetal y los valores más cercanos a cero zonas con despoblamiento vegetal o suelo.

La correlación entre los valores de NDVI y el estado de salud de la caña madura es alta, de manera tal que se muestran los mayores valores de índice NDVI (superior a 0.49 de acuerdo a los expertos) en las parcelas más saludables, bajos valores (entre 0.21 y 0.39) en las parcelas más afectadas por estrés nutricional o pobre densidad poblacional y casi nulos (NDVI por debajo de 0.21) en los sectores de vegetación pobre o suelo. Esta información fue validada directamente en el campo por los investigadores de la ETICA a partir del número de tallos, nivel de salud vegetal y altura de la caña en cada una de las parcelas evaluadas.

En el mapa de índice generado por Pix4D (Figura 4.2 derecha) los valores de NDVI predominantes oscilan entre 0.5 y 0.8, mientras que con Agisoft PhotoScan (Figura 4.2 izquierda) prevalecen valores en el rango de 0.2 a 0.5. Esta información es fácilmente obtenida al permitir ambos software conocer el valor promedio del índice y el por ciento del área que ocupa en el mapa. Las discrepancias entre los valores de los dos programas se deben a que Pix4D aplica correcciones radiométricas que permiten normalizar las imágenes y comparar diferentes imágenes en la misma escala; aprovechando la ventaja de que este software y la cámara multiespectral Sequoia pertenecen a la misma compañía.

Por lo tanto, si se desea elaborar un mapa de índices vegetativos y el sensor escogido para capturar las imágenes es el Parrot Sequoia, el software Pix4D es el más adecuado para realizar los cálculos de índices vegetativos ya que este incorpora correcciones radiométricas específicas para este sensor, mientras Agisoft PhotoScan no ofrece esta potencialidad (6).

Los índices calculados con el software QGIS dependen de si el ortomosaico multiespectral, que se le carga para realizar los cálculos, fue construido con Agisoft o Pix4D. QGIS arrojó en todos los casos valores muy similares a los mapas de índices generados con Agisoft o Pix4D. La herramienta que posee este software para calcular índices en parcelas en específico es más laboriosa que la interfaz que ofrece Pix4D, por lo cual los cálculos de índices se realizarán preferentemente con este último software.

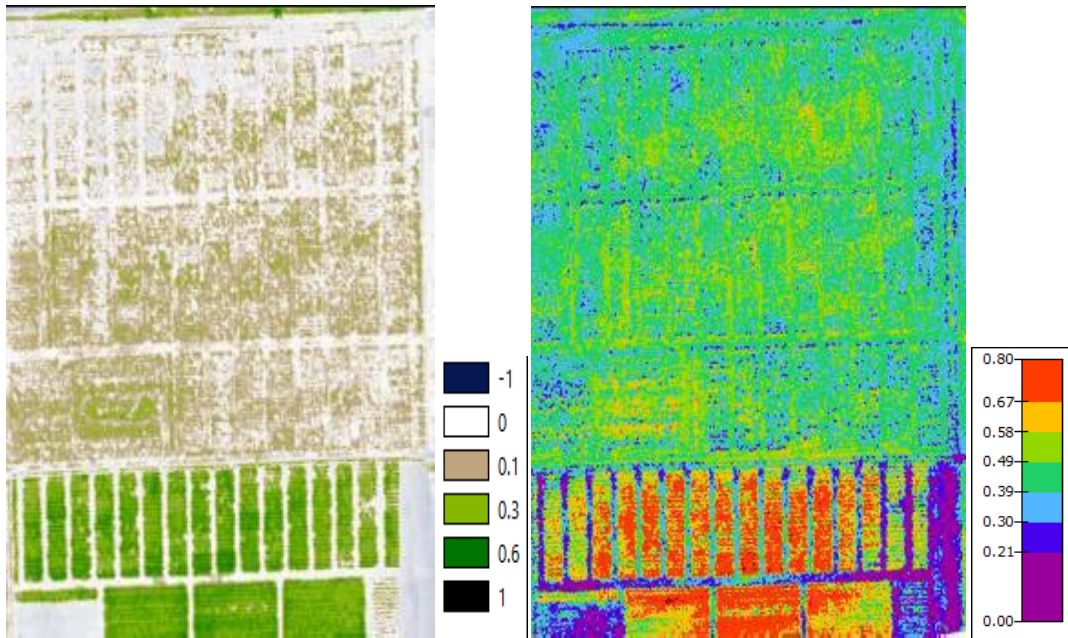


Figura 4.2. Mapa de NDVI con Agisoft PhotoScan (izquierda) y con Pix4D (derecha) representando el valor 0.8 de la escala el máximo nivel de vigor vegetal y los valores más cercanos a cero zonas con despoblamiento vegetal o suelo.

En las Figuras 4.3 y 4.4 (correspondientes a caña de 14 meses en fase de maduración) se puede apreciar cómo mediante el mapa de índices NDVI son fácilmente reconocibles sectores de un elevado vigor vegetal.



Figura 4.3. Ortofoto RGB obtenida con Agisoft PhotoScan desde 120 metros de altura.



Figura 4.4. Mapa NDVI obtenido con Agisoft PhotoScan desde 120 metros de altura. Las zonas blancas corresponden a suelo o sectores con baja densidad vegetal y los puntos de un verde más intenso a vegetación de mayor nivel de clorofila.

4.1.2 Discriminación de variedades mediante los mapas de índices en el experimento VCV-1-05

Los cálculos de los diferentes índices vegetativos fueron realizados a parcelas independientes de diferentes variedades de caña de azúcar, ubicadas en el campo, correspondientes a las tablas mostradas previamente en las Figuras 3.1 y 3.2. De los 13 índices vegetativos evaluados en cada uno de las tres misiones realizadas, para cada una de las variedades de caña de azúcar, se obtuvo una serie de datos numéricos y visuales; mostrándose prácticamente homogénea la tonalidad de las parcelas de una misma edad en el mapa de índices. Por lo cual no fue posible, para los especialistas azucareros, discriminar visualmente entre una variedad u otra (Figuras 4.5 y 4.6).

C266- 70	C323- 68	C90- 530	C88- 380	My55 14	Co99 7	C85- 102	B8025 0	C92- 325	C86- 156	SP70- 1284	B7274	C89- 147	C86- 56	C120- 78
C46- 12	CP52- 43	C86- 456	C86- 156	C90- 469	C86- 503	C120- 78	C137- 81	C89- 147	C90- 530	My55 14	C92- 325	C88- 380	C86- 12	C1051 -73
C86- 12	C86- 12	C87- 51	Co99 7	C89- 147	C1051 -73	C90- 317	My55 14	C323- 68	C86- 56	CP52- 43	C90- 530	C86- 503	C85- 102	C266- 70
C1051 -73	B7274	B8025 0	C90- 317	C85- 102	C87- 51	SP70- 1284	C266- 70	C86- 12	C88- 380	Co99 7	C90- 469	C86- 456	C137- 81	C323- 68
C86- 56	C86- 503	C92- 325	SP70- 1284	C120- 78	C86- 12	C86- 456	B7274	CP52- 43	C90- 469	B8025 0	C90- 317	C86- 156	C132- 81	C87- 51

Figura 4.5. Mapa NDVI en escala de grises del campo de caña de 6 meses del experimento de variedades VCV-1-05. En letras blancas se especifica cada variedad sembrada.

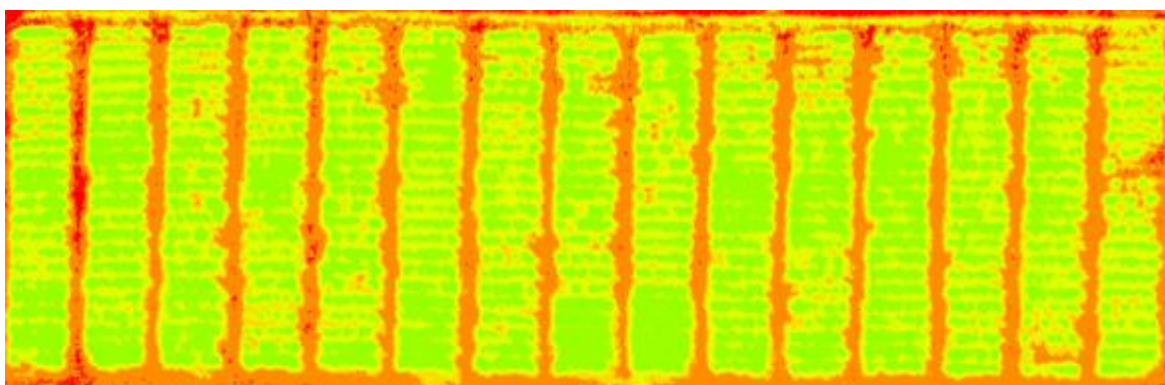


Figura 4.6. Mapa NDVI en pseudocolor del campo de caña del experimento de variedades VCV-1-05 de 6 meses. Las coloraciones amarillas y verdes indican plantas con un elevado nivel de clorofila, las coloraciones naranjas y rojas representan pasto y suelo respectivamente.

No obstante, al analizar numéricamente los valores promedios de los diferentes índices vegetativos por parcela, se puede apreciar que existe una pequeña diferencia, para algunos índices en específico, entre las diferentes variedades de caña de azúcar. No se pudieron establecer correlaciones para más variedades de caña debido a la poca repetibilidad de estas en el campo, lo cual dificultaba el análisis estadístico.

Debido a que visualmente no es posible en los mapas de índices a pseudocolor identificar las diferentes variedades de caña de una misma edad, es necesario analizar cada píxel para comprobar qué valor numérico del índice tiene y si este cae en el rango espectral definido previamente para alguna variedad en específico. Este trabajo solamente puede ser realizado

de forma rápida y efectiva a través de la programación de un algoritmo que analice cada mapa de índices píxel a píxel.

4.2 Cálculo de los índices vegetativos del experimento de nitrógeno VmNn-18

El experimento VmNn-18 fue procesado con el software Pix4D, generándose primeramente el mapa NDVI que es de los índices, referidos en la literatura, más sensibles a los cambios de clorofila en la vegetación (21). En la Figura 4.7 se muestra el mapa NDVI en escala de grises a la izquierda y en las figuras 4.8 y 4.9 el mismo mapa NDVI coloreado con las 10 dosificaciones ascendentes de nitrógeno, replicadas cuatro veces.

En el Anexo XVII se muestran las cantidades de nitrógeno y del fondo fijo (fósforo y potasio) correspondientes a cada tratamiento. En el Anexo XVIII se presentan las 4 réplicas del experimento y como se distribuyeron los diferentes tratamientos al azar, así como el número de tallos de cada parcela, en el Anexo XIX.

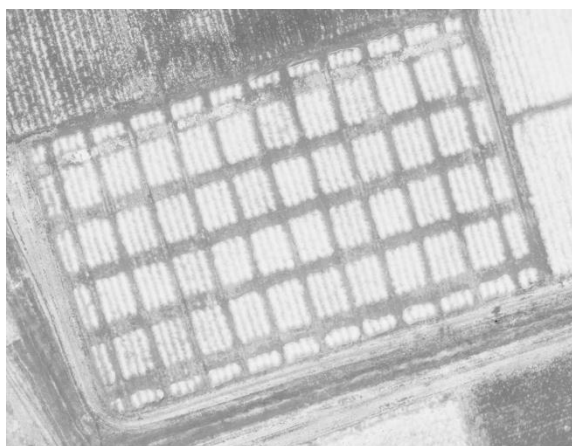


Figura 4.7. Mapa NDVI a 40 metros de altura en escala de gris generado con Pix4D del experimento de nitrógeno VmNn-18.

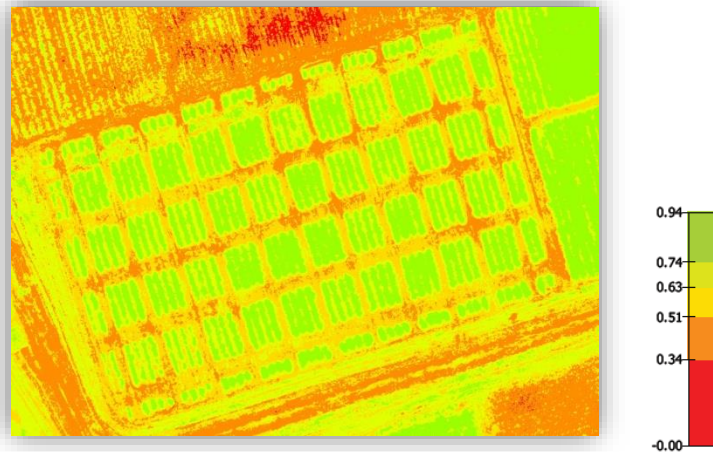


Figura 4.8. Mapa NDVI coloreado a 40 metros de altura generado con Pix4D del experimento de nitrógeno VmNn-18. A valores más cercanos de 0.9 mayor vigor vegetal de las plantaciones.



Figura 4.9. Mapa NDVI coloreado a 40 metros de altura generado con QGIS del experimento de nitrógeno VmNn-18. A valores más cercanos de 0.9 mayor vigor vegetal de las plantaciones.

En la tabla 4.1 se muestran los valores promedios del índice NDVI, de cada una de las parcelas sometidas a tratamientos variables. Estos datos fueron evaluados por especialistas

en procesamiento de imágenes multiespectrales del GARP y por miembros del departamento de agroquímica de la ETICA. Como se puede apreciar, la variación del índice NDVI en condiciones tropicales, para la variedad de caña C 86-12 nacida 7 meses luego de la siembra y sometida a dosificaciones nitrogenadas variables, no es significativa. Esto se debe a que la planta que crece inmediatamente después de la siembra (conocida como “caña planta”), satisface la mayoría de sus requerimientos de nitrógeno a partir del fragmento de caña sembrado bajo tierra.

Tabla 4.1. Valores promedio de NDVI en cada una de las parcelas de la primera réplica del experimento de nitrógeno VmNn-18.

1ra réplica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NDVI promedio	0.72	0.71	0.76	0.79	0.8	0.77	0.79	0.8	0.79	0.79

En la caña planta, con la preparación de la tierra para la creación de las condiciones idóneas para la plantación, ocurre una mayor mineralización de la materia orgánica; por lo que gran cantidad de nitrógeno es cedido al cultivo, minimizando el uso de los fertilizantes nitrogenados. También, el hecho de que los retoños de caña luego del primer corte necesiten más nitrógeno que las cañas plantas, está dado fundamentalmente por las condiciones físicas del suelo en deterioro; a causa de una pobre aireación por la compactación, originada por el pase de equipos pesados, que reduce el espacio poroso, dificultando la extensión del sistema radical de la planta.

En las condiciones de Cuba, se ha demostrado que las cepas de caña (primaveras del año, primaveras quedadas y frío), muestran una reducida necesidad de nitrógeno, por lo general no requieren de su aplicación para producir más tallos que las parcelas fertilizadas; en la actualidad no se recomienda nitrógeno en las mismas, debido a la baja frecuencia de respuesta económicamente justificable, excepto en suelos con hidromorfía o compactación manifiesta y de textura arenosa (83).

La no aplicación de fertilizantes nitrogenados en las cepas de planta, y primer retoño, no ejerce influencia nociva en las cepas posteriores (23, 84). Resultados similares han sido validados en áreas cañeras de Tabasco, México.

De esta manera, el análisis multiespectral valida el criterio para la fertilización nitrogenada de campos de caña de azúcar aplicado en Cuba; que indica que para estos suelos y bajo estas condiciones de drenaje se puede prescindir o reducir las dosis de fertilizantes, en dependencia de la cepa. Esto se debe a que el suelo aporta nitrógeno asimilable suficiente para que las plantas realicen sus funciones vitales, sin tener que utilizar, o requiriendo muy poco, del nitrógeno aplicado.

Para validar estos resultados, se procesó el experimento de nitrógeno VmNn-18 para los otros 13 índices vegetativos derivables del sensor Sequoia (Anexo XX); obteniéndose igualmente valores de índices similares para parcelas, con dosificaciones diferentes de nitrógeno.

Fueron realizadas regresiones lineales entre cada índice calculado y el tratamiento aplicado a las 40 parcelas del lote experimental, para evaluar el grado de relación lineal entre estas variables del experimento (Tabla 4.2). El método seleccionado fue el del “*Coefficiente de Correlación por Rangos de Kendall*” ya que la población no era normal, empleándose el software SPSS 22 para este análisis estadístico. Se puede apreciar que el índice que permitió detectar mejor los cambios de dosis de nitrógeno en las diferentes parcelas fue el TNDVI; no obstante, la correlación no fue alta, confirmándose el poco efecto que tiene, en el aumento del vigor vegetal de la caña planta, suministrar fertilizantes nitrogenados como fue explicado anteriormente.

Tabla 4.2. Correlaciones de Kendall entre cada uno de los índices vegetativos derivables del sensor Parrot Sequoia y las diferentes dosificaciones de nitrógeno suministrada a las parcelas de caña planta a los 227, 270 y 298 días después de la siembra.

Índice	Tau de Kendall (N)	Tau de Kendall (N)	Tau de Kendall (N)
	a los 227 días luego	a los 270 días luego	a los 298 días luego
	de la siembra	de la siembra	de la siembra
TNDVI	0.583	0.522	0.558
IPVI	0.580	0.52	0.556

GNDVI	0.579	0.519	0.553
WDRVI	0.576	0.516	0.551
ARVI2	0.575	0.515	0.549
GRNDVI	0.570	0.510	0.545
GRVI	0.569	0.509	0.538
NDVI	0.546	0.489	0.516
RENDVI	0.452	0.395	0.445
RRI1	0.443	0.386	0.436
SAVI	0.397	0.34	0.396
CCCI	0.381	0.324	0.427
RRI2	-0.442	-0.482	-0.427

En la Tabla 4.3 se ilustra la correlación entre índices vegetativos y el número de tallos por parcelas. Se puede apreciar que los índices vegetativos IPVI y GRNDVI son los que poseen una mayor correlación con el número de tallos de caña de azúcar, con resultados muy por encima de índices tradicionales como el GNDVI (empleado fundamentalmente para detectar variaciones de nitrógeno) y el NDVI (que se satura en zonas con una elevada masa vegetal); siendo por lo tanto los índices IPVI y GRNDVI ideales para detectar zonas con una elevada masa foliar.

Tabla 4.3. Correlaciones de Kendall entre cada uno de los índices vegetativos derivables del sensor Parrot Sequoia y el número de tallos por parcelas de caña planta a los 227, 270 y 298 días después de la siembra.

Índice	Tau de Kendall (N) a los 227 días luego de la siembra	Tau de Kendall (N) a los 270 días luego de la siembra	Tau de Kendall (N) a los 298 días luego de la siembra
IPVI	0.723	0.733	0.717
GRNDVI	0.705	0.719	0.702
WDRVI	0.670	0.685	0.69

TNDVI	0.668	0.679	0.683
ARVI2	0.664	0.677	0.714
NDVI	0.645	0.656	0.701
GNDVI	0.615	0.633	0.628
GRVI	0.609	0.629	0.628
RENDVI	0.545	0.573	0.563
RRI1	0.542	0.570	0.559
CCCI	0.519	0.541	0.547
SAVI	0.444	0.5	0.507
RRI2	-0.547	-0.560	-0.589

4.3 Conclusiones del capítulo

- Los índices calculados con el software QGIS dependen del software con que haya sido construido el ortomosaico multiespectral y de las correcciones radiométricas que estos introducen. La herramienta que posee el QGIS para calcular índices en parcelas en específico, es más laboriosa que la interfaz que ofrece Pix4D.
- El software Pix4D ofrece una herramienta de mayor potencia y flexibilidad en la generación de los distintos tipos de índices vegetativos, si la cámara multiespectral empleada es la Parrot Sequoia.
- Mediante los índices vegetativos se valida la metodología aplicada a nivel nacional de no suministrar fertilización nitrogenada a la caña planta; evitándose una contaminación innecesaria del manto freático, de la atmósfera, además de no fertilizar plantas indeseables que lastran el crecimiento de la caña.
- La ortofoto multiespectral generada permitió la selección de las parcelas, en dependencia de su vigor vegetal, para inspección en el campo y evidenció que la respuesta espectral permite identificar problemas en el cultivo.

- El análisis multiespectral de las parcelas de caña debe realizarse agrupándolas por la edad en la que fueron sembradas, ya que la caña en crecimiento mostrará un índice diferente a la que se encuentra en período de maduración.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Durante el transcurso de esta investigación se estudiaron y evaluaron un conjunto de estrategias para la obtención de índices vegetativos y diferentes variables de interés agrícola. Los principales resultados obtenidos se exponen a continuación:

- Para lograr una correcta captura de imágenes mediante el VANT y el sensor multiespectral Parrot Sequoia es necesario un clima soleado, vientos ligeros y una misión planificada para lograr un solapamiento mayor al 75%; requiriéndose para reconstrucciones factibles de ortomosaicos RGB, volar por encima de los 40 metros de altura a una velocidad de 6 metros por segundo.
- El software Agisoft PhotoScan es la mejor opción para aplicaciones RGB, al tener un menor consumo de recursos computacionales que el software Pix4D y permitir la creación de varios clusters de procesamiento. Sin embargo, el software Pix4D es el más adecuado para realizar los cálculos de índices vegetativos de imágenes recolectadas con la cámara Sequoia; ya que este implementa correcciones radiométricas sobre las imágenes a procesar, mientras Agisoft PhotoScan no ofrece esta potencialidad.
- Mediante el análisis multiespectral se determina que es posible prescindir de la fertilización nitrogenada a la caña planta sembrada en suelos del tipo Pardos Vérticos, bajo condiciones normales de drenaje; coincidiendo con el criterio aplicado actualmente en la industria azucarera.
- Los mapas de índices a pseudocolor, derivables del sensor Parrot Sequoia, no permitieron identificar visualmente las diferentes variedades de caña en un campo

sembrado en la misma época, aunque sí posibilitaron discriminar campos de diferentes edades.

- Se determina que de los índices derivables de la cámara Parrot Sequoia, el índice IPVI permite detectar zonas con una elevada masa foliar; sirviendo como sustituto a otros índices más generalizados en aplicaciones agroquímicas como el NDVI, pero que se saturan ante elevadas masas de vegetación verde.

Recomendaciones

- Replicar el análisis multiespectral realizado para campos fertilizados con nitrógeno para campos experimentales de fósforo y potasio, evaluando los efectos en la masa foliar y la velocidad de maduración de la caña.
- Repetir la evaluación hecha en este trabajo para el experimento de nitrógeno, luego del primer corte de caña y analizar la variación de los resultados con respecto a la etapa de caña planta.
- Procesar las imágenes multiespectrales de un campo experimental que posea un banco mayor de variedades de caña de azúcar, para poder definir con exactitud la correlación existente entre las variedades de caña de azúcar y los índices vegetativos derivables del sensor Sequoia.
- Diseñar un algoritmo computacional para identificar, en los mapas multiespectrales obtenidos a partir de VANT, las variedades de caña de azúcar sembradas en dependencia del valor cuantitativo de cada píxel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bendig JV. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for multi-temporal crop surface modelling. A new method for plant height and biomass estimation based on RGB-imaging [PhD]: Universität zu Köln; 2015.
2. Best S, Zamora I. Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Santiago de Chile: Fundación para la Innovación Agraria; 2008.
3. Geipel J, Link J, Claupen W. Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sensing*. 2014;6(11):10335-55.
4. Aggarwal S. Principles of remote sensing. In: Sivakumar MVK, editor. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*: World Meteorological Organisation; 2004. p. 23-38.
5. Gonzalez RC, Woods RE. *Digital image processing*: Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2002.
6. Gutierrez SK, Santana LH, Morales RO, Díaz OA, Mora ID. Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados en agricultura de precisión. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* ISSN: 1815-5928. 2018;39(2):79-91.
7. Bendig J, Willkomm M, Tilly N, Gnyp M, Bennertz S, Qiang C, et al. Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring in Northeast China. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*. 2013;40:45-50.
8. Duan T, Zheng B, Guo W, Ninomiya S, Guo Y, Chapman SC. Comparison of ground cover estimates from experiment plots in cotton, sorghum and sugarcane based on images and ortho-mosaics captured by UAV. *Functional Plant Biology*. 2017;44(1):169-83.
9. Soca R, Rojas J, Willems B, Ocola L, Fernández R, Pérez JCC. Identificación de las tierras degradadas por la salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar mediante imágenes de satélite. *Revista de Investigación de Física*. 2016;19(1):1-9.
10. Gago J, Douthe C, Coopman R, Gallego P, Ribas-Carbo M, Flexas J, et al. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*. 2015;153:9-19.

11. Zarco-Tejada PJ, González-Dugo V, Williams L, Suárez L, Berni JA, Goldhamer D, et al. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote sensing of environment*. 2013;138:38-50.
12. Candiago S, Remondino F, De Giglio M, Dubbini M, Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*. 2015;7(4):4026-47.
13. Meneses VAB, Téllez JM, Velasquez DFA. Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. @ limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria. 2015;13(1).
14. Lasso Garzón FX. Apicación de Tecnologías de Percepción Remota con Cámara Multiespectrales y Equipos de Vuelo no Tripulado en la Estimación de condición de cultivos [Máster]: Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey; 2015.
15. Martínez LJ. Relationship between crop nutritional status, spectral measurements and Sentinel 2 images. *Agronomía Colombiana*. 2017;35(2):205-15.
16. Sona G, Passoni D, Pinto L, Pagliari D, Masseroni D, Ortuani B, et al. UAV multispectral survey to map soil and crop for precision farming applications. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016;41:1023.
17. GARCÍA-CERVIGÓN D, JOSÉ J. Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS\RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión [Máster]: UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID 2015.
18. Núñez Calleja P. Comparativa de software para la realización de ortofotos a partir de imágenes obtenidas por drones [Máster]. Mieres: Universidad de Oviedo; 2016.
19. Hernández Santana L, Martínez A, Garcia D, Delgado I, Hernández Morales LE, editors. Fotogrametría aérea basada en Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT). Solución de bajo costo para la Agricultura Nacional. XVII Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica SIE 2017; 2017; Varadero.
20. Murillo P, Carbonell J. Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia: Cenicaña; 2012.
21. Mulianga B, Bégué A, Simoes M, Todoroff P. Forecasting regional sugarcane yield based on time integral and spatial aggregation of MODIS NDVI. *Remote Sensing*. 2013;5(5):2184-99.
22. Zhao Y, Della Justina D, Kazama Y, Rocha JV, Graziano PS, Lamparelli RAC, editors. Dynamics modeling for sugar cane sucrose estimation using time series satellite imagery. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII*; 2016: International Society for Optics and Photonics.
23. Ruiz EP, Camacho IR, Águila JLB, Díaz MLV, de Armas EB, Hernández FA, et al. La fertilización nitrogenada de la caña de azúcar en un suelo con presencia de hidromorfia. *Centro Agrícola*. 2014;41(3):11-5.

24. Serrano L, Filella I, Penuelas J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*. 2000;40(3):723-31.
25. Gautam R, Panigrahi S. Leaf nitrogen determination of corn plant using aerial images and artificial neural networks. *Canadian Biosystems Engineering*. 2007;49:7.
26. Snyder CS. Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the '4R' concept to optimise crop production and minimise environmental losses. *Soil Research*. 2017;55(6):463-72.
27. Stroppiana D, Villa P, Sona G, Ronchetti G, Candiani G, Pepe M, et al. Early season weed mapping in rice crops using multi-spectral UAV data. *International Journal of Remote Sensing*. 2018;39(15-16):5432-52.
28. Walsh OS, Shafian S, Marshall JM, Jackson C, McClintick-Chess JR, Blanscet SM, et al. Assessment of UAV Based Vegetation Indices for Nitrogen Concentration Estimation in Spring Wheat. *Advances in Remote Sensing*. 2018;7(02):71.
29. Wójtowicz M, Wójtowicz A, Piekarczyk J. Application of remote sensing methods in agriculture. *Communications in Biometry and Crop Science*. 2016;11:31-50.
30. Lopes MS, Reynolds MP. Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology. *Journal of Experimental Botany*. 2012;63(10):3789-98.
31. Santos RT, Saraiva AM. A Reference Process for Management Zones Delineation in Precision Agriculture. *IEEE Latin America Transactions*. 2015;13(3):727-38.
32. González C, Sepúlveda J, Barroso R, Fernández F, Pérez F, Lorenzo J. Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la agricultura de precisión. *Idesia*. 2011;29(1):59-69.
33. Tian L. Development of a sensor-based precision herbicide application system. *Computers and electronics in agriculture*. 2002;36(2-3):133-49.
34. Mulla DJ. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. 2013;114(4):358-71.
35. Sanderson R. Introduction to remote sensing. New Mexico State University. 2010:25-6.
36. Torres-Sánchez J, Peña-Barragán J, Gómez-Candón D, De Castro A, López-Granados F. Imagery from unmanned aerial vehicles for early site specific weed management. *Precision agriculture'13: Springer*; 2013. p. 193-9.
37. Etxeandia Unamuno A. Creación de una nube de puntos y una malla 3D utilizando datos capturados mediante UAV [Máster]: Universidad de Oviedo; 2015.
38. Murugan D, Garg A, Singh D. Development of an adaptive approach for precision agriculture monitoring with drone and satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017;10(12):5322-8.
39. Laguardia ASM, Gutiérrez SK, editors. SOFTWARE DE SEGMENTACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DISTRIBUIDA PARA EL PROCESAMIENTO PRIMARIO DE IMÁGENES AÉREAS SEGMENTATION SOFTWARE WITH DISTRIBUTED

IMPLEMENTA-TION FOR THE PRIMARY PROCESSING OF AERIAL IMAGES. Informática 2018; 2018; La Habana.

40. Vinod KVK, Kamal J. Development of Spectral Signatures and Classification of Sugarcane using ASTER Data. International Journal of Computer Science & Communication. 2010;1:245-51.

41. Rahman MR, Islam A, Rahman MA. NDVI derived sugarcane area identification and crop condition assessment. Plan Plus. 2004;1(2):1-12.

42. Lofton J, Tubana BS, Kanke Y, Teboh J, Viator H, Dalen M. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. Sensors. 2012;12(6):7529-47.

43. Stroppiana D, Villa P, Sona G, Ronchetti G, Candiani G, Pepe M, et al. Early season weed mapping in rice crops using multi-spectral UAV data. International Journal of Remote Sensing. 2018:1-21.

44. Nebiker S, Lack N, Abächerli M, Läderach S. Light-weight multispectral UAV sensors and their capabilities for predicting grain yield and detecting plant diseases. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016;41:963.

45. Shaw GA, Burke H-hK. Spectral imaging for remote sensing. Lincoln laboratory journal. 2003;14(1):3-28.

46. Peña J, Torres-Sánchez J, Serrano-Pérez A, López-Granados F. Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Revista de Teledetección. 2014(42):39-48.

47. Salamí E, Barrado C, Pastor E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. Remote Sensing. 2014;6(11):11051-81.

48. Santana LH, Kharuf S, Machado ER, Álvarez HD, Morales LEH, editors. Sistema de fotogrametría de bajo costo para el Mapeado de agro-ecosistemas, basadas en Vehículos Aéreos No Tripulado (UAV). VII Convención "AGRIMENSURA CUBA 2015"; 2015; La Habana.

49. Ahmed OS, Shemrock A, Chabot D, Dillon C, Williams G, Wasson R, et al. Hierarchical land cover and vegetation classification using multispectral data acquired from an unmanned aerial vehicle. International journal of remote sensing. 2017;38(8-10):2037-52.

50. Handique B, Khan A, Goswami C, Prashnani M, Gupta C, Raju P. Crop Discrimination Using Multispectral Sensor Onboard Unmanned Aerial Vehicle. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. 2017;87(4):713-9.

51. Mazur P, Chojnacki J. Comparison of two remote nitrogen up-take sensing methods to determine needs of nitrogen application. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. 2017;62(2).

52. Vibhute A, Bodhe S. Applications of image processing in agriculture: a survey. International Journal of Computer Applications. 2012;52(2).

53. Govaerts B, Verhulst N. The normalized difference vegetation index (NDVI) greenseeker (TM) handheld sensor: toward the integrated evaluation of crop management. Part A-concepts and case studies. 2010.
54. Gutierrez-Rodriguez M, Escalante-Estrada J, Rodriguez-Gonzalez M. Canopy reflectance, stomatal conductance, and yield of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus coccinues* L. under saline field conditions. *Int J Agric Biol.* 2005;7:491-4.
55. Osborne S, Schepers JS, Francis D, Schlemmer MR. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy journal.* 2002;94(6):1215-21.
56. Goel NS. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews.* 1988;4(1):1-212.
57. Lee K-S, Cohen WB, Kennedy RE, Maersperger TK, Gower ST. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment.* 2004;91(3):508-20.
58. Wright DL, Rasmussen VP, Ramsey RD, Baker DJ, Ellsworth JW. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIScience & Remote Sensing.* 2004;41(4):287-300.
59. Pettorelli N, Vik JO, Myrsetrud A, Gaillard J-M, Tucker CJ, Stenseth NC. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution.* 2005;20(9):503-10.
60. Faust M. *Physiology of temperate zone fruit trees*: John Wiley & Sons, Inc.; 1989.
61. Beltran-Abaunza JM. Method development to process hyper-temporal remote sensing (RS) images for change mapping. Enschede, The Netherlands, University of Twente. 2009.
62. Kharuf-Gutierrez S, Orozco-Morales R, Díaz OdICA, Ruiz EP. Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. *Sistemas y Telemática.* 2018.
63. Huete A, Jackson R. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote sensing of environment.* 1987;23(2):213-IN8.
64. Miura T, Huete AR, Yoshioka H. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2000;38(3):1399-409.
65. Virlet N, Costes E, Martinez S, Kelner J-J, Regnard J-L. Multispectral airborne imagery in the field reveals genetic determinisms of morphological and transpiration traits of an apple tree hybrid population in response to water deficit. *Journal of experimental botany.* 2015;66(18):5453-65.
66. Weier J, Herring D. *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. NASA Earth Observatory. 2000.
67. Amaral S, Costa CB, Rennó CD, editors. *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) improving species distribution models: an example with the neotropical genus Coccocypselum (Rubiaceae)*. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, volume; 2007; Florianópolis.

68. Varvel GE, Schepers JS, Francis DD. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Science Society of America Journal*. 1997;61(4):1233-9.
69. Hunt ER, Hively WD, Fujikawa SJ, Linden DS, Daughtry CS, McCarty GW. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*. 2010;2(1):290-305.
70. Dennis L, Wright J, Philip R, editors. Managing protein in hard red spring wheat with remote sensing. The 6th Annual National Wheat Industry Research Forum; 2003.
71. Baiocchi V, Dominici D, Mormile M. UAV application in post-seismic environment. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, XL-1 W. 2013;2:21-5.
72. Lucieer A, Jong SMD, Turner D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*. 2014;38(1):97-116.
73. Hernández L, Rodríguez E, Martínez A, Álvarez H, Kharuf S, Morales LH, editors. LEVANTAMIENTO FOTOGRAFOMETRICO DE LA UBPC "DESEMBARCO DEL GRANMA" UTILIZANDO AVIONES NO TRIPULADOS, SOLUCIÓN DE BAJO COSTO PARA LA AGRICULTURA NACIONAL. VII Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad 2016; Hotel Memories Paraíso Azul, Cayo Santa María, Caibarien, Cuba.
74. Qin Z, Zhang M. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2005;7(2):115-28.
75. Goel PK, Prasher SO, Patel RM, Landry J-A, Bonnell R, Viau AA. Classification of hyperspectral data by decision trees and artificial neural networks to identify weed stress and nitrogen status of corn. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2003;39(2):67-93.
76. Madani M. Accuracy potential and applications of MIDAS aerial oblique camera system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012;39:127-32.
77. Shelestov AY, Kravchenko A, Skakun S, Voloshin S, Kussul N. Geospatial information system for agricultural monitoring. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013;49(1):124-32.
78. Pandit M, Sodhi NS, Koh LP, Bhaskar A, Brook BW. Unreported yet massive deforestation driving loss of endemic biodiversity in Indian Himalaya. *Biodiversity and Conservation*. 2007;16(1):153-63.
79. Honrado J, Solpico DB, Favila C, Tongson E, Tangonan GL, Libatique NJ, editors. UAV imaging with low-cost multispectral imaging system for precision agriculture applications. 2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC); 2017: IEEE.
80. Romero VR, Villareal AM, León JLT, Hernández AH. Perspectivas de la tecnología VANT en el cultivo de palma de aceite: monitorización del cultivo mediante imágenes aéreas de alta resolución. *Revista Palmas*. 2015;36(3):25-41.

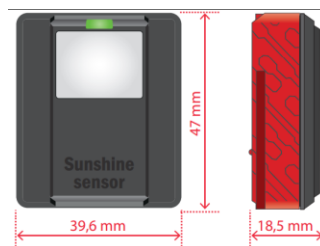
81. González-Jorge H, Puente I, Roca D, Martínez-Sánchez J, Conde B, Arias P. UAV photogrammetry application to the monitoring of rubble mound breakwaters. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2014;30(1):04014194.
82. Ruzgienė B, Berteška T, Gečyte S, Jakubauskienė E, Aksamitauskas VČ. The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*. 2015;73:619-27.
83. Cuellar Ayala I, Villegas Delgado R, de Leon Ortiz M, Perez Iglesias H. Manual de fertilización de la caña de azúcar en Cuba. 2002.
84. CABRERA R, BOUZO L. Fundamentos técnico-económico para el uso de fertilizantes y enmiendas en caña de azúcar, 152pp. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, La Habana, Cuba. 1999;10.

ANEXOS

Anexo I Cámara multispectral Parrot Sequoia



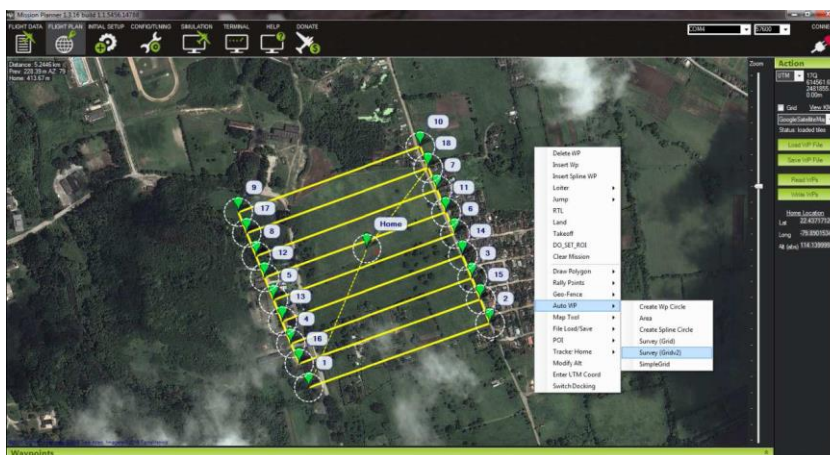
Anexo II Sensor de luz Sequoia con sus dimensiones.

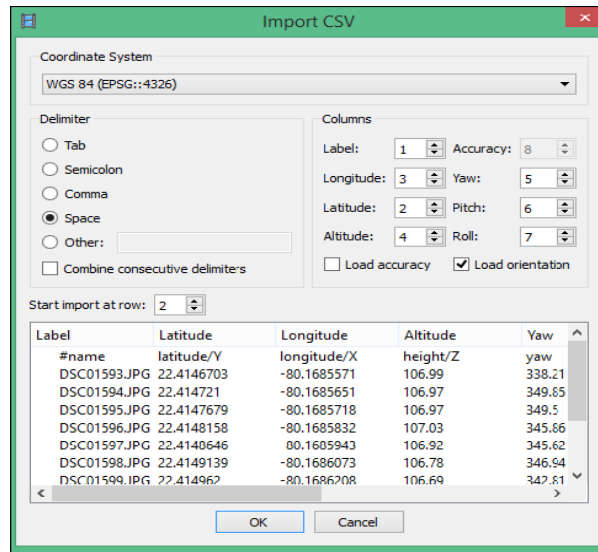
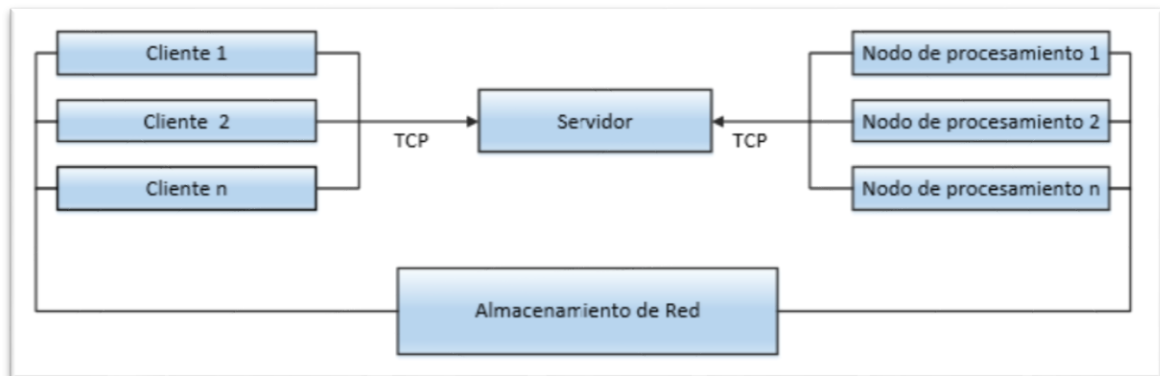


Anexo III GCP ubicados en el terreno para las pruebas realizadas

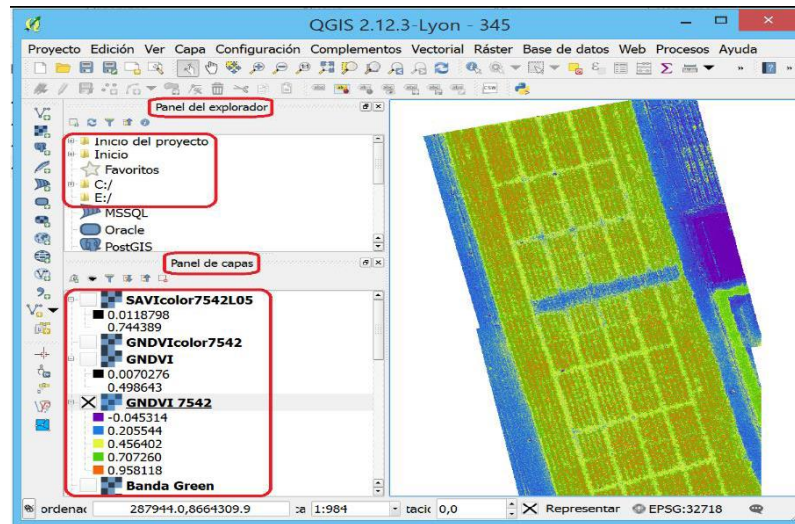


Anexo IV Ambiente de trabajo del software Mission Planner

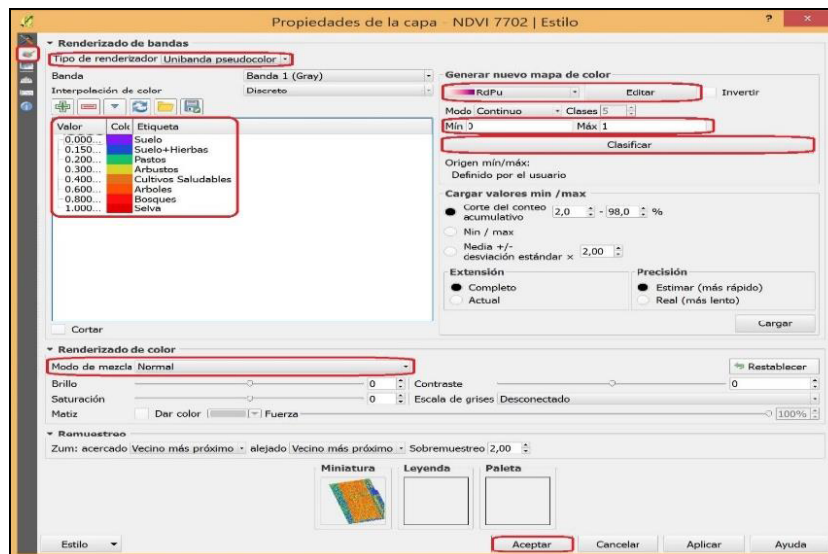


Anexo V Menú del Agisoft para cargar la georreferenciación de las imágenes**Anexo VI Esquema de procesamiento en red con Agisoft**

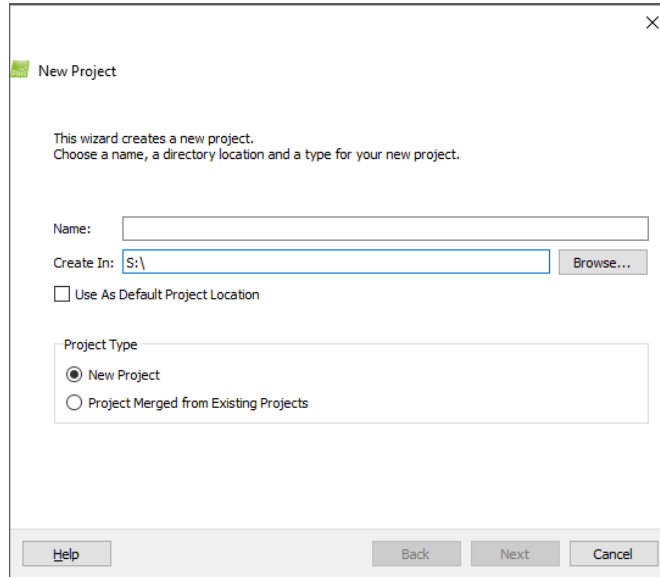
Anexo VII Interfaz para agregar imágenes en QGIS



Anexo VIII Herramienta de edición de las imágenes



Anexo IX Menú New Project



The 'New Project' dialog box is a standard Windows-style window with a title bar and a close button (X) in the top right corner. It contains a green icon in the top left and the text 'New Project'. Below this, a message states: 'This wizard creates a new project. Choose a name, a directory location and a type for your new project.' The form includes a 'Name:' label followed by a text input field. Below that is a 'Create In:' label followed by a text input field containing 'S:\' and a 'Browse...' button to its right. A checkbox labeled 'Use As Default Project Location' is positioned below the 'Create In' field. The 'Project Type' section contains two radio buttons: 'New Project' (which is selected) and 'Project Merged from Existing Projects'. At the bottom of the dialog are four buttons: 'Help', 'Back', 'Next', and 'Cancel'.

New Project

This wizard creates a new project.
Choose a name, a directory location and a type for your new project.

Name:

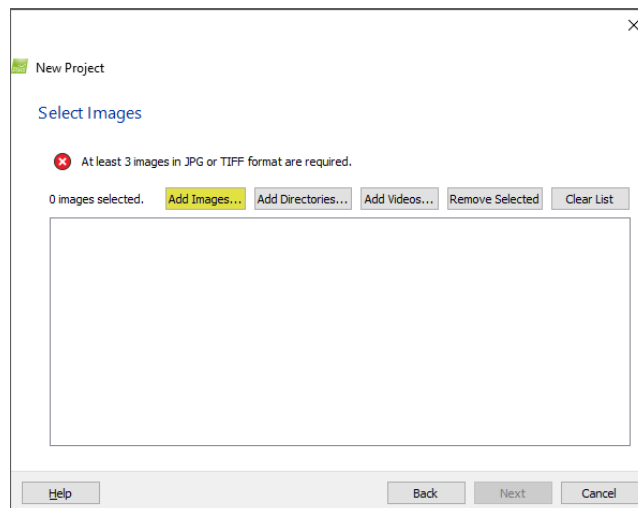
Create In:

☐ Use As Default Project Location

Project Type

☒ New Project
☐ Project Merged from Existing Projects

Anexo X Ventana Select Images de Pix4D



The 'Select Images' dialog box is a standard Windows-style window with a title bar and a close button (X) in the top right corner. It contains a green icon in the top left and the text 'New Project'. Below this, the title 'Select Images' is displayed in blue. A red error icon and message state: 'At least 3 images in JPG or TIFF format are required.' Below the message, it says '0 images selected.' followed by five buttons: 'Add Images...' (highlighted in yellow), 'Add Directories...', 'Add Videos...', 'Remove Selected', and 'Clear List'. A large empty rectangular area is provided for image selection. At the bottom of the dialog are four buttons: 'Help', 'Back', 'Next', and 'Cancel'.

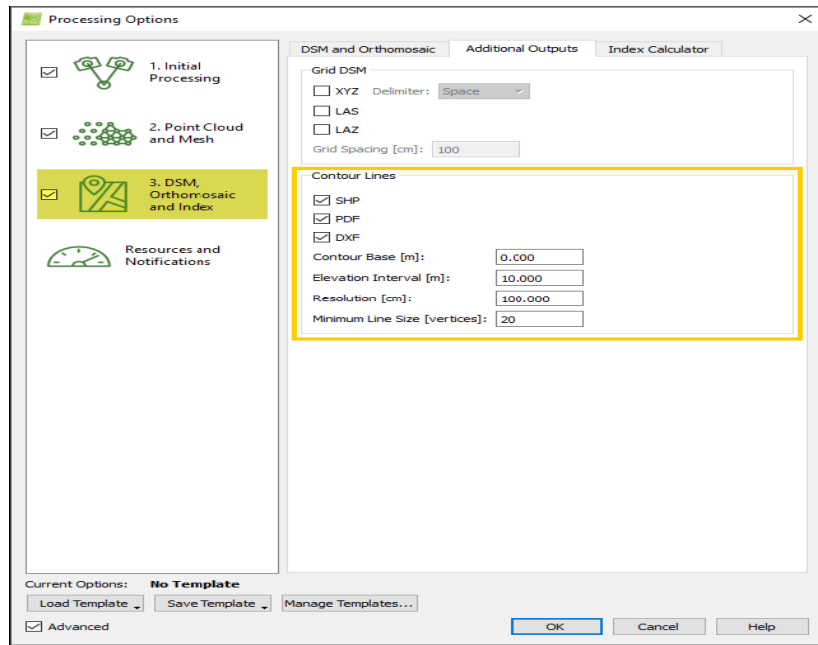
New Project

Select Images

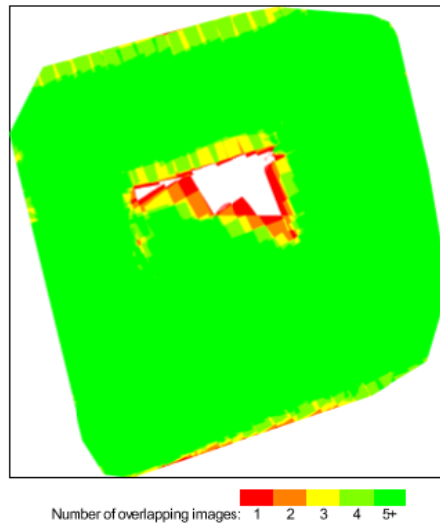
☒ At least 3 images in JPG or TIFF format are required.

0 images selected.

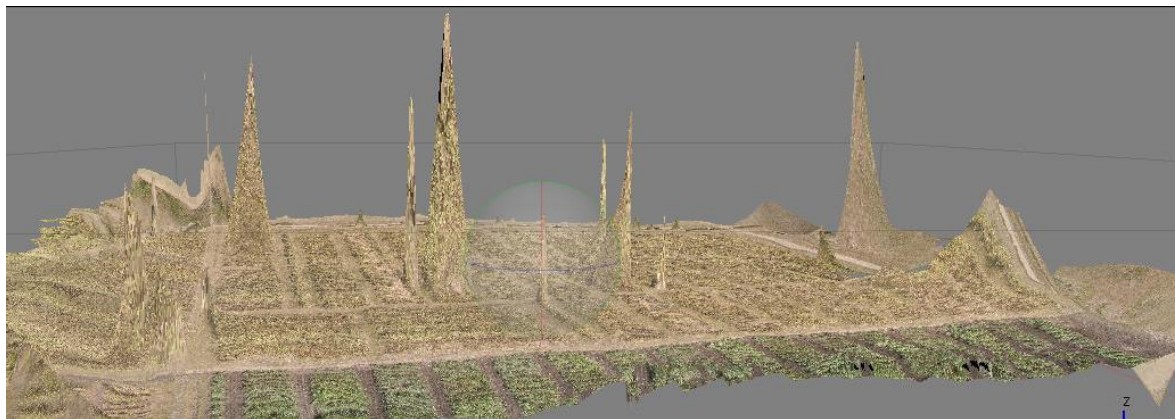
Anexo XI Interfaz para configurar el procesamiento en Pix4D



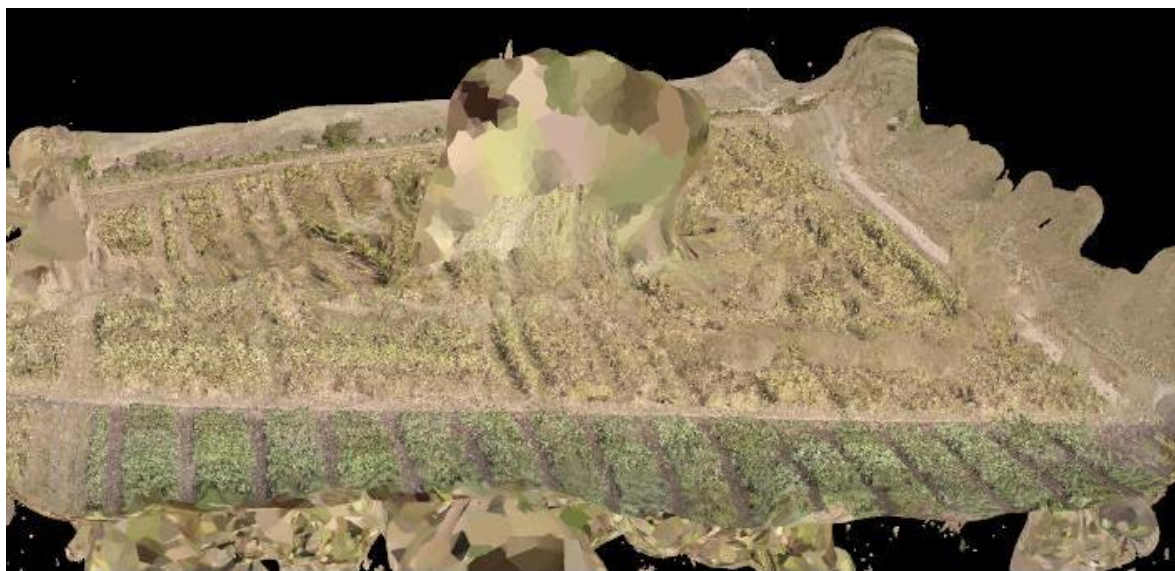
Anexo XII Nivel de solape de las imágenes del Vuelo I



Anexo XIII Modelo 3D del Vuelo I reconstruido con Agisoft Photoscan. Es apreciable las múltiples deformaciones cónicas del modelo por el mal solape.

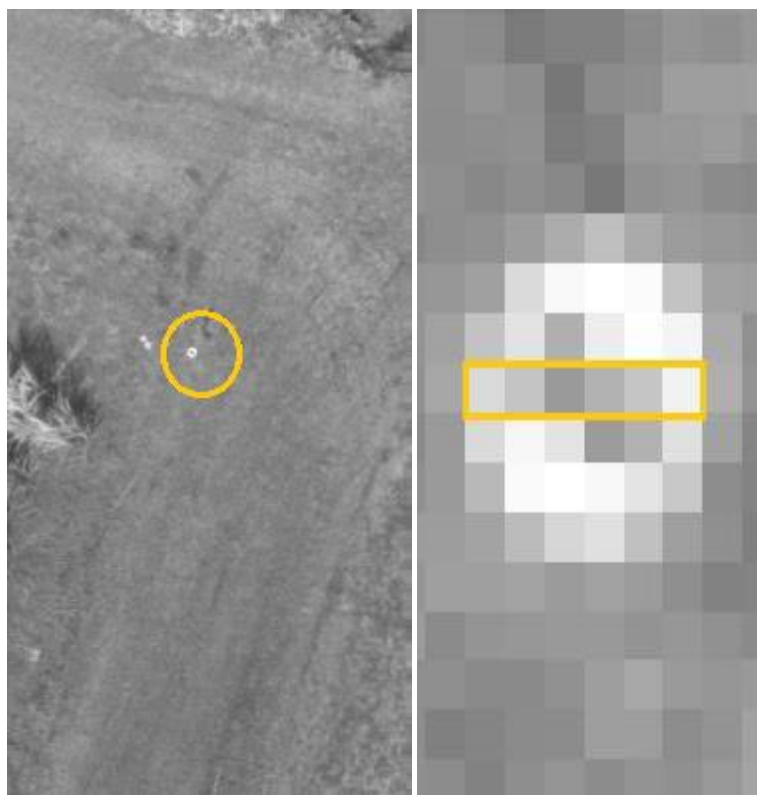


Anexo XIV Modelo 3D del Vuelo I reconstruido con Pix4d. En la zona central es apreciable la deformación del modelo por el mal solape.



Anexo XV GSD (cm/píxel)

Altura (metros)	Sensor RGB	Sensor multiespectral
40	1 cm	3 cm
80	2 cm	7 cm
120	3 cm	11 cm

Anexo XVI Ilustración del GSD calculado

Anexo XVII CANTIDADES DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO CORRESPONDIENTE A CADA TRATAMIENTO APLICADO EN EL EXPERIMENTO VmNn-18.

Tratamiento	Cantidad de fertilizantes aplicados (se ha mantenido constante desde 1986)
1	No se aplicó ningún fertilizante
2	Fondo fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)
3	25 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)
4	50 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)
5	75 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)
6	100 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)
7	125 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)
8	150 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de potasio)

9 175 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (
50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de
potasio)

10 200 Kg/ha de nitrógeno y un Fondo Fijo (
50 Kg/ha de fósforo y 120 Kg/ha de
potasio)

Anexo XVIII Distribución al azar de los diferentes tratamientos de nitrógeno replicados cuatro veces en el experimento VmNn-18

4ta Réplica	Tratamiento V	Tratamiento IV	Tratamiento VII	Tratamiento VI	Tratamiento VIII	Tratamiento II	Tratamiento IX	Tratamiento I	Tratamiento X	Tratamiento III
3ra Réplica	Tratamiento II	Tratamiento VI	Tratamiento VIII	Tratamiento X	Tratamiento I	Tratamiento IX	Tratamiento VII	Tratamiento IV	Tratamiento III	Tratamiento V
2da Réplica	Tratamiento IV	Tratamiento VII	Tratamiento I	Tratamiento VI	Tratamiento IX	Tratamiento X	Tratamiento III	Tratamiento V	Tratamiento II	Tratamiento VIII
1ra Réplica	Tratamiento I	Tratamiento II	Tratamiento III	Tratamiento IV	Tratamiento V	Tratamiento VI	Tratamiento VII	Tratamiento VIII	Tratamiento IX	Tratamiento X

Anexo XIX Cantidad de tallos de caña por parcela ante los diferentes tratamientos de nitrógeno en el experimento VmNn-18.

4ta Réplica	338	376	368	366	348	274	362	302	376	318
3ra Réplica	366	326	298	342	298	354	352	350	322	342
2da Réplica	330	350	282	350	392	364	316	374	296	354
1ra Réplica	242	276	310	344	368	322	344	398	352	352

Anexo XX Índices vegetativos derivables del sensor multiespectral Parrot Sequoia

Abreviatura	Fórmula	Nombre
NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Índice vegetativo de diferencia normalizada
ARVI2	$-0.18 + 1.17NDVI$	Índice vegetativo resistente a presión atmosférica 2
CCCI	$\left(\frac{NIR - RE}{NIR + RE}\right) / \left(\frac{NIR - R}{NIR + R}\right)$	Contenido de clorofila en la canopia
CVI	$\frac{NIR \cdot R}{G^2}$	Índice vegetativo de contenido de clorofila
DVI	$\frac{NIR \cdot R}{G^2}$	Índice vegetativo diferenciado
GNDVI	$\frac{NIR - G}{NIR + G}$	NDVI verde
GRNDVI	$\frac{NIR - (G + R)}{NIR + G + R}$	Índice de vegetación de diferencia normalizada Verde-Rojo
IPVI	$0.5 \left(\frac{NIR}{NIR + R} \right) \cdot (NDVI + 1)$	Índice de vegetación de porcentaje infrarrojo
WDRVI	$\frac{0.1NIR - R}{0.1NIR + R}$	Índice de vegetación de rango de ancho dinámico
TNDVI	$\sqrt{NDVI + 0.5}$	Índice vegetativo de diferencia normalizada transformado

GRVI	$\frac{NIR}{G}$	Índice de vegetación de relación verde
RENDVI	$\frac{NIR - RE}{NIR + RE}$	Índice vegetativo NDVI de borde rojo
RRI1	$\frac{NIR}{RE}$	Índice 1 de relación de borde rojo
SAVI	$\frac{(NIR - R) \cdot (1 + L)}{NIR + R + L}$	Índice vegetativo ajustado al suelo
RRI2	$\frac{RE}{NIR}$	Índice 2 de relación de borde rojo
