



TESIS

Universidad La Salle Noroeste

“Análisis de cultivos utilizando técnica de descomposición de bandas RGB y fotointerpretación de imagen satelital”

Que para obtener el título de
Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

*con Reconocimiento de Validez Oficial No. 2012247
de fecha 05 de diciembre de 2022*

presenta
SAÚL ABRAHAM HERNÁNDEZ GUIDO

Director de Contenido
Dr. Eduardo Núñez Pérez

Ciudad Obregón, Sonora, México; diciembre 2022

ULSA – Biblioteca
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDS) de los Estados Unidos Mexicanos (México)

El uso para la reproducción parcial o total del contenido que sea objeto de protección de derechos de autor, se restringe para fines educativos e informativos, citando la fuente de donde se obtuvo y sus autores.

Sanciones pueden resultar aplicables en caso de lucro, reproducción, edición o modificación, sin la autorización del titular de los derechos.

DEDICATORIAS

Especialmente quiero entregarle este trabajo a Dios, que me dio el don de la vida, que es mi fortaleza en momentos de debilidad, que me da una existencia llena de aprendizaje, experiencia, felicidad y me permitió culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Dedico esta tesis a mis padres, por su comprensión, paciencia y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder la esperanza y desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, principios, perseverancia, empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nada a cambio. Y, sobre todo, gracias papá y mamá por siempre darme su apoyo y creer en mí sin importar cual decisión decida elegir.

A mi hermana por siempre ser un pilar de apoyo, por su alegría, por estar en todo momento y ser mi persona de confianza. Y a pesar de ser como la cara y cruz de una misma moneda, sabes que siempre estaré para ti y que te quiero mucho.

A cada uno de mis abuelos Lupi, Daniel, Magdalena y Emilio que me apoyaron siempre. Cada uno de manera distinta, pero siempre de corazón, con una gran sonrisa y amor sincero. Y a pesar de que hoy no todos están aquí ahora en estos momentos, sé que su alma si lo está, siempre los tengo presentes.

A mis mejores amigos Sydney, Genaro, Iván, Keisy, Ruth y Valentín, por siempre darme su amistad, palabras de ánimo, apoyo incondicional y consejos en los momentos más complicados de mi vida. A todos, muchas gracias de todo corazón.

AGRADECIMIENTOS

Primero y como más importante, me gustaría agradecer sinceramente a mi director y tutor de tesis, Dr. Eduardo Núñez, su esfuerzo y dedicación. Sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación como ingeniero. Él ha inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación completa como profesionalista. A su manera, ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado este trabajo de grado.

También me gustaría agradecer los consejos recibidos a lo largo de los últimos años por otros profesores del departamento de Ingeniería, que de una manera u otra han aportado su granito de arena a mi formación. Destacar al Dr. Eusebio Jiménez.

Y, por último, pero no menos importante, agradezco grandemente a mi Universidad La Salle Noroeste por haberme dado la oportunidad de ser parte de esta familia.

ANÁLISIS DE CULTIVOS UTILIZANDO TÉCNICA DE DESCOMPOSICIÓN DE BANDAS RGB Y FOTINTERPRETACIÓN DE IMAGEN SATELITAL

RESUMEN

El desarrollo del análisis de cultivos con procesamiento de imágenes requiere de la aplicación de diferentes herramientas, técnicas y métodos que permitan analizar los cultivos de manera eficiente. Sin embargo, dentro de los diferentes métodos que existen, hay algunos con los que se pueden obtener resultados genéricos como el método básico RGB y satelital, mientras que existen otros más especializados, precisos y costosos como el método con cámaras multiespectrales. En este trabajo de tesis se analizan los cultivos de manera general utilizando el método RGB, realizando la descomposición de las bandas de la imagen y fotointerpretación de imagen satelital haciendo la combinación de bandas de imagen del satélite Landsat 8. En el capítulo 4 se hará una comparación de las técnicas de análisis de imagen para determinar las ventajas de la utilización de cada método. El análisis de cultivos es logrado con ayuda del software ArcMap para el procesamiento de imágenes y mission planner para la calibración y operación del dron. Los métodos aplicados para el análisis de cultivos, son útiles para el estudio y detección de distintos fenómenos de la agricultura.

PALABRAS CLAVE

Análisis, procesamiento, bandas, detección, agricultura

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

Índice

DEDICATORIAS	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Planteamiento del problema.....	14
1.2.1 Formulación.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo principal.....	15
1.3.2 Objetivo específico	16
1.4 Justificación.....	16
1.5 Delimitaciones y limitaciones.....	16
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Conceptos de mecatrónica	18
2.1.1 Ramas de la mecatrónica.....	19
2.2 Introducción a dron	20
2.3 Componentes de esfuerzo mecánico.....	20
2.3.1 Estructura	20
2.3.2 Brazos	21
2.3.3 Placa electrónica.....	22
2.3.4 Hélices.....	22
2.3.5 Guardas de hélices.....	25

2.3.6	Patatas de aterrizaje	26
2.4	Componentes de esfuerzo eléctrico	26
2.4.1	Rotores brushless	26
2.4.2	Variadores de velocidad (ESC).....	28
2.4.3	Controlador de vuelo	31
2.4.4	GPS	32
2.4.5	Telemetría.....	33
2.4.6	Módulo de radio frecuencia	33
2.4.7	Unidad de medición inercial (IMU)	35
2.4.8	Batería	37
2.4.9	Tester de voltaje.....	40
2.5	Puesta en marcha del dron	41
2.5.1	Ensamblar el dron.....	41
2.5.2	Acoplamiento de partes externas (Cámara y Gimbal)	41
2.5.3	Calibración	43
2.5.4	Movimientos de orientación y conexión de batería.....	44
2.6	Análisis de cultivos.....	45
2.6.1	Software y tecnología de procesamiento.....	45
2.6.2	Tipos de problemas en cultivos.....	47
2.7	Análisis con el dron.....	48
2.7.1	Método de fotointerpretación de imagen satelital Landsat 8	52
2.7.2	Combinaciones de bandas en imágenes de satélite.....	52
2.8	Índices de procesamiento de imagen.....	53
2.8.1	Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI)	54
2.8.2	Índice de vegetación de la diferencia normalizada verde (GNDVI)	54

2.8.3	Índice diferencial de agua normalizado (NDWI).....	55
2.8.4	Índice de diferencia normalizada de humedad (NDMI)	56
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		57
3.1	Tipo de investigación.....	57
3.2	Diseño de investigación	58
3.3	Objeto de estudio	58
3.4	Hipótesis y variables.....	58
3.4.1	Descripción conceptual.....	58
3.5	Materiales e instrumentos	59
3.6	Procedimiento.....	59
3.7	Pruebas de calibración.....	59
3.7.1	Misión Planner Software.....	59
3.7.2	Conexión de dron con Mission Planner Software.....	60
3.7.3	Instalación del Firmware.....	61
3.7.4	Configuración de parámetros	62
3.7.5	Calibración del tipo de armazón	64
3.7.6	Calibración del acelerómetro.....	64
3.7.7	Calibración del GPS	66
3.7.8	Calibración de radiofrecuencia	68
3.7.9	Calibración ESC's.....	75
3.7.10	Configuración a prueba de fallos.....	76
3.7.11	Configuración del modo de vuelo.....	77
3.7.12	Configuración del monitor de batería.....	78
3.7.13	Configuración avanzada de telemetría	79
3.8	Prueba de operación de componentes.....	80

3.8.1	Principios de aeronáutica	80
3.8.2	El radiocontrol.....	81
3.8.3	Uso de la batería y consideraciones.....	81
3.8.4	Tester.....	85
3.8.5	Simulación.....	85
3.8.6	Consideraciones de seguridad.....	86
3.8.7	SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) Reglas de vuelo UAV....	86
3.8.8	Recomendaciones de uso y consejos.....	86
3.9	Obtención de imagen RGB e imagen satelital.....	87
3.10	Procesamiento de imagen en software ArcMap	89
3.11	Aplicación del método de descomposición de bandas de imagen RGB.....	90
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		96
4.1	Método fotointerpretación de imagen satelital landsat 8.....	96
4.2	Resultados obtenidos	97
4.2.1	Procesamiento en software ArcMap para fotointerpretación de imagen satelital landsat 8	97
4.2.2	Color Natural	98
4.2.3	Color infrarrojo.....	99
4.2.4	Agricultura.....	99
4.2.5	Vegetación saludable.....	100
4.2.6	Análisis de vegetación	101
4.2.7	Índice de vegetación (NDVI)	102
4.2.8	Vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)	103
4.2.9	Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).....	103
4.2.10	Índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI)	104
4.3	Comparación de métodos aplicados.....	105

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
5.1 Conclusiones.....	108
5.2 Recomendaciones.....	109
Bibliografía.....	110

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentará los antecedentes relacionados con el tema planteado de esta investigación, se conocerá a grandes rasgos el análisis de cultivos con procesamiento de imágenes mediante Dron Iris y el software ArcMap, también se hará el planteamiento de problema junto con su respectiva interrogativa para conocer si ¿Existe alguna ventaja para la agricultura al utilizar el método de descomposición de bandas RGB en comparación con el método de fotointerpretación de imagen satelital?. Posteriormente se desarrollará el objetivo general de esta tesis al mismo tiempo que se analizarán los objetivos planteados y cómo se llegará a la resolución de los mismos. Por último, se justificará cómo se beneficiará con respuestas claras y concisas, así como también las delimitaciones que se tendrán al desarrollar esta investigación.

1.1 Antecedentes

Cuerno Rejado (2016) menciona que la aviación no tripulada tuvo comienzo a lo largo de la primera mitad del siglo XIX por los inventores Du Temple, Cayley, Stringfellow y algunos otros que también fueron pioneros de la aviación los cuales hicieron pruebas e intentos por desarrollar primeramente naves aéreas tripuladas, haciendo modelos más grandes

para poder introducir un piloto a bordo de la nave, siendo así los que dieron pauta a la aviación tripulada.

Existen drones multirotor ya sea de 4, 5, 6, 7 hasta 8 rotores. Lo que esto quiere decir es que a mayor cantidad de rotores más estable es el dron. Un ejemplo sería si un dron de 6 rotores estuviera pasando por una situación crítica y dejará de funcionar uno de sus rotores, el dron puede mantenerse en el aire hasta lograr un aterrizaje forzoso lo cual un dron de 4 rotores no podría hacer, haciendo que se estrellara.

(Cuerno, 2016) un artículo publicado en mayo 2016 llamado “Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad” comentaron que la palabra dron proviene de la terminología anglosajona la cual significa señuelos. Otras fuentes dicen que le apodaban “zángano” ya que como son pequeños vehículos aéreos con hélice utilizados en los entrenamientos militares aéreos, y cuando utilizaban estas aeronaves se escuchaba un zumbido en los campos de entrenamiento, por eso surge ese apodo. El nombre que adoptaron estas aeronaves en los años 90 fue UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o vehículos aéreos no tripulados (VANT), anteriormente eran llamados vehículo aéreo pilotado remotamente (Remotely Piloted Vehicle, RPV) siendo el nombre UAV utilizado durante la guerra de Vietnam y posteriores.

Hay un documento que es llamado “Joint Publication 1-02, Department of Defense Dictionary” en el cual el Departamento de Defensa de los Estados Unidos define UAV como lo siguiente (Government, 2018):

“Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo un operador humano utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser manejado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga letal o no. No se consideran UAV a los misiles balísticos o semi balísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería.” (Government, 2018).

Al decir aviación no tripulada no nos estamos refiriendo solamente a un tipo de aeronave si no que más bien este término es utilizado para un gran espectro de aeronaves. Los drones surgen principalmente con un enfoque militar, por lo que la información acerca de éstos era muy poca y limitada, así como también en prototipos. Según un artículo

llamado “La era de los drones” de la revista Atenea comenta que en 2005 los drones suponían únicamente el 5% de la flota de aeronaves de las fuerzas armadas norteamericanas (Delgado, 2016). Al día de hoy ha habido un incremento del 5% al 31% de drones en la armada norteamericana (Delgado, 2016). Continúa el artículo comentando que se han gastado más de 26 billones de dólares en la tecnología UAV y que en los próximos 10 años se espera un gasto de 37 billones de dólares (Delgado, 2016). De hecho, un dato importante es que el gobierno de los Estados Unidos, refiriéndome al sector de la fuerza aérea entrena más pilotos de UAV que de aviones tripulados (Delgado, 2016). Los UAV se han convertido en una parte esencial de la milicia y actualmente el campo de acción de estas aeronaves no se limita solo a esa área en específico. La utilización de los drones, con el tiempo, ha pasado de ser utilizado para fines militares a convertirse en algo cotidiano que cualquiera pudiera tener en casa.

El constante desarrollo de la tecnología y la investigación permite un gran avance no sólo en los drones militares, sino que también se han comenzado a aprovechar el uso de estos vehículos en diferentes áreas muchas veces en tareas de alto riesgo en la que la integridad de la vida humana corre peligro, así como también en algunas otras actividades utilizados como herramientas, por lo que lo que cada día se encuentra una nueva función que facilita la vida humana por medio de este sistema. Algunos ejemplos de aplicaciones de estas aeronaves son muy variados. Para conocer un poco más acerca de en qué áreas es benéfico la utilización de drones se darán algunos ejemplos:

El aire es de las cosas más importantes para los seres humanos y la preocupación por mantenerlo en buena calidad siempre se mantiene alerta ya que debido a la contaminación cada vez más el aire se vuelve dañino y peligroso que como resultado produce enfermedades cancerígenas debido a los contaminantes atmosféricos. La utilización de los drones entra en juego como herramienta utilizada para llevar a cabo el seguimiento y control medio ambiental lo cual con anterioridad era una tarea más costosa que se realizaba por medio de aviones o globos por lo cual mediante la intervención de sensores en las aeronaves no tripuladas los drones se han convertido en un gran acierto para la recolección de datos y pruebas físicas del aire.

Un artículo publicado en una revista europea llamada “La suma de todos” comenta que la cartografía es una técnica que interpreta, analiza y representa geográficamente parte o todo de la superficie de un astro (Consejería y economía de hacienda, 2015). Desde la antigüedad se ha hecho uso de la cartografía para analizar los elementos que en ella intervienen. Los instrumentos para representar la cartografía en el pasado eran mediante el papel y tinta o lápiz, la cual ha evolucionado a la representación digital. Los sistemas aéreos remotamente pilotados o más conocidos como drones, han sido una herramienta muy útil y eficaz en la obtención de información ya que ahorra tiempo, reduce los costos y genera resultados muy positivos. Los datos capturados son imágenes aéreas que permiten recoger imágenes de diferentes bandas del espectro electromagnético, o en otras palabras captan lo que a simple vista no podríamos observar. Desde el aire los drones hacen un trabajo excepcional y han sido tan buenas herramientas que se han convertido en la base de procesos diversos que son utilizados para crear la cartografía que se desee.

La revista europea mencionada anteriormente llamada “La suma de todos” comenta que en el año 2013 se llevó a cabo un estudio que determinaba el impacto económico de la integración del sistema aeroespacial no tripulado en la economía de EE.UU. el cual reveló que los mercados más prometedores son los de la agricultura y seguridad pública ya que juntos representaban el 90% de los mercados potenciales (Montesinos, 2015). El objetivo del uso de los drones en la agricultura es ofrecer facilidad para la observación de sus plantíos desde el aire obteniendo así una perspectiva del estado de sus plantaciones y determinar si se encuentra en buen estado o si es víctima de plagas, hongos que no se pueden ver desde la perspectiva terrestre. Actualmente existe tecnología infrarrojo reflejado y térmico con lo cual, mediante cámaras multiespectrales pueden obtener una caracterización de lo que ocurre en ciertas áreas del terreno mediante gráficas pudiendo controlar y guardar los datos en aplicaciones especiales mediante un ordenador o un smartphone.

La seguridad es algo indispensable que debe existir todo el tiempo, y cuando se trata de una frontera el control es algo esencial ya que las fronteras son unas de las zonas más afectadas por la inmigración y el tráfico de drogas. Se han estudiado y buscado diferentes tecnologías como medios de vigilancia y una de esas tecnologías que ha cobrado mayor

protagonismo son los drones ya que no solo puede detectar unidades terrestres, sino que también es muy útil para detectar objetivos aéreos como pueden ser pequeñas avionetas o helicópteros. Como estas aeronaves pueden ser configuradas para hacer sus propios recorridos sin necesidad de un humano que la esté dirigiendo mediante radiocontrol hace que esta tecnología sea muy versátil.

1.2 Planteamiento del problema

El descubrimiento de nuevas tecnologías ha crecido exponencialmente en los últimos años y uno de los sectores que más se ha beneficiado de este gran desarrollo es el área de los drones multirrotor lo cual ha conllevado a diferentes industrias a la investigación y construcción de prototipos. La razón por la cual este sector ha tenido un gran auge que se incrementa cada año es debido a que actualmente hay situaciones de alto riesgo que requieren la intervención de estos dispositivos. Se estima que en unos años más los drones sean algo más habitual entre la sociedad ya que tienen muchos campos de acción en los cuales pueden ser de gran utilidad obteniendo grandes beneficios.

El análisis de cultivos con procesamiento de imágenes cada vez es más desarrollado en la actualidad, ya que se requieren vehículos que sean capaces de incorporar distintos componentes que ayuden a facilitar la resolución tareas más complejas, tales como cámaras o distintas clases de sensores, de esta forma, ayudan a los agricultores a identificar mejor la salud de la vegetación para poder tomar decisiones acertadas basándose en los datos recolectados de las parcelas beneficiando en gran manera al sector de la agricultura.

Para el análisis de los cultivos mediante imágenes se aplicará el método de descomposición de bandas de la imagen RGB tomada por el dron y el método de fotointerpretación de imagen satelital.

¿Existe alguna ventaja para la agricultura al utilizar el método de descomposición de bandas RGB en comparación con el método de fotointerpretación de imagen satelital?

1.2.1 Formulación

El descubrimiento de nuevas tecnologías ha crecido exponencialmente en los últimos años y uno de los sectores que más se ha beneficiado de este gran desarrollo es el área de los drones multirrotor lo cual ha conllevado a diferentes industrias a la investigación y construcción de prototipos. La razón por la cual este sector ha tenido un gran auge que se incrementa cada año es debido a que actualmente hay situaciones de alto riesgo que requieren la intervención de estos dispositivos. Se estima que en unos años más los drones sean algo más habitual entre la sociedad ya que tienen muchos campos de acción en los cuales pueden ser de gran utilidad obteniendo grandes beneficios.

El análisis de cultivos con procesamiento de imágenes cada vez es más desarrollado en la actualidad, ya que se requieren vehículos que sean capaces de incorporar distintos componentes que ayuden a facilitar la resolución tareas más complejas, tales como cámaras o distintas clases de sensores, de esta forma, ayudan a los agricultores a identificar mejor la salud de la vegetación para poder tomar decisiones acertadas basándose en los datos recolectados de las parcelas beneficiando en gran manera al sector de la agricultura.

Para el análisis de los cultivos mediante imágenes se aplicará el método de descomposición de bandas de la imagen RGB tomada por el dron y el método de fotointerpretación de imagen satelital.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

- Aplicar técnicas para el análisis de cultivos mediante el procesamiento de imágenes utilizando el método de descomposición de bandas de imagen RGB y el método de fotointerpretación de imagen satelital para comparar y determinar que método es más beneficioso para su aplicación en la agricultura.

1.3.2 Objetivo específico

- Aplicar el método de descomposición de bandas de imagen RGB para analizar la vegetación de una hectárea de cultivo.
- Aplicar el método de fotointerpretación de imagen satelital para analizar la vegetación y agua de un cultivo de un área determinada.

1.4 Justificación

Para el ser humano siempre han existido diversas tareas complicadas que ponen en peligro vidas humanas, muchas veces estos peligros que se enfrentan se derivan de causas naturales que no pueden ser controladas por el hombre y así como también debido a consecuencia de errores humanos. Ante tales situaciones tanto las instituciones como los seres humanos se esmeran por crear herramientas que faciliten la acción de estas tareas. Existen muchos casos en donde un humano no puede tener fácil acceso a ciertas áreas de los cultivos o no pueden realizar una inspección adecuada debido a las grandes extensiones de tierra que existen, por lo cual es conveniente hacer uso de drones que permitan la ejecución de esta clase de tareas y así garantizar el ahorro de recursos tanto como para el cuidado y mantenimiento adecuado de las mismas a la vez que se evitan accidentes, integridad, salud y vida de los humanos. En estos casos el uso de un dron es de gran ayuda ya que puede desarrollar tareas de diferentes tipos como por ejemplo la identificación de plagas, maleza invasiva, cultivos dañados, áreas con mala distribución de agua, identificación de zonas con crecimiento heterogéneo y vigilancia contra incendios e intrusos, de manera que se aproveche esta alternativa que ofrece grandes beneficios mediante la aplicación de métodos sencillos y eficaces.

1.5 Delimitaciones y limitaciones

Para realizar esta investigación se usará el Dron modelo Iris para la toma de fotografías aéreas en 1 hectárea de terreno a 13 km en la carretera Navojoa - Huatabampo, uso del software ArcMap para el análisis de las imágenes; Aplicación de técnica color natural, infrarrojo, agricultura, vegetación saludable, análisis de vegetación, índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación de la diferencia normalizada

verde (GNDVI), índice diferencial de agua normalizado (NDWI), índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI); uso de la plataforma web Earth Explorer para la descarga de imágenes satelitales de la zona del valle del yaqui; Se harán pruebas de calibración y operación por medio del software Mission Planner para la configuración del Dron Iris. Este estudio no tuvo ninguna limitación.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe el marco teórico relacionado con el presente trabajo de tesis.

2.1 Conceptos de mecatrónica

Las implicaciones basadas en el enfoque evolutivo de la ingeniería en mecatrónica como una disciplina integradora han sido retomadas en las áreas de la mecánica, electrónica, informática y/o control desarrollándose a su vez con una tarea por el nuevo bien al servicio, a la nueva tecnología, a la fuente de insumos y al tipo de organización y necesidad de las empresas, de las industrias y de la sociedad. Es decir, la mecatrónica pretende proporcionar mejores productos, procesos y sistemas. Por lo tanto, “Mecatrónica se define como la combinación sinérgica de mecánica de precisión, electrónica, control de ingeniería de sistemas para el diseño de productos y de procesos de manufactura. Está relacionada con el diseño de sistemas, dispositivos y productos los cuales se fijan en lograr un balance óptimo entre la estructura mecánica básica y su control” (UNAM, 2016). Otra definición de mecatrónica es, “La integración cada vez más creciente de los sistemas creados con la mecánica y la electrónica han llevado a la fusión de estas dos disciplinas formándose una nueva llamada MECATRÓNICA, misma que está siendo aplicada en la automatización y control de las fábricas, en la industria automotriz, en las máquinas de

control numérico, en la robótica, en las celdas de manufactura flexible, en la ingeniería biomédica, en las cámaras de video, en las unidades de disco flexible, etc. Como quiera que sea, se refiere exclusivamente a una integración multidisciplinaria en el diseño de sistemas de manufactura y productos en general. Esta representa la nueva generación de máquinas, robots, y mecanismos expertos necesarios para realizar trabajo en una variedad de ambientes, principalmente en la automatización de las fábricas, de las oficinas, y de las casas.” (UNAM, 2016).

2.1.1 Ramas de la mecatrónica

La ingeniería en mecatrónica consta de disciplinas muy amplias y complejas es por eso que los campos de aplicación son muy diversos, con el objetivo principal de cubrir necesidades como: Automatización de la maquinaria, creación de productos inteligentes, buena relación entre los componentes electrónicos y mecánicos.

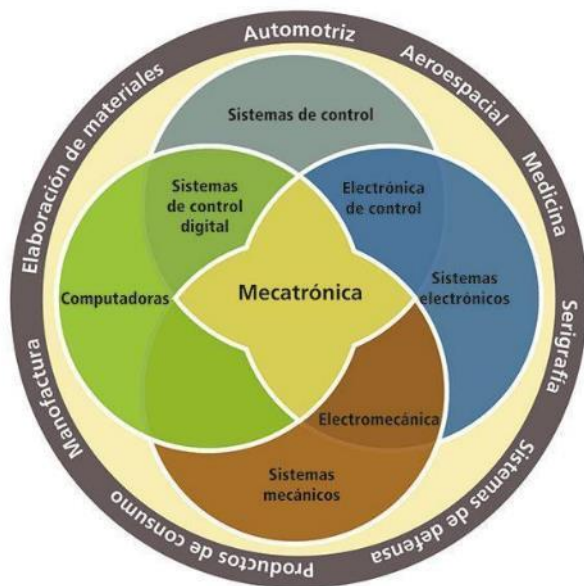


Figura 1 - Ramas de la ingeniería en mecatrónica (Saber y ciencias, 2013)

La Ingeniería Mecánica consiste en una rama de la física que estudia y analiza el movimiento de los cuerpos bajo acción de fuerzas. La rama de la Ingeniería Electrónica se encarga de resolver problemas de la ingeniería tales como el control de procesos industriales y la transformación de la electricidad para el funcionamiento de diversos dispositivos. La Ingeniería de Control, Conocida también como ingeniería automática

aplica los elementos sistemáticos relacionados con otras aplicaciones de la tecnología de la información para el control industrial de maquinaria y procesos, reduciendo la necesidad de intervención humana y por último la rama de la Ingeniería Informática Aplica los fundamentos de la ciencia de la computación, la electrónica y la ingeniería de software, para el desarrollo de soluciones integrales de cómputo y comunicaciones, capaces de procesar información de manera automática.

2.2 Introducción a dron

Gracias a la mecatrónica actualmente podemos crear herramientas más sofisticadas y fundamentales para satisfacer necesidades comerciales, militares y recreativas, como es el caso de los drones. Humanamente siempre se ha necesitado de la innovación constante, ya que esto forma parte de la comodidad humana, ya que un dron puede servir no sólo para fines militares, sino para la recreación, creación de películas, aspectos comerciales y aplicaciones en la agricultura.

Con la integración de las cuatro áreas que conforman la mecatrónica; electrónica, mecánica, computación y control, actualmente es posible desarrollar dispositivos que combinan estructuras mecánicas con circuitos controladores electrónicos. Con el paso de los años la tecnología ha ido avanzando a pasos agigantados y se han logrado dispositivos más inteligentes, empleando las energías renovables, ciencias de la computación, óptica y control automático. Actualmente se utilizan nuevas tecnologías de manufactura integrada por computadora, software y robótica.

Teniendo en claro la relación de las áreas de la mecatrónica para el desarrollo de los drones, podemos clasificar todas sus partes en las siguientes categorías.

2.3 Componentes de esfuerzo mecánico

2.3.1 Estructura

La estructura principal está compuesta por cuatro brazos prefabricados de plástico que se sujetarán por el centro con una placa que servirá como soporte para que no haya juego entre los brazos y a la misma vez sirve como red eléctrica principal.



Figura 2 - Chasis o frame (ChickenFPV, s.f.)

2.3.2 Brazos

El dron está formado por una serie de brazos que sostienen los motores y conforman la estructura del dron. Estos pueden ser de distintos materiales, tales como, fibra de carbono, los cuales son muy resistentes, pero en contraparte son pesados, por lo tanto, este tipo de material suele ser el más costoso. También podemos encontrar drones fabricados con fibra de vidrio, no son tan resistentes como los de fibra de carbono, son más débiles, pero gracias a esto, son más ligeros y por lo tanto un poco más económicos. El tercer material que se utiliza es el plástico. Este es el material que generalmente tienen los drones para principiantes o enfocados a la educación. Este material es el más económico de todos.

Su diseño consta de aberturas, ya que a través de esas cavidades se introducirán los cables desde el extremo central donde estará el cerebro y la batería para poder hacer la comunicación con los controladores de velocidad o (ESC) por sus siglas en inglés, los cuales darán la potencia a los motores.

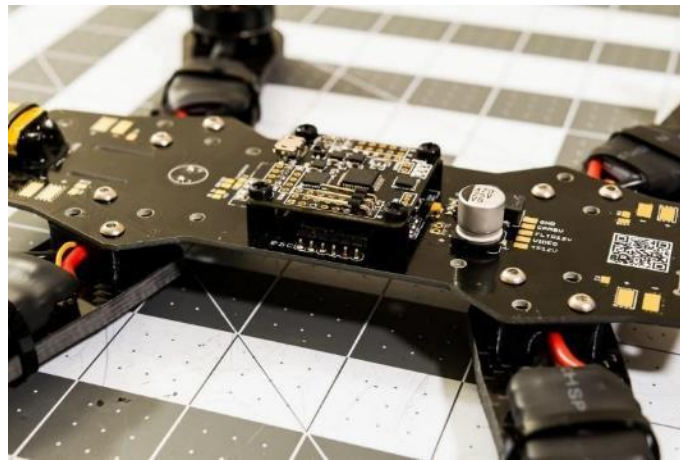


Figura 3 – Brazos (ChickenFPV, s.f.)

2.3.3 Placa electrónica

La placa electrónica o base inferior, es llamada así por tener la función de dar el soporte principal y además sirve como red eléctrica para la conexión de la batería y de los ESC's.

Figura 4 - Placa electrónica (ChickenFPV, s.f.)



2.3.4 Hélices

Seleccionar el motor es solo una parte de la ecuación. Para tener buen empuje y una buena estabilidad se necesita saber qué tipo de hélices son las adecuadas para nuestro dron. Primeramente, antes de elegir los parámetros de pitch y diámetro de las hélices tienes que tomar en cuenta el tamaño de tu dron ya que no se quiere que al momento de instalar las hélices se superpongan unas con otras, lo cual si no fuera así haría que las hélices se fracturaran y se dañarán los motores (Juniper, 2015).

Hay dos factores claves que debes de tener en consideración al momento de decidir qué hélices elegir, estas son tamaño y el diámetro de paso o también llamado pitch.

un
qué

Podemos entender pitch como la distancia teórica que una hélice se movería a través del aire en una revolución. Es decir, una hélice de 5 pulgadas de pitch debería moverse hacia adelante 5 pulgadas por cada revolución. (SOLAS Science & Engineering Co., Ltd., s.f.)

Cabe recalcar que a mayor diámetro de paso o pitch mayor turbulencia habrá, pero tendrá más potencia, por lo tanto, si tu dron es inestable se debería optar por unas hélices de menor diámetro de paso y tamaño (Juniper, 2015).

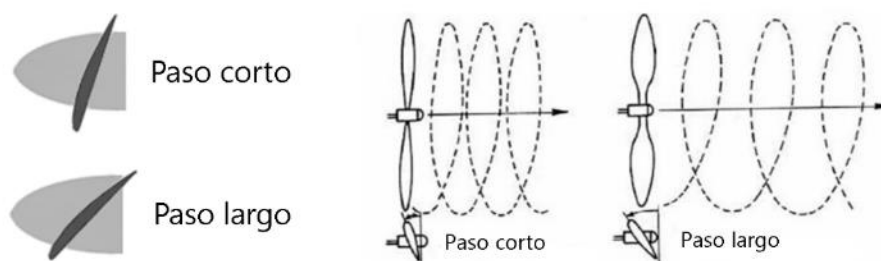


Figura 5 - Diámetro de paso de hélices (Juniper, 2015)

Las hélices que tienen menor diámetro de paso son más pequeñas lo que provoca menos movimiento inercial que las hélices más grandes, haciéndolas más fáciles para iniciar y aprender a volar (Juniper, 2015). Al tener menos inercia al momento de ajustar la velocidad de los rotores se podría decir que es una ventaja ya que al producir menos inercia al ajustar las velocidades lo cual está haciendo constantemente se tendrá mayor velocidad, pero tendrá menos control y potencia de empuje.

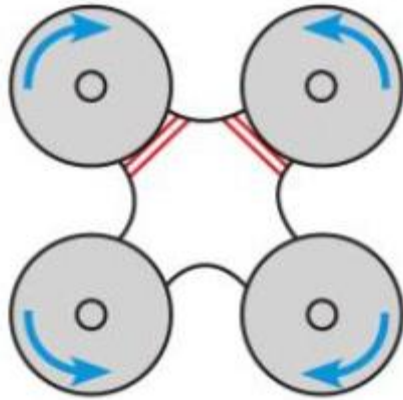


Figura 6 - Rotación de hélices (Juniper, 2015)

Las hélices se pueden encontrar en distintos tamaños y materiales, por ejemplo, de plástico y de fibra de carbono. Las hélices de fibra de carbono son más resistentes y más ligeras que las de plástico. Se pueden usar e intercambiar de manera indistinta ya que el material no es un factor determinante al momento de elegir ya que las propiedades del motor se ven afectadas muy poco, lo único que se debe de considerar es que sean simétricamente iguales al igual que el peso ya que de no ser así se podrían producir vibraciones inesperadas (Juniper, 2015).

En caso de que haya alguna inestabilidad una de las razones más comunes es que las hélices están desbalanceadas. Para balancearlas se debe introducir por el agujero central de la hélice una varilla que encaje con el ancho del agujero la cual utilizaremos como punto de apoyo. Dejando la hélice sin provocar movimiento alguno debería de quedar en una posición horizontal. En caso de que la hélice se inclinara hacia algún lado es un indicador de que la hélice tiene alguna descompensación. Hay varias maneras para corregir esta descompensación, o se añade más peso en una pala de la hélice o se le quita peso a la pala de la hélice opuesta. La opción más recomendada es limar muy ligeramente la superficie de la pala que ha mostrado descompensación, este proceso de debe repetir hasta que la hélice se mantenga completamente horizontal sin aplicar esfuerzo alguno.

(Juniper, 2015) comenta en su libro *“The Complete Guide to Drones”* que algo grandioso de las hélices es que pueden ser reemplazadas muy fácilmente por otras por un costo que no es relativamente caro. Es recomendable utilizar las hélices pequeñas de plástico para aprender a controlar un dron ya que son más baratas, ahora, en caso de que la aplicación

que se le vaya a dar al dron sea de utilizar una cámara pesada las hélices de fibra de carbono cobran ventaja ya que para este tipo de aplicaciones lo más importante es la estabilidad y la fuerza de empuje.



Figura 7 - Hélices de fibra de carbono (Birau, 2015)

Una de las desventajas de las hélices de fibra de carbono es que son peligrosas ya que al tener una dureza mayor que el de las de plástico estas podrían provocar un grave accidente si no se tiene cuidado al momento de operarlas en un espacio cerrado o un mal control en un área en campo abierto, así como también el precio de estas es más elevado, y ya que se recomienda tener un par de hélices extras en caso de algún accidente provoca que estas produzcan un gasto económico mayor.

Los motores tienen una velocidad óptima en la cual son más eficientes, por lo tanto, si se quiere un mayor rendimiento en el aire se necesita asegurarse de que la hélice que se ha elegido rote a una velocidad consistente con el motor sin crear un esfuerzo extra al motor. Las hélices están atadas al motor mediante unos adaptadores que tienen un agujero en el centro que es donde se colocan las hélices para evitar pegarlas con algún tipo de adhesivo lo que nos quitaría estabilidad y eficiencia en caso de haberlo hecho así.

2.3.5 Guardas de hélices

Estas piezas son utilizadas para proteger tanto al usuario como al dron mismo. Si por alguna razón el dron cae o colisiona contra alguna superficie, estas guardas de hélice las protegen de impactos en caso de algún accidente, para que se mantengan en buen estado

y no sufran algún daño o avería. También se utilizan por seguridad para el operador o cualquier persona cercana al dron, en caso de alguna falla técnica o algún descuido las hélices comiencen a funcionar, la persona no sufra daño alguno.



Figura 8 - Protectores de seguridad de hélices (Juniper, 2015)

2.3.6 Patas de aterrizaje

Las patas de aterrizaje son utilizadas no solo para aterrizar como su nombre lo indica, sino que también tienen la funcionalidad de, en caso de utilizar alguna cámara para la toma de video o captura de fotografías las patas de aterrizaje proveen de altura necesaria para que la cámara no entre en contacto con el suelo, manteniendo así la integridad de la cámara intacta y segura.



Figura 9 - Patas de aterrizaje (DJI, 2015)

2.4 Componentes de esfuerzo eléctrico

2.4.1 Rotores brushless

Existen dos tipos de rotores: rotores con escobillas y sin escobillas. (Parodi, 2015) comenta en su artículo llamado Motores sin escobillas y tarjetas electrónicas de control de velocidad, que los rotores con escobillas dependen de una conexión física entre las escobillas de carbón y el rotor giratorio para conducir la electricidad.

Esta conexión lo que hace es crear fricción al momento de girar el rotor con lo cual no solo se produce un desgaste de las escobillas, sino que también desperdicia energía y crea resistencia.

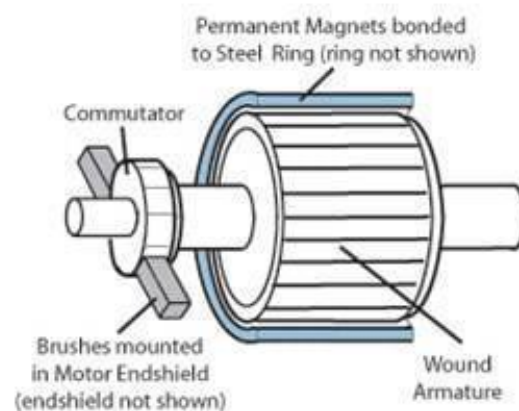


Figura 10 - Rotor con escobillas (McGrady, 2016)

Un artículo de (Parodi, 2015) comenta que “los motores sin escobillas también son conocidos como motores conmutados electrónicamente ya que son motores que son alimentados por corriente directa y con sistemas de conmutación electrónica, en lugar de utilizar conmutadores mecánicos y escobillas. Los motores sin escobillas podrían describirse como motores de avance gradual, con imanes permanentes en el rotor, y posiblemente más polos en el rotor que en el estator o motores de reluctancia”

Otro punto de diferencias entre los motores con escobillas y sin escobillas es que los motores con escobillas se calientan más rápido ya que están en constante fricción y en consecuencia su vida útil es más corta en comparación con los brushless.

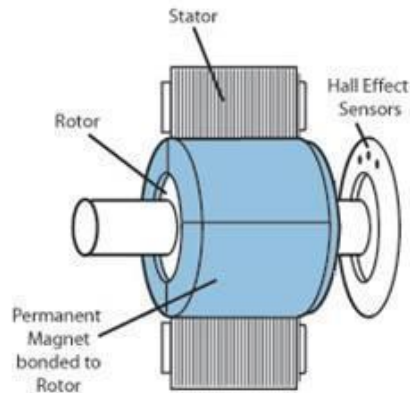


Figura 11 - Motor sin escobillas (McGrady, 2016)

Dentro de los rotores brushless existen dos categorías. La primera se llama outrunner, en los cuales el bobinado se fija al núcleo del rotor y los imanes permanentes del rotor son los que rodean al núcleo con el bobinado fijo generando un movimiento. Los outrunner ofrecen una velocidad de giro menor que los inrunner, sin embargo, el torque que producen los outrunner es mayor.

Los rotores brushless inrunner tienen situados los imanes en la parte interna del motor o núcleo mientras que el bobinado es el que los rodea, creando así un movimiento. Lo que este tipo de rotores nos ofrecen es una velocidad de giro elevada, incluso puede darnos tanta velocidad de giro que pueda rebasar la velocidad máxima recomendada para el giro de los drones multirrotor. Estos rotores ofrecen un torque muy bajo por lo que no será eficiente al momento de colocar los componentes extras tales como la cámara o los distintos sensores.

La cantidad de polos que tienen los imanes tanto del bobinado interior como los imanes de la carcasa exterior definen a los rotores. Estos rotores serán controlados mediante una placa electrónica llamada ESC (Electronic Speed Controller) por sus siglas en inglés las cuales generarán tres señales sinusoidales con las cuales se regulará la velocidad requerida.

2.4.2 Variadores de velocidad (ESC)

Se le llama Controlador Electrónico de Velocidad o (ESC) por sus siglas en inglés al circuito que se encarga de convertir la corriente en una señal trifásica que hace al rotor girar a más o menos revoluciones por minuto ya que lo alimenta por medio de pulsos, pues como se ha explicado, los rotores brushless o rotores sin escobillas necesitan una señal trifásica para poder funcionar, como ya se había mencionado en el tema anterior.

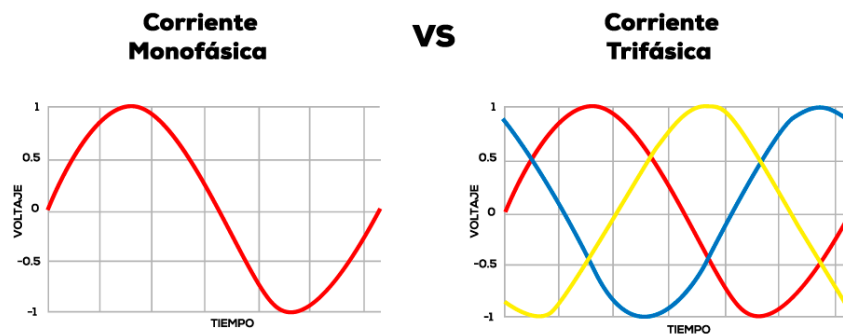


Figura 12 - Corriente monofásica vs corriente trifásica (Olivera, 2018)

Existen diversos tipos de ESC, lo que varía entre los diversos modelos es la cantidad de amperaje que pueden recibir de la batería y si tienen un Circuito de Eliminación de Batería también llamado (BEC) por sus siglas en inglés.

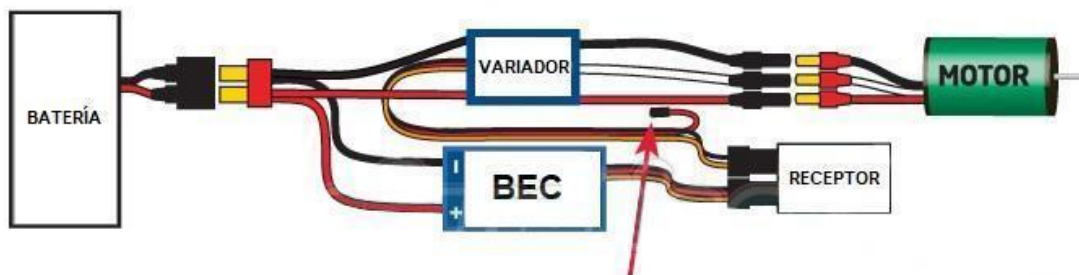


Figura 13 - Circuito de eliminación de batería BEC (RC FANATIC, 2019)

Antes de elegir un ESC se debe mirar la cantidad de amperaje total del circuito y nos da un ejemplo “si entre todos los motores y el control de vuelo de le demandan 20 amperios a la batería, bastará con conseguir controladores de velocidad de 25 A. Cabe notar que siempre se debe conseguir controladores que soporten más corriente de la demandada para no llegar a dañarse si la corriente aumenta en algún momento.”

Un ESC se compone de las siguientes partes: Dos cables que corresponden a la entrada de alimentación de la batería. Tres cables que se conectan al motor para proveerlo de

alimentación mediante pulsos. Un conector con dos o tres cables, los cuales van conectados a la controladora de la que recibe datos para mover el rotor, el número de cables dependerá de si el ESC lleva incluido un BEC (tres cables) o no (dos cables). Por último, el circuito ESC contiene la parte electrónica que hace posible su funcionamiento, el tamaño de un ESC varía mucho dependiendo de si tiene BEC (más grande) o si no lo tiene (más pequeño).

Un circuito de eliminación de batería o también llamado Battery Elimination Circuit por sus siglas en inglés (BEC) es un circuito electrónico que su función es suministrar energía eléctrica a otros circuitos sin necesidad de una batería extra. Básicamente el BEC es un regulador y estos en su mayoría se encuentran integrados dentro de los ESC. Siempre y cuando utilices una batería de más de dos celdas se integra por default el sistema BEC ya que tiene la energía necesaria para alimentar a otros circuitos, así como también para los rotores (Miller, 2016). La mayoría de los ESC vienen con un BEC integrado, aunque también hay ESC que no los tienen por lo que se tendría que comprar por separado dependiendo del proyecto. Generalmente al momento de comprar un ESC el vendedor especifica si viene con BEC integrado. Hay que tener sumo cuidado al momento de elegir qué es lo que se va a alimentar ya que si tenemos más de cuatro rotores el BEC podría quemarse haciendo que nuestro dron se venga a tierra, desplomándose y causando daños graves (Miller, 2016). En este caso es mejor buscar un Universal Battery Elimination Circuit o también llamado UBEC por sus siglas en inglés, el cual es lo mismo que el BEC solo que la diferencia entre ambos es que el BEC viene integrado en el ESC y el UBEC es cuando se instala por separado o independientemente del ESC.

Existen dos tipos de BEC, los switching y los lineal. Los del tipo Switching BEC utilizan un transformador reductor o también llamado BUCK. Son mucho más eficientes que los lineales ya que estos no necesitan disipar el calor. La manera en la que funcionan es: cargan la bobina y muy rápidamente sueltan el voltaje cargando de nuevo la bobina por lo cual siempre se mantiene en una buena temperatura (Miller, 2016).

Los Linear BEC son reguladores lineales. Su funcionamiento es muy parecido a la de una resistencia por lo cual genera demasiado calor (Miller, 2016).

Ahora se explicará cómo es el funcionamiento del ESC. Primeramente la controladora principal o cerebro la cual se encarga de enviar los datos calculados en función de la posición del dron y la posición del stick o palanca con la cual se controla la velocidad de los motores y por lo tanto el dron. De esta forma la información viajará en forma de datos a través del conector correspondiente hacia el ESC. Después, cuando la información llega al controlador de velocidad el variador o ESC hará una petición o demanda de energía o amperaje a la batería a través de sus cables de conexión y posteriormente se produce la traducción de corriente a pulsos dentro del ESC creando así una señal de pulsos que se transmiten al rotor a través de tres conectores haciendo que el motor se mueva.

Existen un tipo de ESC para cada tipo de dron, el cual dependerá del tipo de empuje, lo cual está determinado por dos factores que están muy relacionados con los parámetros de las hélices y la batería.

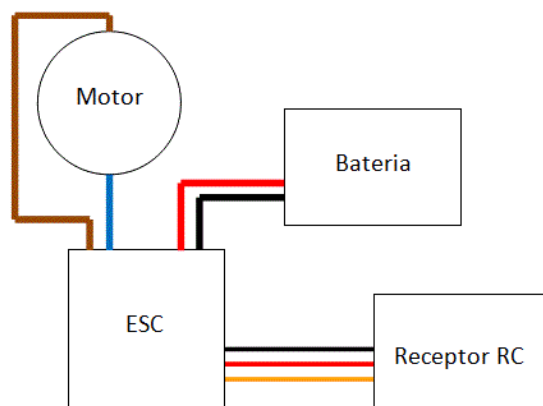


Figura 14 - Conexiones ESC (Aula fácil, 2022)

Hay una relación del amperaje del ESC con la batería el cual se debe de tomar en cuenta para evitar daños y que el funcionamiento sea el correcto. Por ejemplo, si se utiliza una batería 3S, con un ESC de 12 A será más que suficiente ya que el voltaje máximo que disipan las baterías 3S es de 11.1 V. Si utilizáramos una batería 5S se debería utilizar un ESC de 20 A ya que la batería 5S disipa 18.5V. Lo que se quiere dar a entender con estos ejemplos es que al momento de elegir un controlador de velocidad la cantidad de amperaje del ESC sea mayor que el valor de voltaje de la batería.

2.4.3 Controlador de vuelo

El controlador de vuelo es el cerebro de la aeronave, tiene la función de hacer girar los motores de la manera adecuada para poder conseguir el movimiento deseado por el piloto o seguir las directrices del programa en vuelo automático (Birau, 2015). Este procesa la información que es recibida por los diferentes sensores que tiene como los datos de orientación para tener el control de los motores para tener un vuelo correcto.

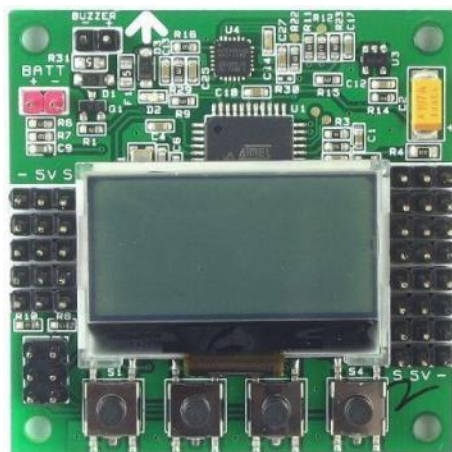


Figura 15 - Controlador de vuelo (Aula fácil, 2022)

Algunos controladores solo tienen un simple giroscopio, pero la mayoría que se utilizan actualmente tienen integrada una unidad de medición inercial o IMU.

2.4.4 GPS

Es un sistema que proporciona fiabilidad de navegación, posicionamiento y cronometría ininterrumpida a los usuarios. Con ayuda de mission planner y el receptor GPS podremos determinar la altura, velocidad, aceleración, distancia, recorrido automático por método de puntos, inclinación de los ejes y localización del dron de día o de noche en caso de perder la conexión entre el control remoto y el UAV, entre algunos parámetros más.



Figura 16 - Antena GPS montada en dron (Aula fácil, 2022)

2.4.5 Telemetría

La telemetría es una tecnología que permite transmitir de forma remota las magnitudes físicas medidas. Así, el operador podrá obtener de manera inalámbrica datos de diferentes zonas. También se puede configurar los parámetros del dron mediante esta tecnología en lugar de utilizar la entrada por micro USB.



Figura 17 - Antenas de telemetría (Wingtra, 2020)

2.4.6 Módulo de radio frecuencia

El módulo de radiofrecuencia está compuesto por un radio transmisor (TX) es un dispositivo que permite al piloto poder controlar el dron por medio de ondas de radio. El

funcionamiento de este consiste en la señal que es recibida por un receptor de radio (RX) ubicado en el dron que está conectado al controlador de vuelo (FC).

El radio transmisor cuenta con 4 canales generalmente, ya que exige como mínimo 4 acciones a realizar las cuales son el Roll (giro alrededor del eje longitudinal del aparato), el Pitch (giro alrededor de un eje transversal), el Yaw (giro alrededor de un eje vertical) y el acelerador.



Figura 18 - Módulo de radio frecuencia (Dinamo, 2019)

El número de canales define cuantas acciones individuales pueden ser controladas en el dron. Muchos de los diferentes y gran variedad de transmisores que existen permiten multiplicar el número real de canales gracias a la utilización del serial Bus, un ejemplo de esto es el modelo Flysky de 6 canales es en la práctica un potente transmisor de hasta un total de 10 canales.

Los canales que son adicionales en un radio transmisor son normalmente llamados canales auxiliares y suelen utilizarse particularmente en el mando en la forma de botones, interruptores o potenciómetros. Estos se pueden llegar a utilizar para activar ciertas funciones en el dron o para modificar los modos de vuelo.

La frecuencia más popular en el radio transmisor es de 2.4 GHz, es una tecnología más nueva y es actualmente la frecuencia más usada para pequeños aparatos de radiocontrol. Se utilizan frecuencias más elevadas para así conseguir alcances más largos. Las frecuencias que existen son: 27 MHz, 72 MHz, 433 MHz, 900 MHz y 1,3 GHz.

La función del receptor de radio consiste en que el dron podrá conectarse con el radiocontrol, que se encuentra en el dron propiamente y generalmente funciona en

rangos de frecuencia de 2,4 GHz. Todo esto forma una comunicación completa del radiocontrol que traslada las órdenes hacia el receptor, y el receptor a la placa controladora de vuelo (FC).

2.4.7 Unidad de medición inercial (IMU)

Este es un dispositivo electrónico cuyo propósito es adquirir mediciones de velocidad, rotación y fuerzas gravitacionales, disponiendo de una combinación de giróscopos, acelerómetros y a veces magnetómetros.

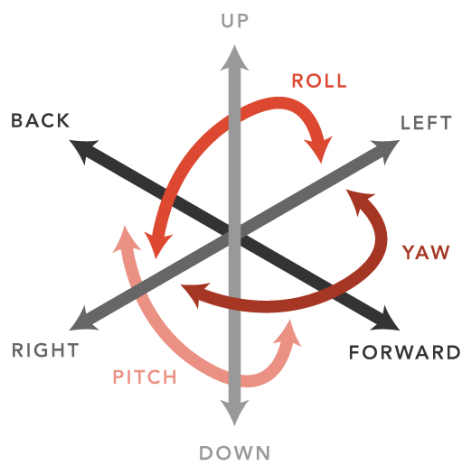


Figura 19 - Mediciones de rotación y desplazamientos (Prometec, 2019)

Para la detección del peso específico como la gravedad se utilizan uno más acelerómetros; Para ello, miden variaciones de velocidad perpendicularmente a la superficie del propio sensor, suministrando una tensión proporcional a la aceleración que sufre el sensor. Y para la detección de cambios de orientación se utilizan uno o más giroscopios que miden variaciones de ángulo en un eje determinado, entregando una tensión proporcional al ángulo de giro, o rotación, que sufre el sensor.

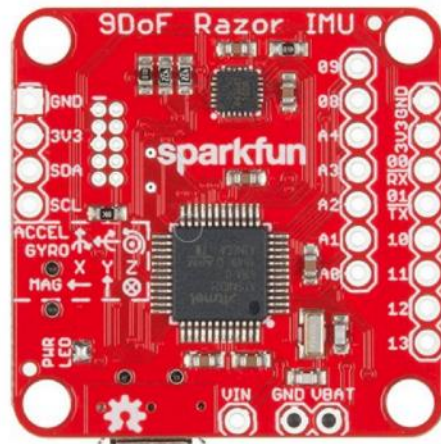


Figura 20 - Sistema de unidad de medición inercial (Prometec, 2019)

En términos generales el acelerómetro detecta el movimiento en línea recta y el giroscopio detecta el movimiento de rotación.

Ardupilot Mega (APM) es utilizado como piloto automático IMU (Unidad de medición inercial), cuyo objetivo es obtener mediciones de rotación, velocidad y fuerzas gravitacionales utilizando giroscopios y acelerómetros, siendo este de calidad profesional, el cual se basa en la plataforma Arduino Mega. Este piloto automático tiene distintos usos para drones, ya que puede controlar, helicópteros multirrotor, aviones de ala fija y helicópteros tradicionales. Es un piloto automático completo capaz de otorgar una estabilización autónoma, también navegación basada en puntos de referencia y telemetría bidireccional con módulos inalámbricos Xbee, las cuales funcionan para redes punto a punto (peer to peer) o punto a multipunto (fast point to multi point), lo cual permite el intercambio directo de información y están diseñadas para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. Soporta 8 canales RC con 4 puertos seriales.



Figura 21 - Arduino Pilot Mega (ArduPilot, 2009)

El software de control de fuente abierta se actualiza constantemente con nuevas y mejores características por parte de un equipo de aproximadamente 30 desarrolladores centrales, respaldado por una comunidad de más de 10000 miembros.

2.4.8 Batería

Las baterías LiPo son llamadas así ya que están compuestas de litio y polímero. Este tipo de baterías son muy comunes entre los dispositivos de sistemas eléctricos de radiocontrol, especialmente son más utilizados en aviones, helicópteros y drones. Estas baterías revolucionaron los sistemas de vuelo convencionales por los de tipo eléctrico y ahora son una opción muy viable respecto a los modelos que funcionan con combustible (Juniper, 2015).

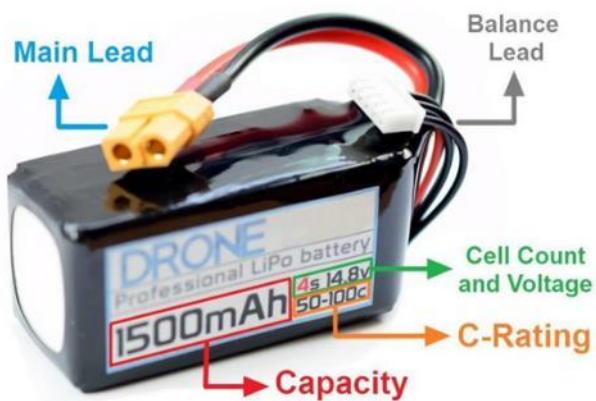


Figura 22 - Batería LiPo (Prometec, 2019)

Una de las principales ventajas de las baterías LiPo en comparación con las de níquel - cadmio o níquel - metal hidruro es que primeramente son ligeras y se pueden hacer casi de cualquier forma y tamaño dependiendo de la capacidad requerida. La segunda ventaja es que tienen una gran capacidad, es decir, tienen bastante energía en un tamaño considerablemente reducido. Por último, las baterías LiPo tienen una tasa de descarga alta para alimentar los sistemas eléctricos más exigentes (Juniper, 2015). De esta tercera opción se hablará a profundidad más adelante.

Hay algunos riesgos a considerar que pueden ser neutralizados, los cuales se pueden evitar haciendo un uso adecuado y cuidadoso de este componente. El primer riesgo es un problema de seguridad a causa del electrolito volátil ya que puede explotar o incendiarse, este elemento es utilizado exclusivamente en las baterías LiPo. La segunda característica es que para que duren mucho más que cualquier otra tecnología requieren de un cuidado único y adecuado. La esperanza de vida de estas baterías se ve afectada por la manera en que se carga, así como también la descarga de la misma y su almacenamiento.

Las baterías LiPo se pueden clasificar de acuerdo a sus características, para entender mejor este punto se darán a conocer algunos términos para hacer una correcta elección de la batería de acuerdo a nuestras necesidades.

Las baterías LiPo están compuestas por celdas, cuando no están completamente cargadas se mantienen a un voltaje de 3.7 V mientras que si está cargada en su totalidad puede llegar hasta 4.7 V (Toshiharu, 2015). El beneficio de estas baterías es que requerimos de menos celdas en la batería teniendo un voltaje alto.

Tabla 1 - Voltajes de carga de baterías LiPo con recuento de celdas (Prometec, 2019)

Voltaje de la batería	Celda
3.7 V	1 S
7.4 V	2 S
11.1 V	3 S
14.8 V	4 S
18.5 V	5 S
22.2 V	6 S

La letra “S” mostrada en la fila de la celda es una manera que los fabricantes utilizan para indicar el número de celdas conectadas en serie contenidas en la batería. Si se quiere aumentar la capacidad de las baterías deberán conectarse en paralelo, esto se indica mediante la letra “P”. La información para saber el número de baterías que se pueden conectar en paralelo es proporcionada por el fabricante.

La cantidad de energía que puede mantener la batería por hora se indica en miliamperios (mAh). Normalmente una batería de 1000 mAh es descargada en 2 horas, si fuera de 500 mAh sería descargada en 1 hora, esto puede variar dependiendo del tipo de descarga. Si se requiriera de más tiempo de funcionamiento se necesitaría aumentar la capacidad de la batería lo cual por supuesto aumentaría el tamaño y peso del componente (Toshiharu, 2015).

La tasa de descarga la podremos encontrar también en las baterías. La manera de identificarla es mediante la letra “C”. La tasa de descarga se refiere a la rapidez con que una batería puede ser descargada de forma segura sin ocasionar daños externos.

Para entender mejor esta característica tomaremos como ejemplo una batería de 1000 mAh la cual tiene una tasa de descarga 10C, es decir, se descargará a un ritmo de 10 veces más rápido que la capacidad normal de la batería, 15C = 15 veces, 20C = 20 veces, y así sucesivamente. Por lo tanto, si la batería es de 1000 mAh a 10C significa que puede dar una carga máxima sostenida de diez mil miliamperios. Para calcular el tiempo que la batería tardará en descargarse a su máxima capacidad consta de 4 pasos:

El primer paso es determinar la capacidad de la batería en miliamperios. El segundo paso es determinar cuántos miliamperios se gastarán por minuto en una descarga normal, por lo tanto, dividiremos la capacidad de la batería entre 60 minutos. El tercer paso es multiplicar ese resultado por el tipo de clasificación de descarga máxima, en este caso usaremos una clasificación 10C y finalmente el último paso es dividir ese resultado entre la capacidad de la batería y así obtendremos el tiempo en que la batería tardará en descargarse dando su tasa de descarga máxima en minutos.



Figura 23 - Ejemplo de características básicas de una batería LiPo (elaboración propia)

Operaciones del ejemplo anterior: $1000 \text{ mAh} / 60 \text{ minutos} = 16.6 \text{ mA por minuto} * 10 \text{ C} = 166 \text{ mA por minuto} / 1000 = 6 \text{ minutos}$. Es importante recalcar que una batería LiPo no se debe descargar a niveles muy bajos de energía o la batería podría dañarse a sí misma o a otros componentes, tal como los controladores de velocidad. Al momento de cargar la batería se debe asegurar de hacer uso de un cargador inteligente que tenga incluido una sonda de temperatura y ajuste de corte de temperatura para así evitar sobrecalentar la batería y mantenerla a una temperatura estable. Existe una regla muy útil para evitar percances, se llama la regla del 80% la cual se refiere a que no se debería dejar descargar más del 80% de la capacidad de la batería y así siempre mantenerse en una zona segura libre de riesgos.

2.4.9 Tester de voltaje

El Tester es un módulo que detecta el voltaje total de las celdas en un rango de 3.7 a 30 V, lo que significa que se puede probar la batería sin necesidad de conectores de balance adicionales y sin necesidad de alimentación externa ya que usa la energía de la batería que está midiendo, lo que te permitirá usarla como medidor de voltaje genérico, pero eso no es todo, además es configurable para activar la alarma sonora que se disparara cuando por alguno de los pines le ingrese un voltaje menor al configurado.

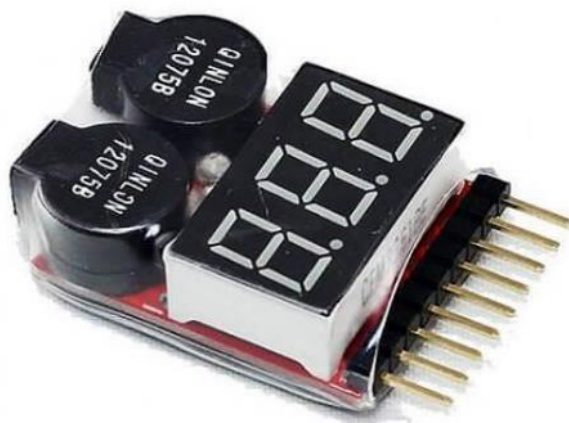


Figura 24 - Tester de voltaje (elaboración propia)

2.5 Puesta en marcha del dron

2.5.1 Ensamblar el dron

Para el ensamblado es necesario conocer las partes que componen un dron, y los materiales que utilizaremos para la construcción de nuestro equipo. El dron está conformado por el cuerpo o brazos, la placa en el que van los conectores electrónicos, controladora de vuelo y sus cables, batería, motores, los ESC y otros componentes de fijación como tornillos.

Una vez que tenemos todas las partes de nuestro equipo, debemos prepararnos para empezar a soldar, es por esto que de forma cuidadosa y siguiendo un protocolo debemos limpiar las piezas sensibles y dejarlas listas para comenzar a soldar. Ya teniendo todas las partes soldadas se procede a ensamblar el cuerpo del dron y los motores; y para finalizar tenemos el ensamblaje de la controladora de vuelo.

2.5.2 Acoplamiento de partes externas (Cámara y Gimbal)

Existen componentes adicionales para darle mayor estabilidad, seguridad y utilidad al equipo, como, por ejemplo, en la estructura del dron se puede acoplar una cámara para aprovechar el vuelo y capturar fotos o videos desde el aire. Dependiendo del tamaño del dron y su peso será la carga útil, por ejemplo, para agregar una cámara se tendría que considerar el peso. La carga útil puede variar en masa desde una fracción de kilogramo

hasta 20 kg dependiendo de la capacidad del dron. La carga útil puede ser un factor significativo en la configuración y disposición de la estructura del dron.

Normalmente se emplea un estabilizador o Gimbal para impedir que los movimientos propios del vuelo del multirrotor afecten las tomas. El cual la función del estabilizador es absorber la vibración de los motores y corregir automáticamente la inclinación de la cámara para que siempre esté en el mismo ángulo respecto al suelo. Algunos Gimbal también pueden ser conectados al Controlador de Vuelo y a través del control remoto el usuario puede cambiar el ángulo de inclinación de la cámara mientras el multirrotor está en el aire.



Figura 25 - Dron con cámara y Gimbal (DJI, 2015)

Otro componente externo al dron sería un FPV (vuelo en primera persona), este consiste en un sistema de transmisión y recepción del video capturado por la cámara, en tiempo real. De esta manera la persona que está volando el dron u otro interesado puede ver lo que el dron está “viendo”. Comúnmente se basa en conectar la cámara a un transmisor de video pequeño montado en el dron y un receptor con una pequeña pantalla para que el usuario la pueda cargar y ver mientras acciona el control remoto. Es de gran utilidad para lograr vuelos de grandes distancias o alturas de forma segura, y para capturar las mejores tomas durante un vuelo.



Figura 26 - Receptor de señal de video FOV y cámara (Prometec, 2019)

Y por último uno de los más usados, el GPS y Brújula, componentes que conectados al Controlador de Vuelo le permiten a éste conocer la altitud, velocidad y ubicación exactas del dron. A partir de esto, y dependiendo del programa que tenga el controlador, se podría automatizar el comportamiento del dron para conservarse estático en un mismo punto, volar hacia puntos predefinidos o volar en cierta dirección o velocidad relativa.



Figura 27 - Sistema de visualización FPV (Prometec, 2019)

2.5.3 Calibración

La calibración es una de las tareas más importantes antes de poner el dron en marcha, ya que si no se hace alguna pieza puede funcionar equívocamente y causar graves daños al UAV como al operador.

Para realizar una calibración efectiva se requerirá de mission planner, ya que este software es capaz de obtener información del dron y modificar sus configuraciones, lo cual permitirá realizar diferentes tareas e instrucciones específicas.

Los componentes que normalmente deben de ser calibrados son la actualización de firmware de la tarjeta de vuelo, la configuración de parámetros de vuelo, calibración del tipo de armazón para las hélices, el acelerómetro que su función principal es medir la aceleración de movimiento de un vehículo, la radiofrecuencia del control remoto con el receptor ubicado en el armazón del dron para la manipulación a distancia del mismo, también la calibración de los ESC's que son los controladores de velocidad electrónicos que permiten el flujo de energía adecuado a los motores, la configuración a prueba de fallos y auto aterrizaje, modos de vuelo específicos, configuración del monitor de la batería, configuración avanzada de telemetría y finalmente el GPS para determinar la posición del dron en cualquier parte de la tierra con una precisión desde centímetros a pocos metros en caso de perder la comunicación con el receptor instalado en el dron.

2.5.4 Movimientos de orientación y conexión de batería

Para comprender cómo funciona un dron debemos aprender tres principios básicos clave que son los movimientos de orientación específica, los cuales se llaman pitch, roll, yaw y la altitud.

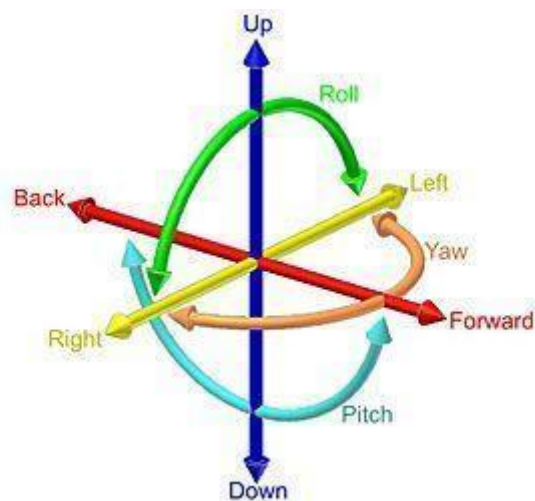


Figura 28 - Ejes de movimiento de un dron (Hutchinson, 2008)

Por medio del radiocontrol podremos controlar estos cuatro movimientos de orientación previamente mostrados mediante dos palancas. La palanca izquierda si se desliza hacia arriba controlará la velocidad de los motores, por lo tanto, varía la altitud del dron, y si se mueve en lateral controlará el yaw.

Por otro lado, la palanca derecha al desplazarla hacia arriba o hacia abajo controlará la orientación pitch, y si es movida hacia los lados controlará el roll.

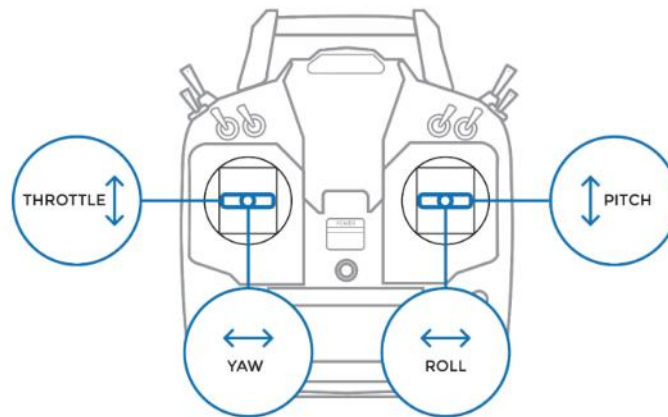


Figura 29 - Emisora de radio control y sus movimientos (Juniper, 2015)

La conexión de la batería cuenta con la técnica poka yoke para evitar errores al momento de conectar la batería a los ESC's. Siempre hay que cerciorarse de que la batería haya sido cargada por completo antes de utilizarla, ya que de no ser así la batería podría dañarse.

Si pretende guardar la batería por más de una semana asegúrese que el voltaje de cada celda es entre 3.8 y 3.9 volts. Siempre revise anomalías, y en caso de detectar alguna reemplace la batería.

Se recomienda utilizar simuladores de vuelo antes de volar un dron para practicar y perfeccionar sus habilidades.

2.6 Análisis de cultivos

2.6.1 Software y tecnología de procesamiento

ArcMap es una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería, especialmente para aquellos que trabajan con datos espaciales. Es un software desarrollado por Esri que nos permite trabajar con información geográfica de una manera muy avanzada.

Una de las principales cosas que podemos hacer con ArcMap es crear mapas digitales. Esto significa que podemos representar información geográfica, como carreteras, límites de propiedades, cuerpos de agua, y mucho más, en un formato digital. Esto es esencial

para muchos proyectos de ingeniería, ya que nos permite visualizar datos de manera clara y comprensible.

Otra función importante de ArcMap es su capacidad para realizar análisis espaciales. Esto significa que podemos estudiar cómo se relacionan diferentes características del terreno entre sí. Por ejemplo, podemos calcular distancias entre puntos, identificar patrones en los datos, o incluso predecir cómo cambiaría el paisaje en el futuro. Estas capacidades son esenciales para la planificación de proyectos de ingeniería, como la construcción de carreteras o el diseño de sistemas de drenaje.

Además, ArcMap nos permite gestionar nuestros datos geográficos de manera efectiva. Podemos importar datos de diferentes fuentes, como archivos de GPS o imágenes satelitales, y luego manipularlos según sea necesario. Esto incluye editar los datos para corregir errores o actualizar la información, así como realizar consultas para extraer información específica de nuestros conjuntos de datos.

ArcMap, como parte del software ArcGIS, utiliza tecnología avanzada para procesar información de imágenes. Este proceso es crucial para trabajar con datos visuales, como imágenes satelitales o fotografías aéreas, en proyectos de ingeniería.

Procesamiento de imágenes raster: ArcMap emplea técnicas especializadas para procesar imágenes raster, que son aquellas compuestas por píxeles y se utilizan comúnmente en aplicaciones geoespaciales. Estas técnicas permiten ajustar el contraste, corregir efectos atmosféricos, aplicar filtros y realizar clasificaciones para identificar distintas características en las imágenes.

Análisis de imágenes. El software proporciona herramientas para analizar imágenes, como clasificación supervisada o no supervisada, que ayudan a identificar elementos específicos en las imágenes, como cultivos, cuerpos de agua o áreas urbanas. También permite realizar análisis para detectar patrones y texturas en las imágenes, lo que es útil para comprender mejor la información visual.

Mosaico de imágenes. Cuando se trabaja con conjuntos de imágenes grandes, ArcMap permite combinar varias imágenes individuales en un solo conjunto coherente, lo que se

conoce como mosaico de imágenes. Esto es útil para crear imágenes de alta resolución y gran escala que pueden utilizarse para análisis detallados y visualización.

Georreferenciación. Esta función es esencial para asignar coordenadas geográficas a las imágenes, lo que permite superponerlas con otros datos geoespaciales, como mapas vectoriales o datos de elevación. Esto facilita la integración y comparación de diferentes tipos de información en un mismo contexto geográfico.

Visualización. ArcMap proporciona herramientas para representar las imágenes de manera efectiva, permitiendo ajustar la simbología, aplicar transparencia para superponer capas y generar visualizaciones tridimensionales. Esto es fundamental para comunicar los resultados del análisis de imágenes de forma clara y comprensible.

2.6.2 Tipos de problemas en cultivos

Actualmente existen diferentes causas que provocan ineficiencia en los cultivos agrícolas. Algunos de los más comunes son la infestación de malezas, cultivos dañados, control de humedad del suelo, identificación de zonas con crecimiento heterogéneo, vigilancia contra intrusos, y alta densidad de siembra. En este trabajo solo abordaremos cuatro problemáticas para lograr su identificación por medio de la digitalización de imágenes y el uso de software.

2.6.2.1 Infestación de malezas

En los cultivos siempre debe de haber un buen cuidado de la planta, ya que tiene que crecer libre y sin nada que la obstruya. Si el cultivo llegara a tener maleza invasiva da paso a que la planta no crezca correctamente ya que la maleza crece muy rápido y en grandes cantidades, invadiendo el área de la planta y esto provoca que muera por motivos de espacio o que se adhiera a ella y le robe sus nutrientes. Por eso, tomar cuidados sobre este aspecto es muy indispensable.

2.6.2.2 Control de humedad del suelo

El control de la humedad del suelo en los cultivos es una necesidad indispensable en las plantas, ya que si no hay suficiente agua en el cultivo puede secarse y morir. Por otro lado,

si hay agua en exceso y la planta es muy pequeña puede ahogarse y morir. Por lo tanto, el control de la humedad del suelo es una cuestión muy importante para tener una buena cosecha.

2.6.2.3 Identificación de zonas con crecimiento heterogéneo

El crecimiento heterogéneo se identifica fácilmente por medio de imágenes aéreas capturadas por un dron, donde se puede visualizar y supervisar durante los meses de crecimiento, cuál ha sido la evolución y la distribución de vegetación en masa, dispersa o normalizada. Ya que, al tener crecimiento heterogéneo en varias partes del cultivo, se ve afectada directamente la planta debido a que en ciertos cultivos es necesario tener una distancia de plantación para que esta se desarrolle adecuadamente y se pueda obtener una cosecha productiva.

2.6.2.4 Control de la cantidad de fertilizante que se utiliza

Gracias al procesamiento de imágenes con la identificación de índices de vegetación por medio de software se puede solucionar este tipo de problema ya que en este índice se ve reflejado las condiciones del cultivo en cuanto a maduración en el caso de los cereales y se llega a poder controlar el uso de fertilizante nada más aplicándolo en las zonas que realmente se necesita.

2.7 Análisis con el dron

Hay diferentes maneras de analizar cualquier tipo de cultivo, con el uso de cámaras multispectrales, con cámaras RGB y por medio de softwares que pueden realizar el procesamiento de la imagen.

Con las cámaras multispectrales se realizan análisis de los cultivos con más precisión ya que son capaces de captar la red Edge que va de los 0,68 a 0,75 micras y el infrarrojo cercano 0,75 a 1,7 micras que son las bandas que más se utilizan para el análisis de precisión en el sector de la agricultura. Estas cámaras son capaces de captar diferentes espectros de luz, las cuales pueden llegar a captar hasta 6 bandas espectrales.



Figura 30 - Cámara multispectral Parrot Sequoia (Aerial Insights, 2017)

Una vez obtenidas estas bandas, mediante las imágenes multispectrales, podremos calcular con una operación matemática las características de la planta, como por ejemplo la cantidad de clorofila activa, hidratación de la planta, estrés, cantidad de hoja que tiene, etc. Esto se consigue mediante la combinación de varias bandas del espectro tanto visible como invisible con los datos que la cámara nos ha proporcionado, obteniendo un solo valor con precisión. Aunque el índice más conocido es el NDVI, se pueden calcular otros métodos que sean de interés, como el índice GNVDI, RVI, VARI entre otros.

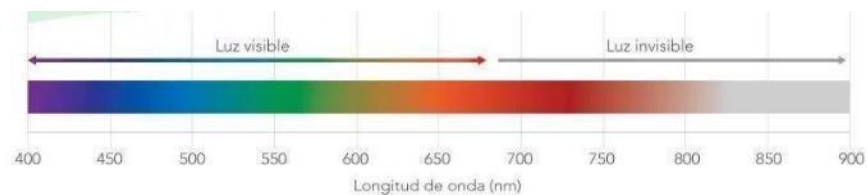


Figura 31 - Longitud de onda (Aerial Insights, 2017)

El NDVI es muy utilizado en el seguimiento de la vegetación global porque ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie, la orientación y otros factores extraños (Gonzalez, 2016).

Se entiende por NDVI como Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. El cuál mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. “La vegetación sana tiene una curva de reflectancia espectral muy característica de la que podemos sacar partido calculando la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano. El NDVI es esa diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1.” (EOS Data

Analytics, s.f.). Al calcular regularmente durante distintos periodos de tiempo se pueden revelar muchos datos sobre los cambios en las condiciones de las plantas, esto quiere decir que podemos utilizar este método para estimar la salud de las plantas a distancia. Si se detecta un decremento repentino de los valores del NDVI puede ser síntoma de deterioro de la salud del cultivo, así como también dependiendo de las fechas pudiera representar los momentos de cosecha por lo que además de este método se deben contrastar los datos con otro método disponible para una correcta interpretación de valores. (EOS Data Analytics, s.f.)

La fórmula utilizada para calcular el índice NDVI es la siguiente.

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

Donde, NIR es la luz reflectada en el espectro del infrarrojo cercano y RED es la luz reflejada en el rango rojo del espectro.

Como se comentó anteriormente este índice está definido por valores que van de -1.0 a 1.0, donde los valores negativos están formados por nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto. (EOS Data Analytics, s.f.)

Los valores positivos que van de 0 a 0.1 representan áreas sin rocas arena o nieve. Consecuentemente los valores moderados que van de 0.2 a 0.3 representan arbustos y praderas, mientras que los valores restantes grandes que van de los 0.6 a 0.8 indican bosques templados y tropicales. Con el uso de esta escala se puede mostrar a los agricultores que parte de sus campos tienen vegetación densa, moderada o escasa en momentos puntuales. (EOS Data Analytics, s.f.)



Figura 32 - Ejemplo gráfico resultante NDVI (EOS Data Analytics, s.f.)

El índice de VARI o también llamado Índice de Resistencia Atmosférica Visible, nos sirve para detectar con mayor facilidad la vegetación usando solamente el espectro de la luz visible, es decir, necesitaremos que la imagen que vayamos a analizar tenga las bandas rojo, verde y azul, esto es muy importante porque si nosotros tenemos una imagen capturada con un dron, generalmente se toma en este espectro de luz. El trabajo del índice de VARI es realzar la vegetación bajo un fuerte impacto atmosférico al tiempo que suaviza las variaciones de iluminación. Debido a la baja sensibilidad al impacto atmosférico el error del índice de VARI es inferior al 10%. (EOS Data Analytics, s.f.)

Con una cámara simple de RGB solamente se puede captar e interpretar los colores tal y como el ojo del ser humano lo ve. De manera que solamente podremos detectar problemas que ya se vean a simple vista desde una vista aérea como daños en los cultivos, localizar zonas de encharcamiento y con poca vegetación.



Figura 33 - Diferencia entre sensores RGB y NDVI (elaboración propia)

2.7.1 Método de fotointerpretación de imagen satelital Landsat 8

Este satélite fue lanzado el 11 de febrero de 2013 por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes capturadas por este satélite han sido un gran recurso para la investigación en diferentes áreas de estudio como la cartografía, geología, silvicultura, arquitectura, planificación regional, la educación, entre muchas otras.

Las imágenes Landsat 8 constan de once bandas espectrales las cuales son: Banda 1 (aerosol costero), Banda 2 (Azul), Banda 3 (verde), Banda 4 (rojo), Banda 5 (infrarrojo cercano), Banda 6 (SWIR 1), Banda 7 (SWIR 2), Banda 8 (pancromático), Banda 9 (cirrus), Banda 10 (infrarrojos térmicos TIRS 1) y Banda 11 (infrarrojos térmicos TIRS 2); Las bandas de la 1 a la 7 y 9, tienen una resolución espacial de 30 metros, la banda 8 una resolución de 15 metros y las bandas 10 y 11 una resolución de 100 metros.

2.7.2 Combinaciones de bandas en imágenes de satélite

Las bandas se pudieran definir como rangos de frecuencia, se puede entender estos rangos de frecuencia como colores, los cuales algunos nos son visibles para el ojo humano.

Con las diferentes bandas multiespectrales que tienen los satélites en la actualidad se es capaz de identificar diferentes indicadores como, usos de suelo, cubiertas vegetales, masas de agua y la detección de fenómenos naturales.

La información registrada por los satélites de teledetección, se recopilan en bandas de espectro electromagnético, las cuales crean una imagen monocromática que se puede ver con una paleta de 256 tonos a escala de grises, por lo que cada pixel de la imagen tiene un valor entre el 0 negro y el 256 blanco.

Existen diferentes combinaciones de bandas para lograr diferentes estudios en los cultivos, de igual manera para áreas en general. Las combinaciones más destacadas en base a estudios ya realizados para el procesamiento de imágenes satelitales del Landsat 8, se muestran en la siguiente tabla donde se observan los diferentes usos que se le da a cada combinación de banda.

Tabla 2 - Combinación de bandas (Alonso, 2019)

Color natural	4 3 2
Falso color (urbano)	7 6 4
Color Infrarrojos (vegetación)	5 4 3
Agricultura	6 5 2
Penetración atmosférica	7 6 5
Vegetación saludable	5 6 2
Tierra / Agua	5 6 4
Natural con eliminación atmosférica	7 5 3
Infrarrojos de onda corta	7 5 4
Análisis de vegetación	6 5 4

2.8 Índices de procesamiento de imagen

Para el procesamiento de imágenes satelitales se es requerido el uso de un software para poder realizar los procedimientos necesarios que darán como resultado diferentes índices. Hay varios índices que pueden analizar diferentes puntos de interés, como el análisis de la vegetación, el suelo, el agua, la nieve, el fuego, entre muchos otros.

A continuación, se muestran los índices más comúnmente utilizados en los análisis que se han hecho.

2.8.1 Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI)

Este índice es básicamente una medida del estado de salud de la vegetación basado en la forma en que las plantas reflejan su luz en ciertas frecuencias y se caracteriza por estar altamente relacionado con el contenido de vegetación gracias a que tiene una alta reflectividad en el infrarrojo y la baja en el visible.

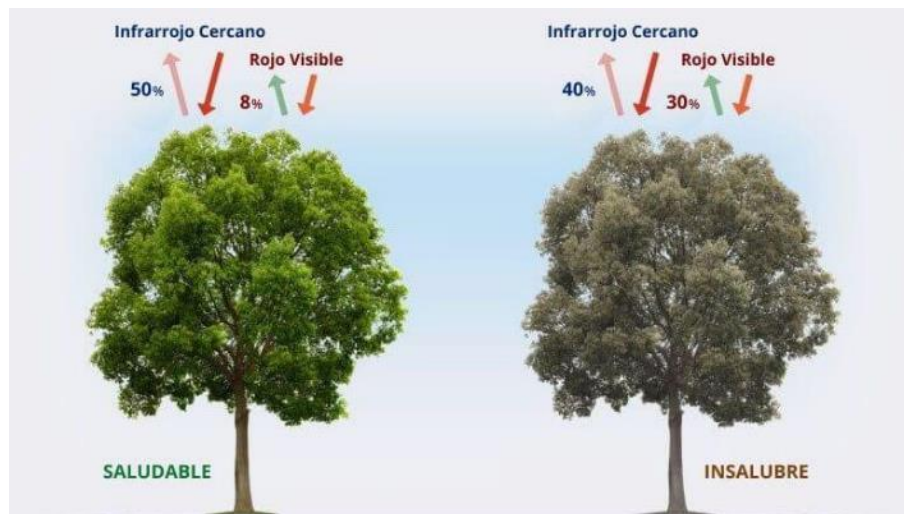


Figura 34 - Estado de salud vegetal con NDVI (EOS Data Analytics, s.f.)

Se utiliza comúnmente para predecir la producción en el área de la agricultura, facilitando la vigilancia de sequías, predecir áreas de incendios y detectar áreas que estén en proceso de desertización. La fórmula con la cual se calcula este índice es $NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$, donde NIR son los valores de píxel de la banda infrarroja cercana y RED son los valores de píxel de la banda roja.

2.8.2 Índice de vegetación de la diferencia normalizada verde (GNDVI)

El Índice GNDVI (Vegetación de Diferencia Normalizada Verde) es un índice del “verdor” de la planta o actividad fotosintética. Es uno de los índices de vegetación más utilizados para determinar la captación de agua y nitrógeno en el dosel del cultivo. Este se modifica un poco en relación con el NDVI, lo cual permite tener una mejor detección en cuanto al

contenido de clorofila en los cultivos ya que en lugar de medir el espectro rojo, mide el espectro verde en un rango de 0.54 a 0.57 micrones.

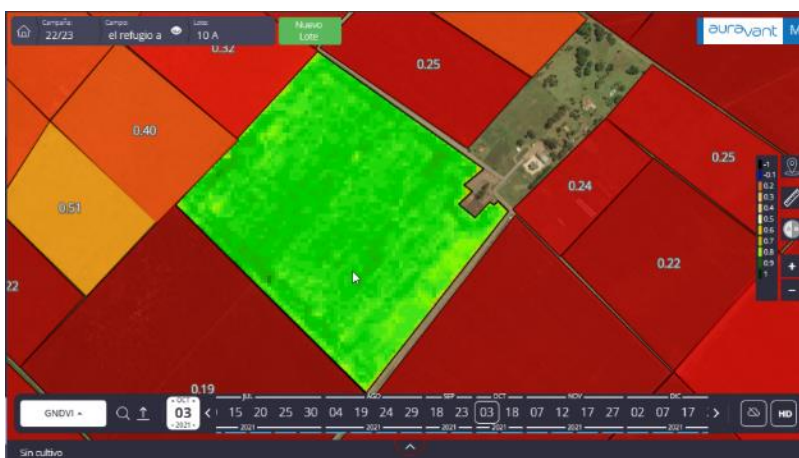


Figura 35 - Índice de vegetación con banda verde y espectro electromagnético (Michlig, 2019)

El GNDVI es el índice de vegetación verde que utiliza la banda infrarrojo cercano (NIR) y la banda verde (GREEN) del espectro electromagnético.

Este índice es usado principalmente para conocer la humedad o contenido de agua y de nitrógeno en las hojas de las plantas. La fórmula utilizada para el cálculo es $GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$, donde NIR son los valores de píxel de la banda infrarroja cercana y GREEN son los valores de píxel de la banda verde o también llamado espectro electromagnético.

2.8.3 Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)

El Índice Diferencial de Agua Normalizado se utiliza para detectar masas de agua y nos provee de datos en cuanto la hidratación de la vegetación, logrando conocer así áreas que tienen problemas de estrés hídrico. La fórmula para calcular este índice es $NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$, donde GREEN son los valores de píxel de la banda verde y NIR son los valores de píxel de la banda infrarroja cercana.

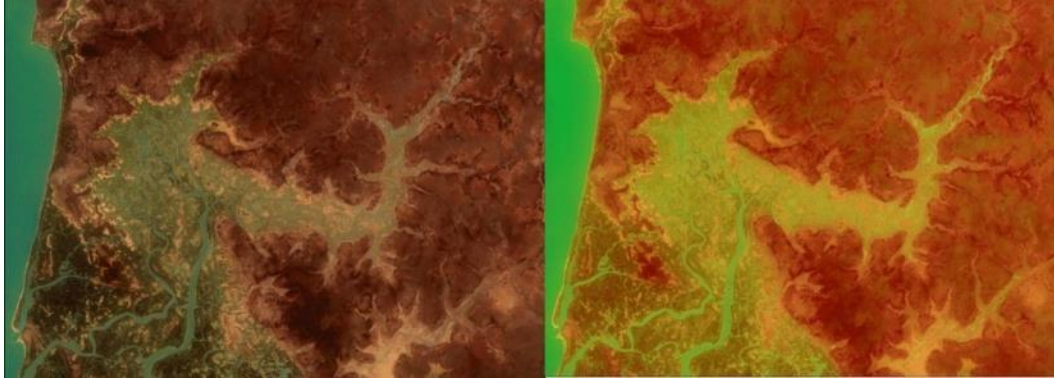


Figura 36 - Índice diferencial de agua normalizado (GIS, 2017)

2.8.4 Índice de diferencia normalizada de humedad (NDMI)

El Índice de diferencia normalizada de humedad se utiliza para determinar cuál es el nivel de humedad que tiene la vegetación, aplicado a análisis de cultivos y monitorización de áreas con posibles problemas de sequía. La fórmula para calcular este índice es, $NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$, donde NIR son los valores de píxel de la banda infrarroja cercana y SWIR son los valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta.

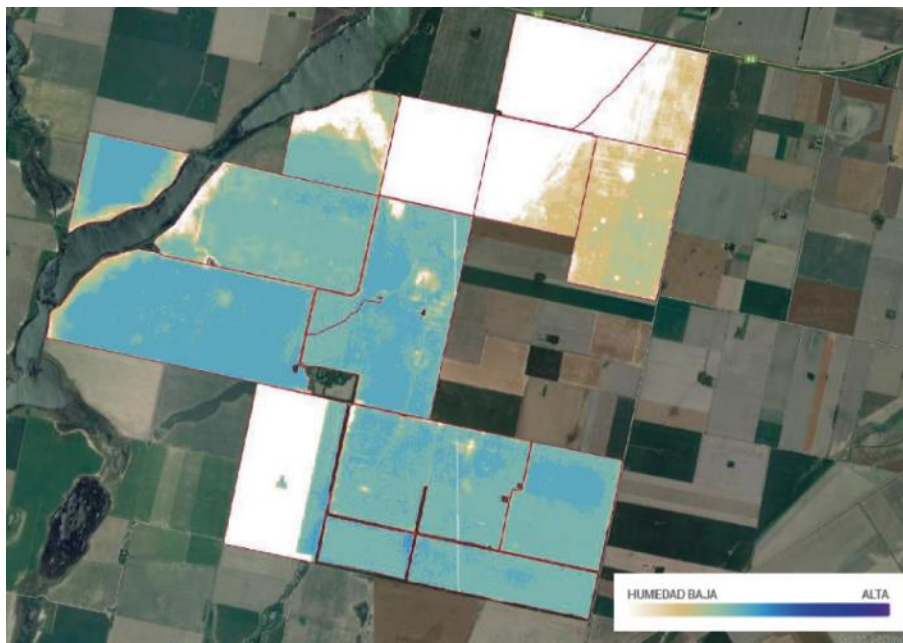


Figura 37 - Índice de diferencia normalizada de humedad (USGS, s.f.)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se presentarán diferentes puntos en los que se describen, el tipo de investigación a la que pertenece este trabajo, así como también se hará el diseño de la investigación planteada tomando en cuenta el sujeto u objeto de estudio, hipótesis y variables. Posteriormente se visualizarán los materiales e instrumentos, seguido del procedimiento que fue utilizado para así finalizar con un cronograma.

3.1 Tipo de investigación

La investigación desarrollada en esta tesis es tipo descriptiva pues se describen las características de los métodos de color natural, infrarrojo, agricultura, vegetación saludable, análisis de vegetación, índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación de la diferencia normalizada verde (GNDVI), índice diferencial de agua normalizado (NDWI), índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI) para el análisis de cultivos mediante el procesamiento de imágenes. La investigación tiene un enfoque que se puede considerar cuantitativo ya que el análisis proporcionará datos que deben ser evaluados.

3.2 Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación es del tipo no experimental, debido a que se aplicarán métodos para el análisis de cultivos sin manipular las posibles variables puesto a que solamente se observarán para su análisis.

3.3 Objeto de estudio

El contexto al cual rige la investigación es la configuración de Dron Iris y el análisis de cultivos con procesamiento de imágenes para monitorear cultivos, obtener índices de vegetación y agua.

3.4 Hipótesis y variables

Este trabajo no requiere hipótesis, ya que se trata de la aplicación de métodos para el análisis de cultivos.

VARIABLES

3.4.1 Descripción conceptual

A. Método de descomposición de bandas de imagen RGB

Este método se basa en la combinación de colores naturales primarios que son rojo, verde y azul (RGB), ya que estos colores corresponden a la manera en que vemos el mundo, y por eso es que a estos se les llaman colores de gama visible. Esta combinación de canales permite analizar el estado de los cuerpos de agua y vegetación.

B. Método de fotointerpretación de imagen satelital

Es el proceso por el que se extrae la información contenida en la fotografía aérea, para posteriormente procesar los datos. En este caso se requiere la información puntual de las bandas RGB, infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1) e infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2).

3.5 Materiales e instrumentos

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se utilizaron los siguientes materiales: dron Iris, cámara de video, computadora, información documental como libros y artículos. Así como los instrumentos como el software ArcMap y el uso del sitio web USGS.

3.6 Procedimiento

El procedimiento que será usado para la configuración del Dron Iris y análisis de cultivos con procesamiento de imágenes es:

- a) Puesta en marcha de dron iris
 1. Pruebas de calibración
 2. Pruebas de operación de componentes.
- b) Análisis de cultivos con procesamiento de imágenes
 1. Obtención de imagen RGB e imagen satelital
 2. Procesamiento de imagen en software ArcMap
 3. Aplicación del método de descomposición de bandas de imagen RGB

3.7 Pruebas de calibración

3.7.1 Misión Planner Software

Este es el software principal con el que será capaz de obtener información acerca del dron, con el cual también será posible programar diferentes tareas e instrucciones específicas, así como también la manipulación de la tarjeta controladora, lo que es una gran ventaja, ya que al poder modificar valores de la controladora se podrá manipular variables físicas del dron, tales como alas fijas, cuatrimotores, hexaroteros, octocópteros y diferentes formas de estructura.



Figura 38-Software Mission Planner (elaboración propia)

3.7.2 Conexión de dron con Mission Planner Software

En este apartado solamente se enseñará cómo realizar una conexión básica entre el software y el dron, así como también una calibración adecuada.

Una vez instalado el software mission Planner lo abrirá y deberá conectar la tarjeta de vuelo o también llamada (APM) mediante un cable Micro USB.

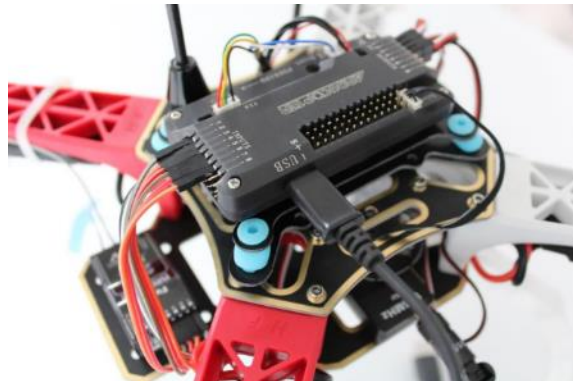


Figura 39-Conexión de cable micro USB a controladora de vuelo APM (elaboración propia)

En el menú principal situándose en la esquina superior derecha encontrará tres recuadros. En el primer cuadro de izquierda a derecha seleccionará el puerto correspondiente al que hemos conectado el dron.

El segundo cuadro es para determinar el baudaje o Baud Rate en inglés, el cual situaremos en 115200. Aún no deberá presionar el botón conectar ya que continuará configurando algunos parámetros más.

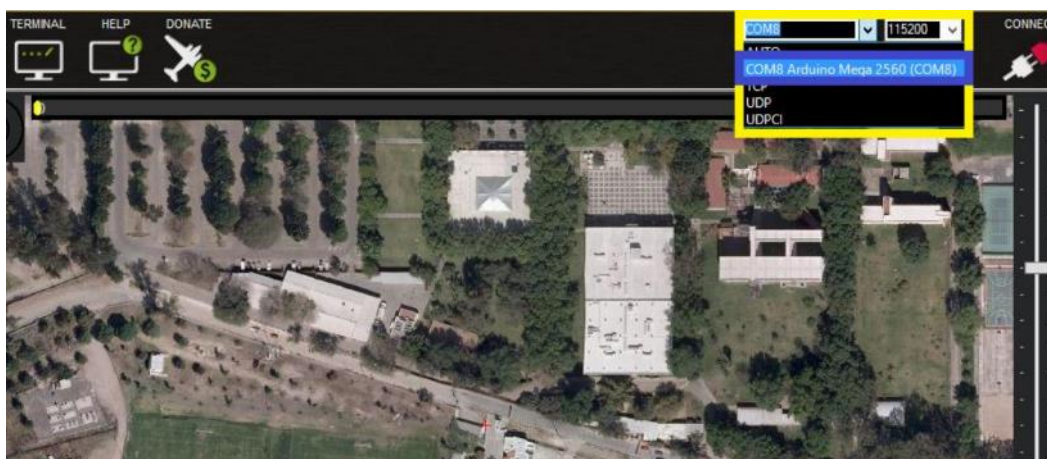


Figura 40–Puerto COM8 Arduino Mega (elaboración propia)

3.7.3 Instalación del Firmware

En el menú llamado “Initial Setup” seleccionará la opción llamada “Install Firmware”, después seleccionará la opción del dron con 4 rotores, se nos pedirá que confirme su decisión. Al confirmar aparecerá una barra donde se puede ver el estatus de la instalación del firmware. Una vez terminado de cargar el firmware aparecerá un mensaje que dice “done” ubicado del lado izquierdo debajo de la barra que previamente había sido mostrado para ver el progreso.

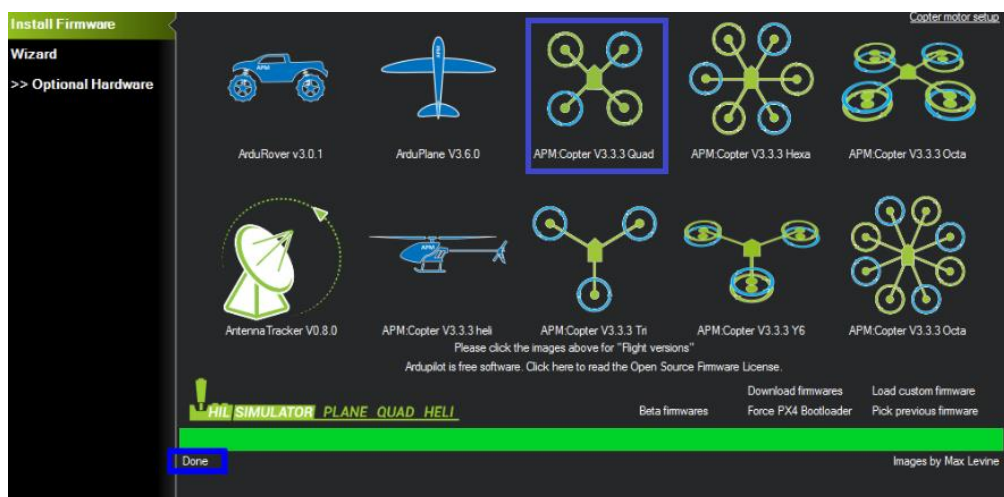


Figura 41-Instalación de firmware (elaboración propia)

Una vez hecho esto regresará al menú “flight data” y presionará el botón “connect” situado del lado superior derecho.



Figura 42-Botón para conexión por puerto COM (elaboración propia)

Es importante que una vez realizada la instalación del firmware por seguridad se deben retirar las hélices del dron así como también desconectar batería del mismo para poder realizar las configuraciones siguientes.

3.7.4 Configuración de parámetros

Diríjase al menú llamado “Config/Tuning” y seleccionará el submenú llamado “Planner” y posteriormente se desplegarán distintas opciones, de la cual seleccionará “advanced” en la sección “layout” el cual habilitará opciones más detalladas.

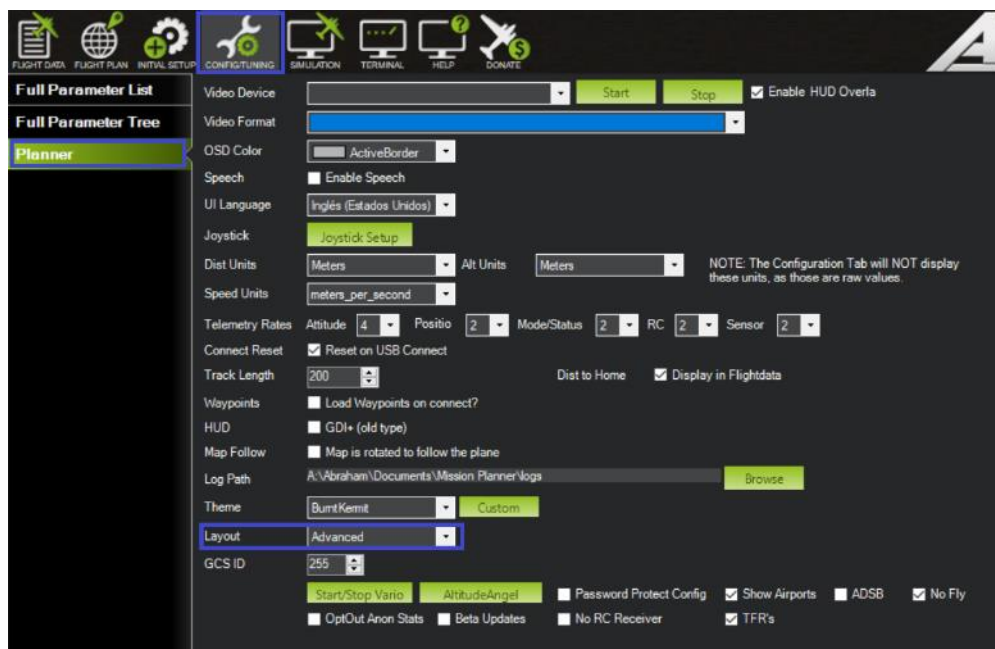


Figura 43-Configuración de vuelo (elaboración propia)

Una vez habilitadas las opciones avanzadas seleccionará el submenú “Full parameter list”. Habiendo llegado hasta este punto dejaremos de lado el software por unos momentos para descargar un archivo el cual nos proporcionará los parámetros necesarios para el dron, la página para descargarlo es <http://www.cardinal.com/education>.

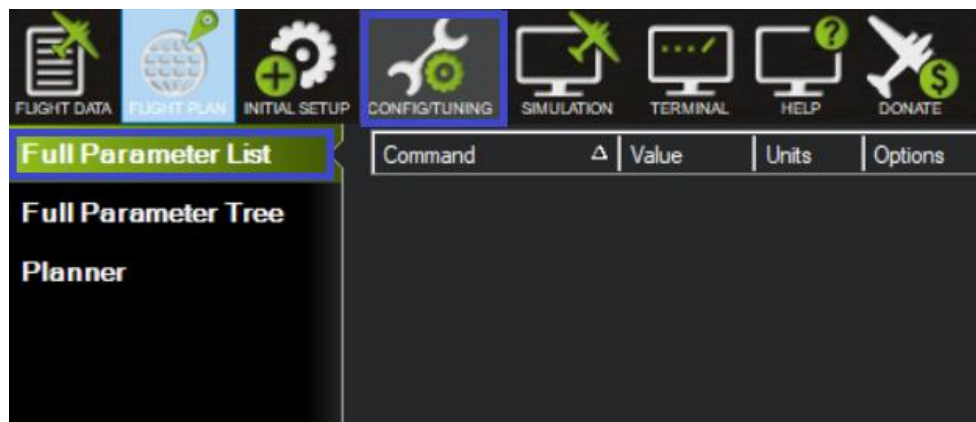


Figura 44-Ubicación de lista de parámetros (elaboración propia)

Una vez el archivo descargado regresará al software justo donde estaba y del lado derecho hará click en el botón llamado “Load from file” para poder cargar el archivo previamente descargado. Una vez hecho esto hará click en el botón “Write params” para terminar la configuración de parámetros.



Figura 45-Carga de archivo con parámetros a dron (elaboración propia)

3.7.5 Calibración del tipo de armazón

Una vez conectado el dron iremos al menú “Initial setup” y accederemos al submenú “Mandatory hardware”, después seleccionaremos “Frame type”. Finalmente de la lista de opciones desplegadas seleccionará “X’, ‘Y6A””.

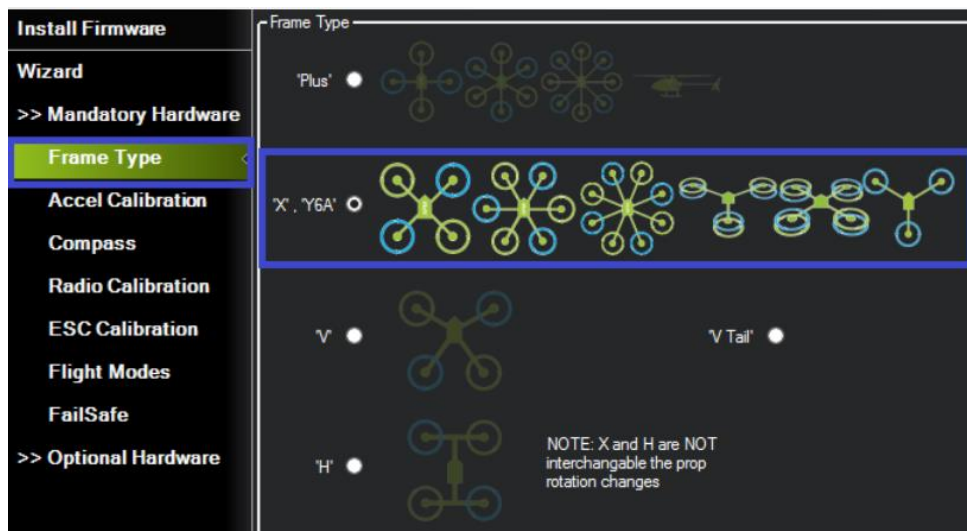


Figura 46-Selección de tipo de armazón (elaboración propia)

3.7.6 Calibración del acelerómetro

Sin salir del menú “Initial setup” accederá al submenú “Accel calibration”. Posiciona el dron en una superficie plana elevada, como una mesa y presiona en el botón “Calibrate accel” de las opciones desplegadas.

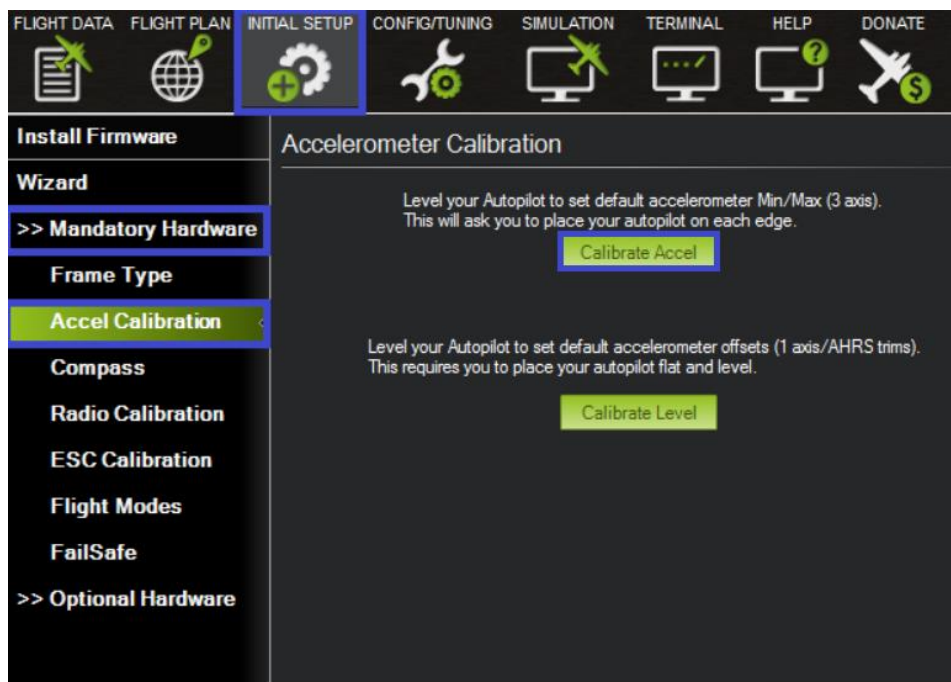


Figura 47-Calibración de acelerómetro (elaboración propia)

A continuación, sujete el dron como se muestra en las imágenes. Tendrá que girar el dron en 3 veces para configurar los parámetros del acelerómetro. Es importante mantenerlo quieto cuando se presiona la tecla para continuar a la siguiente posición.



Figura 48-Ejes de calibración (elaboración propia)

Cuando complete el proceso de calibración aparecerá un mensaje que dice “Calibration Successful”. Deberá ignorar el botón “Calibrate level” porque si lo presiona borrará la configuración que ha realizado anteriormente. Así concluye la calibración del acelerómetro.

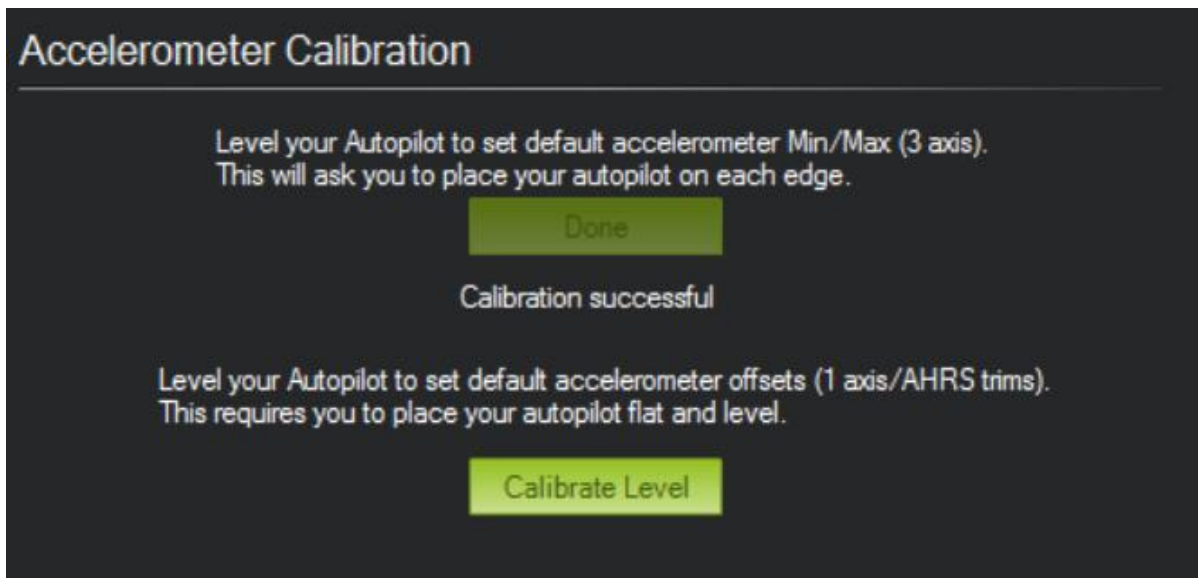


Figura 49-Calibración de dron completada (elaboración propia)

3.7.7 Calibración del GPS

Pará calibrar el GPS accederá a “Initial setup” y posteriormente seleccionar el submenú “Compass”. Seleccione la opción “APM with External Compass” y después el botón “Live Calibration” ubicado en el lado inferior izquierdo dentro de la misma sección.



Figura 50-Inicio de calibración GPS (elaboración propia)

Una vez que la pantalla de calibración aparezca verá que al girar el vehículo comenzará a crear una ruta visible en la pantalla de la izquierda.

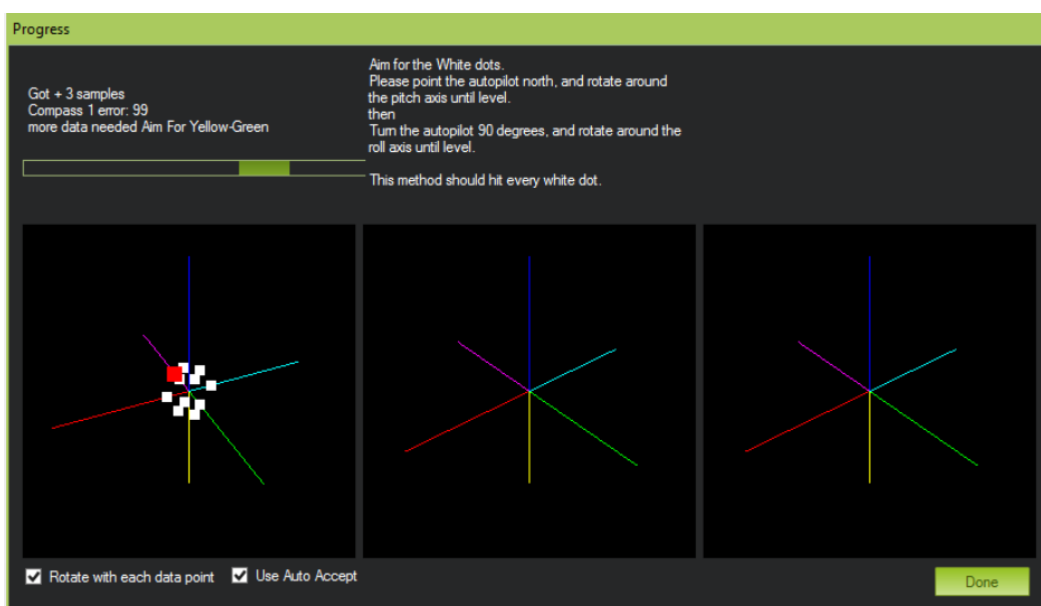


Figura 51-Calibración GPS por puntos 3D (elaboración propia)

A continuación, deberá tratar de hacer contacto del punto rojo con los puntos blancos, moviendo el dron en todas direcciones como sea posible. Una vez que todos los puntos blancos hayan tenido contacto con el punto rojo presiona la tecla “Done” y una ventana aparecerá confirmando que el GPS ha sido calibrado exitosamente. Presiona “ok”.



Figura 52-Registro de puntos en entorno 3D

3.7.8 Calibración de radiofrecuencia

Antes de encender el radiocontrol asegúrese de que todas las palancas superiores se encuentran hacia arriba y los mandos izquierdo y derecho en la posición que se muestra en la imagen para poder configurarlo.



Figura 53-Posición de botones del mando de radio control (elaboración propia)

Encienda el radiocontrol y mantenga presionado el botón “OK” por varios segundos, esto lo llevará al menú principal. El radiocontrol tiene cuatro botones físicos, “UP”, “DOWN”, “OK” Y “CANCEL”. Con ayuda de los botones físicos seleccione “Setup” el cual se encuentra en la pantalla del menú principal. Puede regresar a cualquier pantalla presionando la tecla “Cancel” en cualquier momento.



Figura 54-Selección de setup (elaboración propia)

Una vez de haber ingresado al menú “Setup” seleccionaremos la opción “Reverse” y nos situaremos sobre el canal 2 y presionaremos el botón “Up” o “Down” para ponerlo en sentido contrario. Presiona el botón “Cancel” por algunos segundos para guardar la modificación previa y regresar al menú “Setup”.

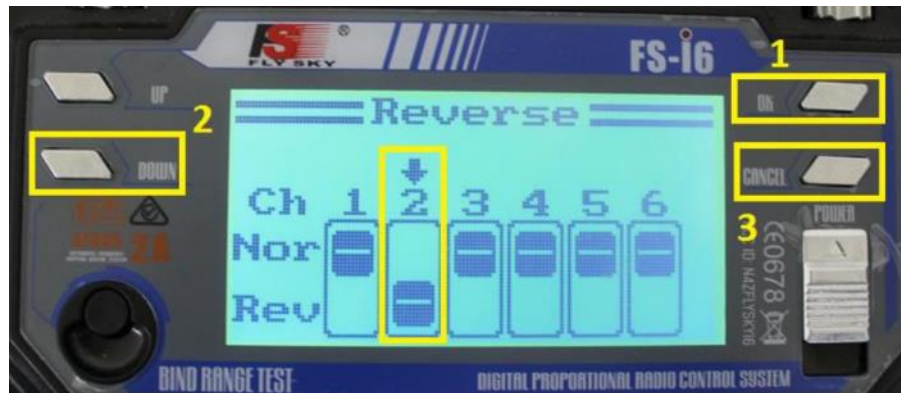


Figura 55-Selección de canales (elaboración propia)

Ahora seleccione “Aux. channels” el cual se encuentra dentro del menú “Setup”. Use los botones “Up” y “Down” para establecer el canal 5 como “ Source SwC”. Presione “Ok” y ahora establezca el canal 6 como “Source SwB”.

Mantenga el botón “Cancel” presionado durante algunos segundos para guardar los ajustes previos.

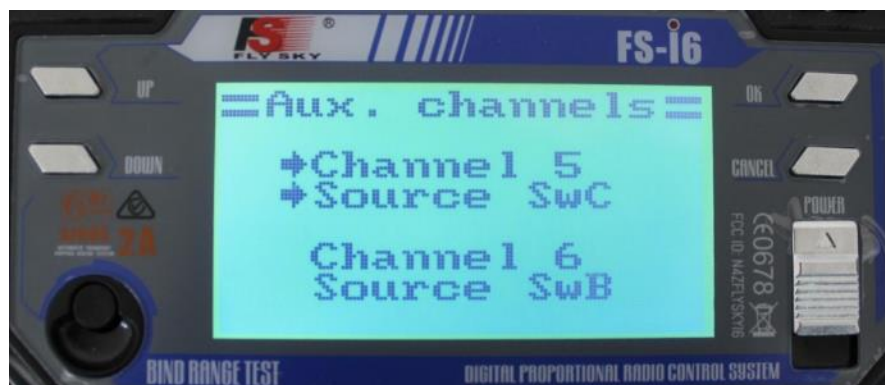


Figura 56-Selección de canales auxiliares (elaboración propia)

Finalmente presiona de nuevo el botón “Cancel” para regresar al menú principal. La controladora ahora está configurada.

Enciende el radiocontrol. Un led verde debe de encender en la controladora que está situada en el dron, lo cual significa que el radiocontrol y la controladora han sido emparejados correctamente.



Figura 57-Confirmación de emparejamiento exitoso mediante led en controladora (elaboración propia)

En caso de que con los pasos anteriores no se hayan emparejado correctamente el radiocontrol y la tarjeta receptora deberá seguir los pasos siguientes.

Desconecte la tarjeta receptora. Los puertos que vamos a necesitar son el CH1 y B/VCC. El puerto B/VCC será utilizado como canal de vínculo y CH1 será utilizado para energizar la tarjeta receptora respetando la función y el orden de cada uno de los pines como se muestra en la imagen siguiente.

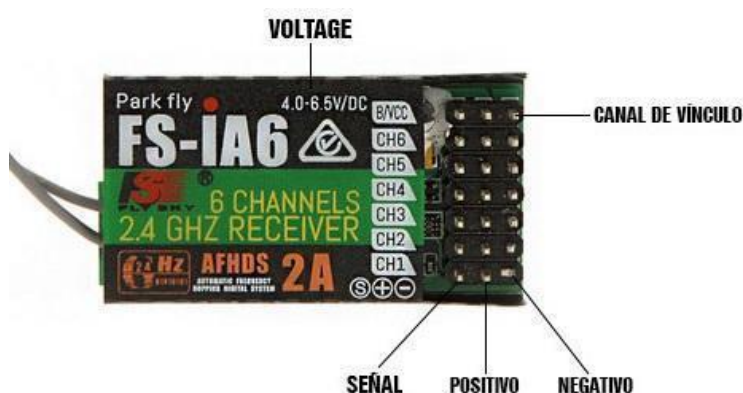


Figura 58-Pines de receptor de radio frecuencia (elaboración propia)

Una vez identificados los puertos ahora conecte el jumper negro en el puerto B/VCC y después la batería en el puerto CH1, lo cual hará que un led rojo comience a parpadear. Ya que ha conectado los jumpers en sus puertos correspondientes, ahora encienda el radiocontrol al mismo tiempo que presiona el botón “Bind range test” ubicado del lado inferior izquierdo del radiocontrol.



Figura 59-Conexión de jumpers (elaboración propia)

Cuando vea que en la pantalla del radiocontrol que ha encontrado la señal de la tarjeta receptora y se ha emparejado desconecte la batería y posteriormente el canal B/VCC. Ahora conecte de nuevo la batería. Una vez realizado esto, el led rojo dejará de parpadear, es decir, solamente quedará iluminado, lo cual significa que han sido emparejados correctamente.



Figura 60-Confirmación de emparejamiento exitoso (elaboración propia)

Ahora diríjase al menú “Initial Setup”, abra el submenú “Mandatory hardware” y seleccione “Radio calibration”.

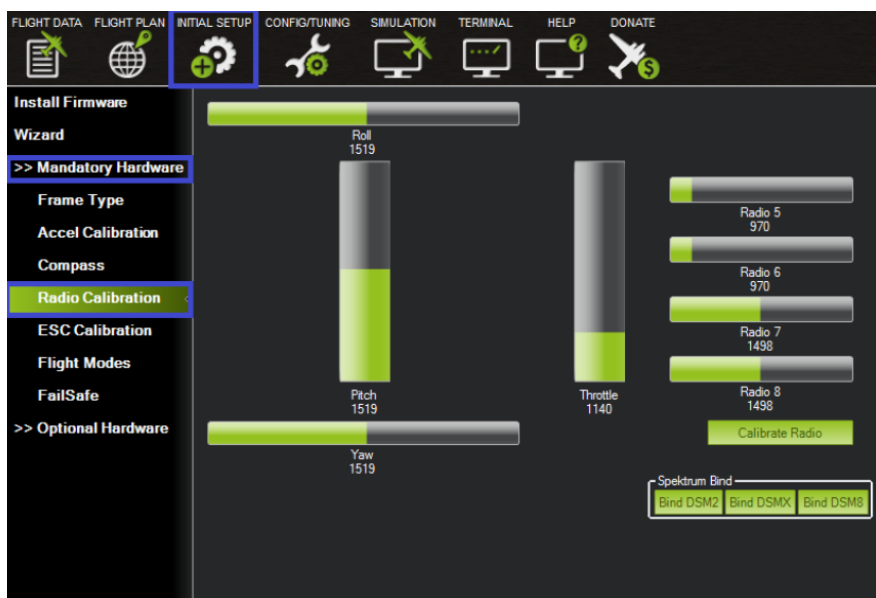


Figura 61-Selección de calibración de radio (elaboración propia)

Presione el botón “Calibrate radio” y una ventana aparecerá para confirmar que el radio está encendido, la batería desconectada y las hélices removidas. Otra ventana explicará el

proceso de calibración de radio, simplemente seleccione “Ok”. Unas barras rojas aparecerán en cada uno de los canales de transmisión indicando la posición más extrema de cada uno. Mueva las palancas y switches del radiocontrol para establecer sus posiciones mínimas y máximas. Cuando termine presione el botón que dice “Click when Done”.

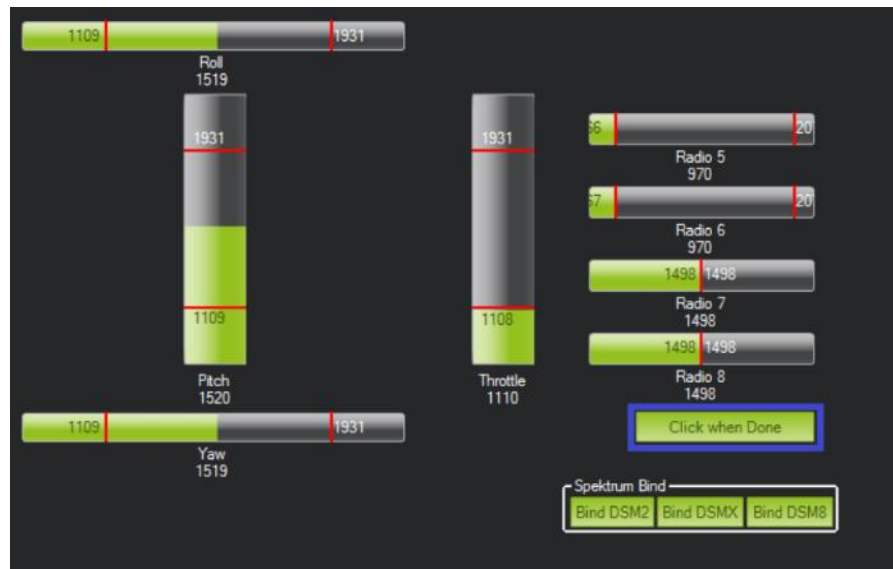


Figura 62-Posiciones máximas y mínimas de switches y palancas (elaboración propia)

Una ventana le pedirá que centre las palancas de su radiocontrol, la palanca izquierda del control deberá dejarla totalmente hacia abajo. Una vez que realice estas indicaciones presione “Ok”. Finalmente aparecerá una ventana más que le muestra los valores de calibración, lo cual significa que la radio ha sido correctamente calibrada. A continuación presione “Ok”.

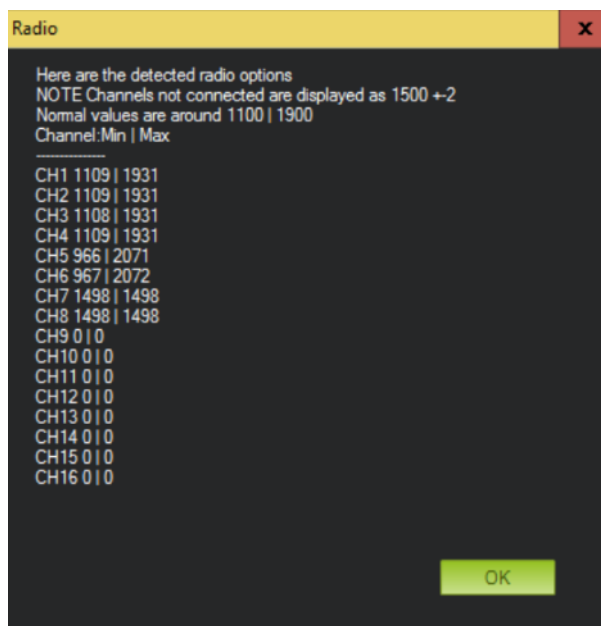


Figura 63-Ventana de calibración completada exitosamente (elaboración propia)

3.7.9 Calibración ESC's

Para calibrar los 4 ESC's al mismo tiempo haga lo siguiente. Desconecte la batería. encienda el radiocontrol. Mueva la palanca izquierda hacia arriba hasta que llegue a su máxima posición. Reconecte la batería. Notará que los ESC's emiten un pitido, simplemente espere. Después de algunos segundos sonará un pitido largo adicional lo que significa que los ESC's capturaron el momento más alto de energía. Ahora mueva la palanca izquierda del radiocontrol hacia abajo y espere a que se emita un pitido largo, este significa que los ESC's han capturado el punto más bajo de energía para funcionar. La calibración ha sido completada.

En caso de que con esta configuración no logre calibrar los ESC's, siga los pasos siguientes.

Encienda el radiocontrol (la palanca izquierda siempre tiene que estar hacia abajo y los switches hacia arriba al encender el control) y después de encenderlo levante la palanca izquierda hacia arriba en su totalidad. Después conecte la batería del drone, espere a que haga un pitido. Desconecte y conecte la batería de nuevo, espere a que haga dos pitidos y a continuación baje en su totalidad la palanca izquierda. Desconecte y conecte de nuevo la batería y espere a que emita dos pitidos. Ahora mueva la palanca izquierda hacia la derecha durante cinco segundos. Suelte la palanca y comience a subirla lentamente. Los

ESC's han sido calibrados correctamente. Cada vez que encienda el radiocontrol deberá mover la palanca izquierda hacia la derecha durante cinco segundos para activar de nuevo los motores, esto es una medida de seguridad por default. Pasados 15 segundos de no haber movimiento en los rotores la medida de seguridad volverá a activarse.

3.7.10 Configuración a prueba de fallos

Este mecanismo consiste en que al perder la conexión del radiocontrol con el dron, este regresa automáticamente y aterriza.

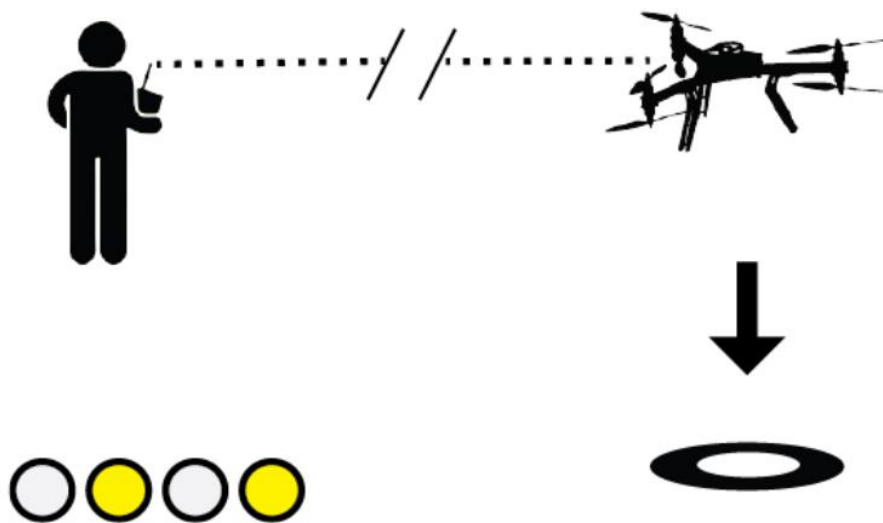


Figura 64-Funcionamiento prueba de fallos (elaboración propia)

Sitúese sobre el menú “Initial setup” y abra las opciones del submenú “Mandatory hardware” y seleccione “Failsafe” de las opciones desplegadas. En la sección “Radio” ubicado del lado central derecho seleccione la opción “Enabled always RTL” y dejará el “FS Pwm” con un valor de 975.

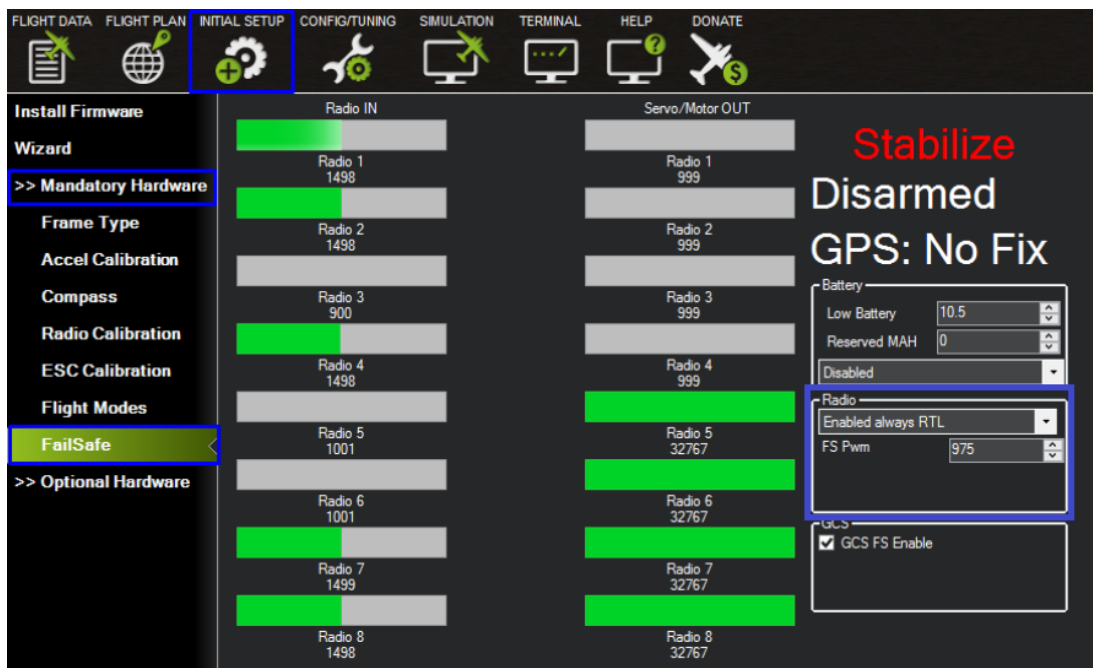


Figura 65-Activación de modo a prueba de fallos (elaboración propia)

3.7.11 Configuración del modo de vuelo

Sitúese en el menú “Initial setup” y acceda al submenú “Flight modes”. Cambie los modos de vuelo 1 a “Stabilize”, 4 a “AltHold” y 6 a “Loiter”. Presione “Save modes” para terminar.

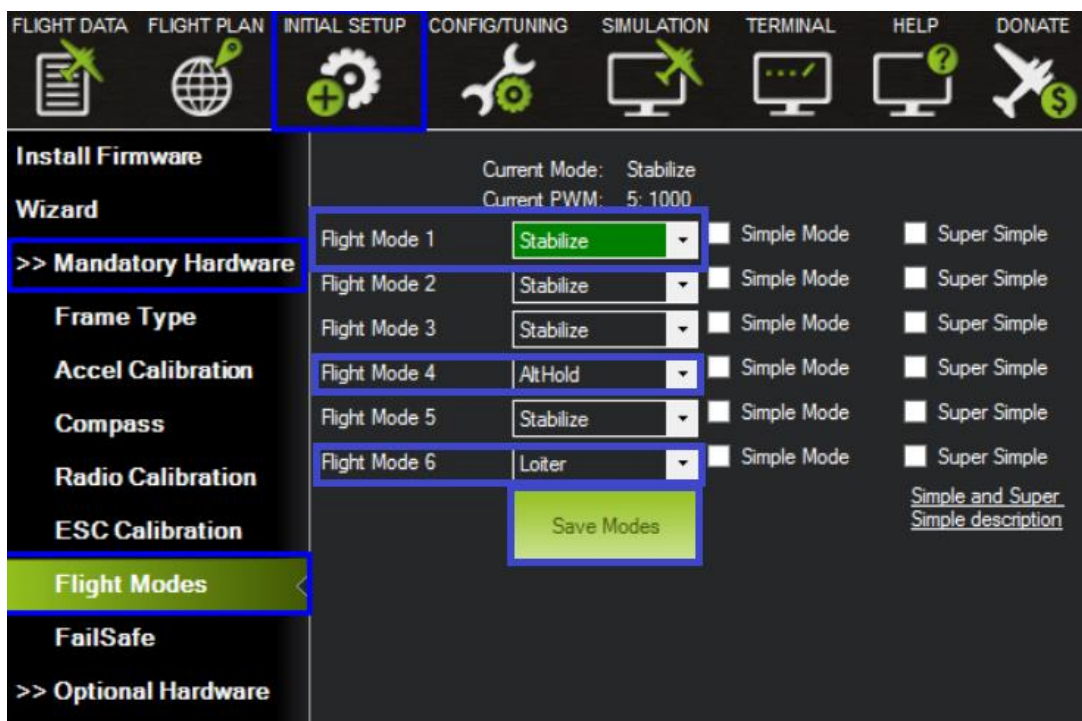


Figura 66-Configuración de modos de vuelo en interfaz (elaboración propia)

3.7.12 Configuración del monitor de batería

Diríjase a “Initial setup” y seleccione el submenú “Optional hardware” y posteriormente “Battery monitor”. Establezca la opción “Monitor” a “Voltaje and current” y en la opción “APM ver” seleccione “APM2.5 +- 3DR Power Module”. Deje la opción “Sensor” en “0: Other”, en la sección “Battery capacity” introduzca la capacidad de la batería de su dron.

Para calibrar el monitor de batería mida su capacidad con un medidor de voltaje de batería LiPo e ingrese el valor medido en el campo “Measured battery voltaje” de la sección “calibration”.

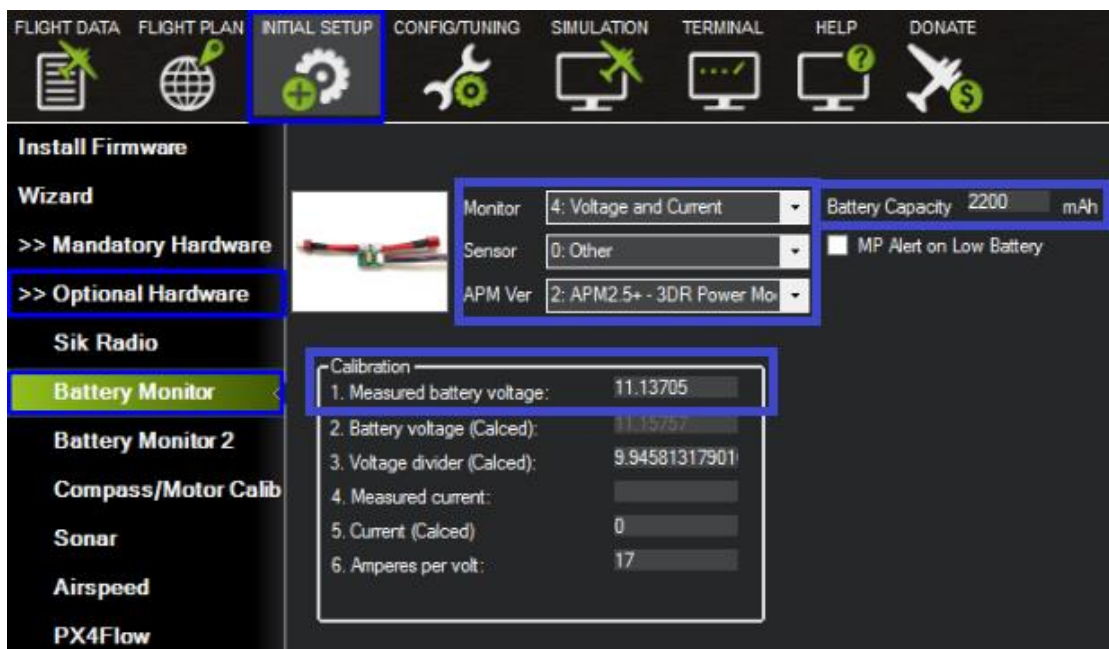


Figura 67-Calibración de monitor de batería (elaboración propia)

3.7.13 Configuración avanzada de telemetría

Los módulos de telemetría están configurados de forma predeterminada y no requieren ninguna configuración adicional a menos que esté planeando utilizar más de un UAV Cardinal o cualquier UAV con módulos de telemetría similares en la misma área.

Si usted no está planeando volar su dron cerca de otros dispositivos UAV puede omitir la siguiente configuración.

Para evitar interferencias con la radio de telemetría en otras aeronaves, debe cambiar la ID de NET en su módulo de telemetría. Primero, necesita descargar el kit de herramientas de configuración de radio de telemetría en <http://vps.oborne.me/3drradioconfig.zip>.

Una vez descargado el archivo deberá descomprimirlo en cualquier folder de su preferencia. Abra la aplicación de los archivos previamente descargados con el nombre de "3DRRadio.exe". Conecte la batería a su UAV, conecte el módulo de telemetría a un puerto USB y seleccione el puerto COM correspondiente en la sección ComPort. Asegúrese de que la velocidad en baudios se establece en 57600. Haga clic en el botón "Load settings"

y espere a que la conexión muestre la configuración actual de su radio de telemetría. El ID NET siempre se establece en 25 de manera predeterminada, pero para evitar cualquier interferencia de los UAV, cada UAV debe tener una ID NET diferente. Elija un ID NET diferente para cada UAV, puede ser cualquier número desde 0 - 499. Para finalizar, haga clic en "Copy Required Items to Remote" y presione en "Save Settings". Ha terminado la configuración de telemetría.

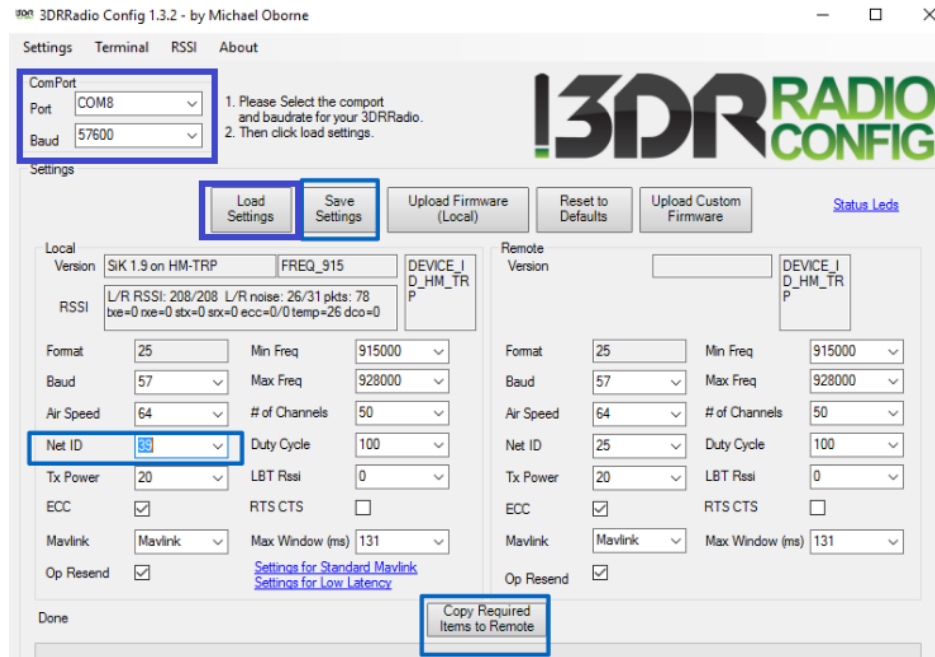


Figura 68-Configuración de telemetría avanzada para evitar interferencias (elaboración propia)

3.8 Prueba de operación de componentes

3.8.1 Principios de aeronáutica

Para volar cualquier vehículo aéreo se requiere comprender tres principios clave de movimiento los cuales se describen con una orientación específica del aeronave, es decir, pitch, roll y yaw.

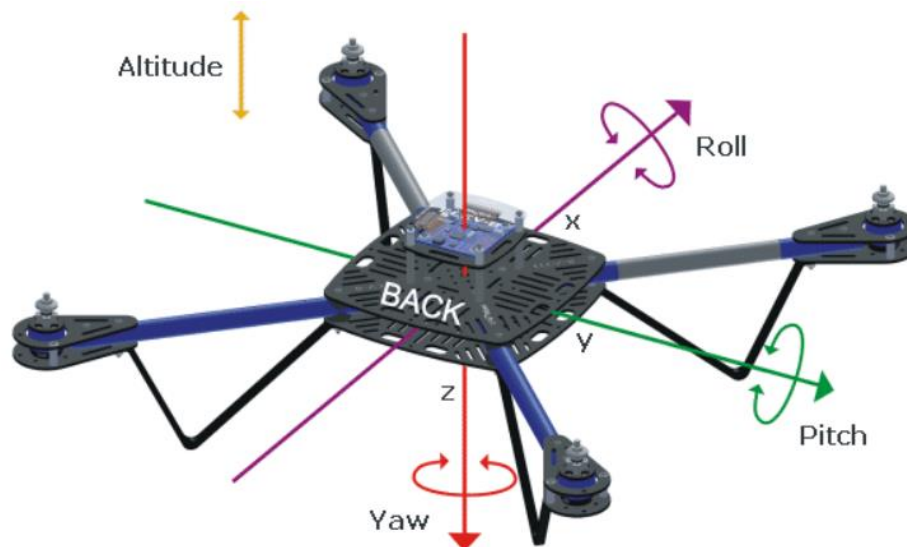


Figura 69-Ejes de movimiento (elaboración propia)

3.8.2 El radiocontrol

El radiocontrol es un transmisor que se comunica con el receptor a bordo del dron. Cada transmisor y cada receptor tiene su propia identificación única. El radiocontrol tiene 6 canales, dos por cada palanca y dos adicionales para seleccionar distintos modos de vuelo.

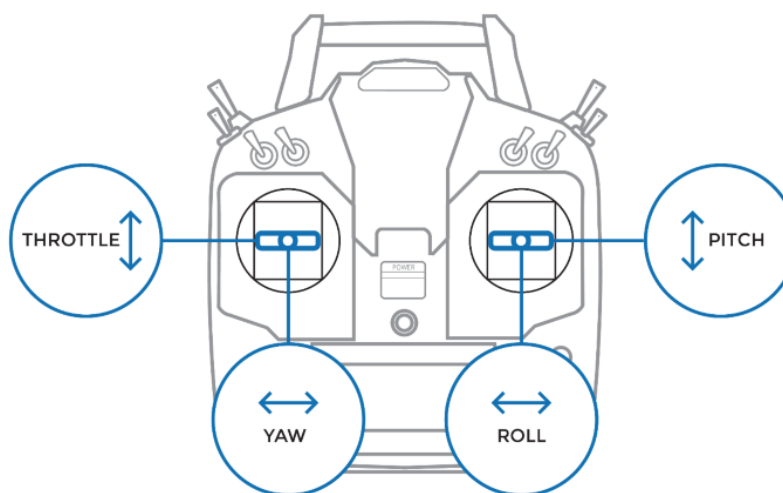


Figura 70-Ejes de movimiento de palancas (elaboración propia)

3.8.3 Uso de la batería y consideraciones

La batería del dron tiene tres paquetes de celdas, con un voltaje de 11.1 V a 2200 mAh, antes de usarla por primera vez asegúrese de que ha sido cargada por completo.



Figura 71-Batería LiPo (elaboración propia)

Para cargar la batería LiPo 3S deberá conectar el cargador a la corriente eléctrica. Conecte la batería al cargador. Cuando tres leds verdes se enciendan significa que la batería ha sido cargada correctamente.



Figura 72-Cargador de batería LiPo (elaboración propia)

Algunas consideraciones muy importantes a tomar en cuenta son las siguientes. Las baterías LiPo pueden ser extremadamente volátiles si no se les da un cuidado apropiado, y podrían explotar o incendiarse y causar daños personales. Jamás utilice una batería dañada. Una señal para saber si la batería está dañada es que muchas veces se hincha o tiene partes del empaquetado despegados.



Figura 73-Peligro de explosión e incendio (elaboración propia)

Mantenga un extintor cerca del lugar donde cargue la batería. Nunca utilice ningún otro cargador para cargar la batería, tampoco deje cargando la batería sin ponerle atención, al igual que asegurarse de que no haya cosas inflamables muy cerca de la posición del cargador y la batería. En caso de incendio desconecte el cargador inmediatamente y apague el fuego con un extintor.

Cuando no use la batería guárdela en un contenedor que no sea inflamable alejado de cualquier combustible en un cuarto con una temperatura entre los 5°C - 21°C. Nunca deje la batería a una temperatura de más de 60°C. Asegúrese que la batería está en buen estado antes de guardarla.



Figura 74-Guardado de baterías aisladas (elaboración propia)

Si planea guardar la batería por más de una semana asegúrese que el voltaje de la batería está entre 3.8V y 3.9V por celda. Cuando la guarde, verifique por lo menos una vez a la semana la condición en la que se encuentra la batería. Nunca deje desatendida la batería por largos periodos de tiempo.



Figura 75-Testes de batería (elaboración propia)

Inspeccione la batería antes y después de utilizarla. Revise si tiene daños, fugas, conectores rotos o hinchazón. En caso de encontrar alguna de estas anomalías, deséchela y reemplácela inmediatamente.



Figura 76-Inspección de baterías antes de uso (elaboración propia)

Siempre asegúrese de no dejar la batería descargada con 3.3V o menos. En tal caso contacte al servicio de soporte técnico de Inbright. Si alguna batería alcanza a tener menos de 3V la batería deberá ser desechada.

Antes de cada vuelo asegure que el voltaje de las celdas de la batería tenga más de 3.8V. El máximo voltaje será aproximadamente de 4.2V. Cuando vuele el dron la carga de la batería no durará más de 15 min, por lo tanto, planifique bien su vuelo y sea consciente de esto. Una vez terminado el viaje asegúrese que de que el voltaje de las celdas es de 3.6V. Esto significa que la batería está en buen estado.

Cortocircuitos pueden causar fuego en la batería. Si por accidente llegara a producirse alguno ponga la batería en una superficie plana y manténgala en observación durante 30 minutos.

No exponga la batería a la luz solar ni permita que se caliente por más de 30 min. Tampoco la exponga al agua ni a la humedad. Si la batería tiene fugas de electrolitos evite el contacto con los ojos y la piel.

Si la batería comienza a hincharse durante cualquier tiempo de carga o descarga, suspenda el proceso de inmediato. Desconecte la batería y colóquela en un área segura para observación durante 30 minutos.

Las baterías dañadas deben enviarse a un centro de reciclaje certificado. Nunca tire las baterías con otra basura.

3.8.4 *Tester*

Para conectar el tester a una batería se conecta del polo negativo al polo positivo. De igual forma se puede corroborar la conexión correcta viendo la parte posterior del tester donde se indica con los signos positivo y negativo.



Figura 77-Tester conectado a batería (elaboración propia)

3.8.5 *Simulación*

Es muy recomendable que antes de un vuelo real con un UAV se tome un curso de entrenamiento de vuelo. Hay una amplia variedad de simuladores de vuelo para practicar y perfeccionar las habilidades deseadas.

3.8.6 Consideraciones de seguridad

Siempre se tiene que tener las precauciones necesarias al utilizar un Dron de cualquier tipo. Las hélices giran lo suficiente rápido para causar una lesión grave, y un vehículo que se puede caer puede causar un gran daño.

Nunca vuele en una zona estrecha o con demasiados obstáculos, lo ideal es realizar los vuelos en espacios abiertos, como por ejemplo campos de fútbol. Mantener un lugar reservado solo para despegar y aterrizar. Asegúrate de que no haya personas o animales en el área de vuelo, si comienza a perder el control del Dron, cambie el modo de vuelo a “Loiter” y entregue el controlador a su maestro o supervisor. No vuele si el clima es demasiado ventoso o húmedo. Evite las áreas polvorientas, ya que la suciedad puede entrar en los motores y dañarlos. Revise periódicamente el apriete de los tornillos y las tuercas de la hélice.

3.8.7 SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) Reglas de vuelo UAV

Los UAV solo se pueden operar durante el día y está prohibido volar aeropuertos cercanos, helipuertos y áreas restringidas.

Los vehículos aéreos no tripulados no pueden dejar caer objetos que puedan causar daños a personas o bienes. Los UAV que pesan más de 2 kg con uso recreativo sólo se pueden volar dentro de clubes de vuelo y los que pesan más 2 kg con uso comercial requieren la autorización de la DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil).

3.8.8 Recomendaciones de uso y consejos

Volar un Dron puede ser complicado al principio, pero con la práctica se tendrá la habilidad dominada. Hay algunas recomendaciones que se deben de tomar en cuenta como no perder de vista el Dron, usar lentes de sol o un sombrero si el clima es soleado,

volar en un estado de ánimo tranquilo, alejarse de posibles distractores, y centrarse en el movimiento de la aeronave.

En caso de perder el control de la aeronave, cambiar al modo Loiter y entregue el controlador a su maestro o supervisor; En caso de cambiar al modo AltHold o Loiter para estabilizar, asegúrese de tener la palanca del acelerador posicionado un poco más del 50%. De lo contrario, hará que la aeronave caiga. Se aconseja agarrar las palancas del controlador con el pulgar y otros dedos. Da un mejor agarre y más control sobre pequeños movimientos.

Siempre es más fácil volar el dron con la parte posterior hacia ti, ya que cambiar su orientación podría dar un efecto de "espejo" a los ejes de inclinación y balanceo. Usar la palanca izquierda para modificar la orientación de la aeronave y ajustarla para que siempre esté frente a ti.

3.9 Obtención de imagen RGB e imagen satelital

Para conseguir tomas limpias y con la resolución adecuada es de vital importancia decidir la altura de vuelo, la ruta y la cámara usada. Tener en cuenta el cultivo en el que se va a trabajar y el objetivo que se busca o persigue es de suma importancia, ya que esto afectará los parámetros que se elijan para completar la tarea deseada, ya que por ejemplo la altura que se elija influirá en la resolución espacial de las imágenes, la cantidad de tomas necesarias para cubrir el cultivo o terreno y la duración del vuelo, algo que se debe tener muy en cuenta para evitar problemas con la autonomía del multirrotor o el UAV que esté designado para este trabajo.

Como ejemplo, si lo que se desea es el conteo de plantas individuales en algún cultivo de hilera estrecha como lo es el trigo, será necesario trabajar con resoluciones espaciales de en torno a 1 cm, por lo cual estaríamos obligados a volar a una altura aproximada de 30 m con una cámara GoPro Hero 7. En cambio, si lo que se desea es obtener una toma general de ciertos cultivos será necesaria una mayor altitud entre más grande sea la imagen del terreno requerido.

Una vez seleccionada la altura de vuelo adecuada para la implementación de nuestro proyecto y desarrollo de nuestros objetivos procederemos a diseñar nuestro plan de vuelo

en un software libre llamado mission planner e implementaremos lo explicado anteriormente.

Para poder capturar imágenes con el dron necesitaremos trazar una ruta. En esta ocasión se hará un recorrido en 1 hectárea de tierras de cultivo de la universidad de Navoja, Sonora. Para esto nos ayudaremos del programa mission planner. Este software es de código abierto por lo que nos permite modificar una mayor cantidad de parámetros de nuestro dron, siempre y cuando nuestro dron también sea de código abierto, en caso contrario solo se podrán modificar parámetros y variables establecidos por la empresa que fabrique su dron. En nuestro caso contamos con el dron Iris, por lo que tendremos control absoluto de los parámetros que se necesiten modificar.



Figura 78 - Dron iris (Kote Puerto, 2014)

Una vez conectados al programa mission planner armamos y desarmamos nuestro dron, esto con el fin de establecer automáticamente el home mediante el GPS y establecer la altura de nuestro lugar de trabajo. Una vez hecho esto, nos dirigimos al menú “flight plan” y desplegamos la pestaña “waypoints”. Comenzamos a hacer click en el mapa que aparece en el programa para ir trazando la ruta. Una vez terminada la ruta presionaremos sobre cada punto que hemos trazado para cambiar el parámetro de la altura y lo dejaremos con un valor de 100, como se puede ver en la siguiente figura.



Figura 79 - Ruta del dron, configuración de waypoints (elaboración propia)

Una vez realizados estos pasos procedemos a dirigirnos a la zona de despegue. Antes de activar la ruta de vuelo automática se deberá encender la cámara y programar el temporizador dependiendo de la distancia de vuelo y la cantidad de imágenes que se requieran. Cada 3 segundos es un tiempo recomendado, sin embargo, está a decisión y necesidades del operador.

3.10 Procesamiento de imagen en software ArcMap

Para poder realizar el índice de resistencia atmosférica visible (VARI) necesitaremos convertir nuestra fotografía a formato .TIFF, este formato se puede obtener con algún convertidor online ya que esto nos permitirá separar individualmente las bandas RGB de la imagen a utilizar. Si no la convertimos a este formato no podremos utilizar las fórmulas para calcular el índice anteriormente mencionado, por eso es de suma importancia realizar este proceso antes de comenzar el cálculo en el software.

Una vez convertida la imagen abrimos el programa ArcMap y presionamos el botón “Add Data” y buscamos la imagen en formato .TIFF, damos doble click en la imagen para desplegar las bandas disponibles, seleccionamos las primeras tres bandas y las añadimos.

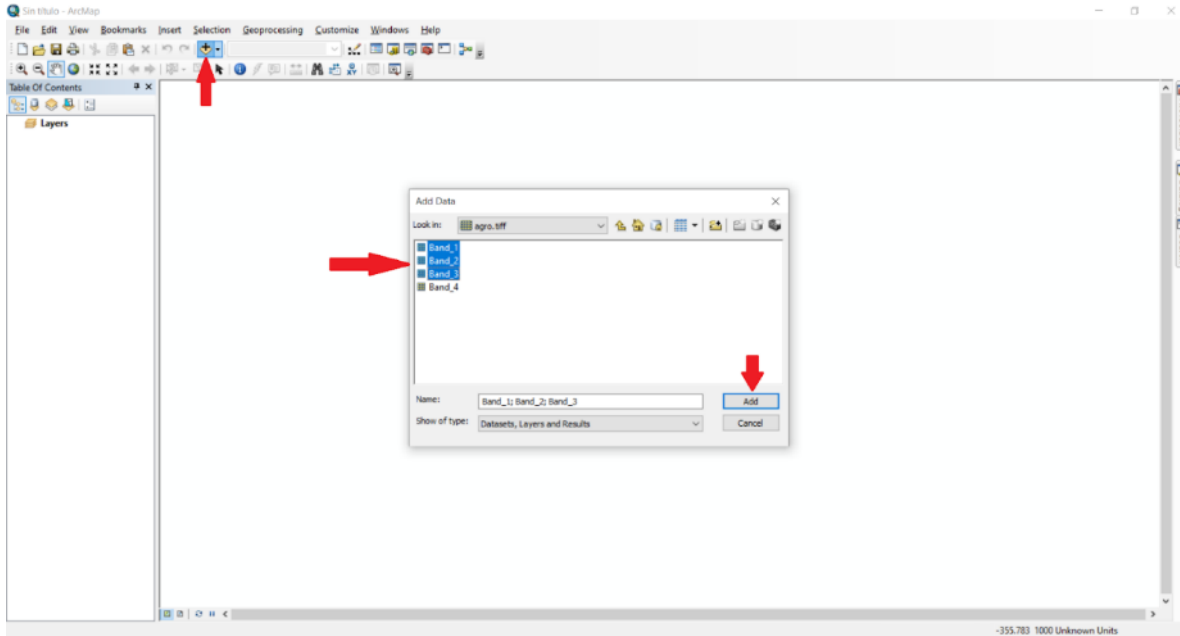


Figura 80 - Pasos para añadir bandas RGB (elaboración propia)

3.11 Aplicación del método de descomposición de bandas de imagen RGB

Una vez añadidas las tres bandas procederemos a insertar la fórmula para realizar el cálculo del índice de VARI. Para esto haremos uso de la herramienta “Raster Calculator”, la cual se encuentra en el botón “arc toolbox”, seguido de “spatial analyst tools”, “map algebra” y finalmente “raster calculator”.

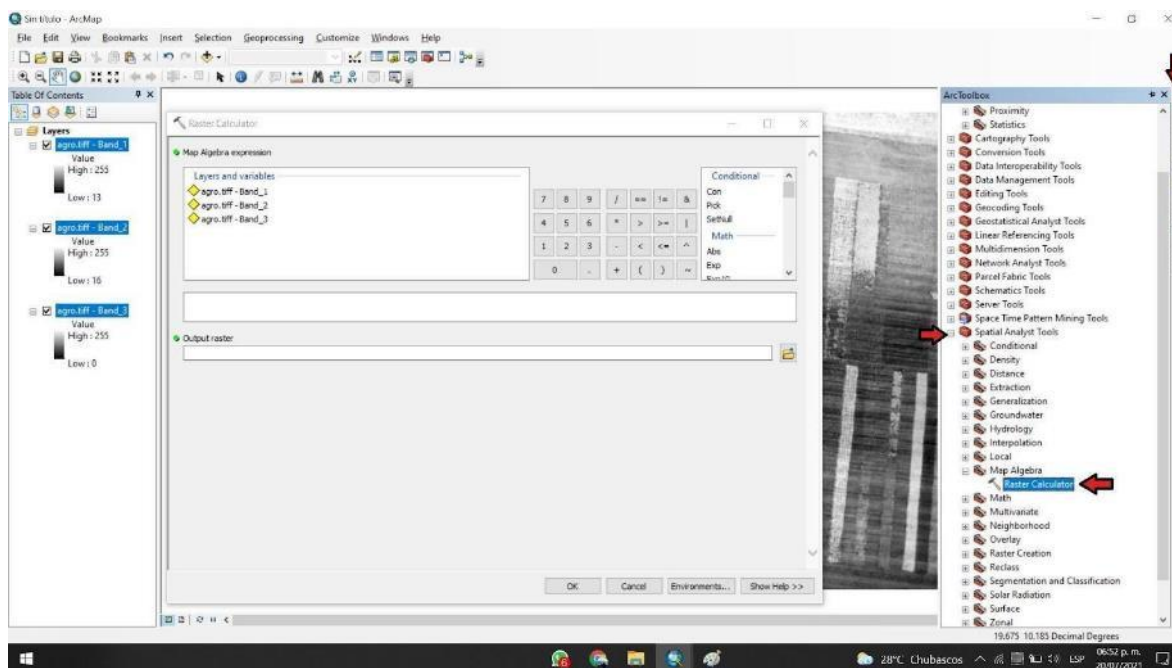


Figura 81 - Toolbox para calculadora raster (elaboración propia)

Antes de hacer cualquier operación tendremos que introducir el comando float para no tener problemas a la hora de la representación de los tipos de datos.

La fórmula para calcular el índice de VARI= $(\text{green} - \text{red}) / ((\text{green} + \text{red}) - \text{Blue})$. Si traducimos esta fórmula en bandas para visualizarlo de manera más clara, quedaría de la siguiente manera $\text{VARI} = (\text{banda 2} - \text{banda 3}) / ((\text{banda 2} + \text{banda 3}) - \text{banda 1})$. En la calculadora raster quedaría de la siguiente manera $\text{VARI} = \text{float} ("agro.tiff - \text{Band}_2" - "agro.tiff - \text{Band}_3") / \text{float} (("agro.tiff - \text{Band}_2" + "agro.tiff - \text{Band}_3") + "agro.tiff - \text{Band}_1")$.

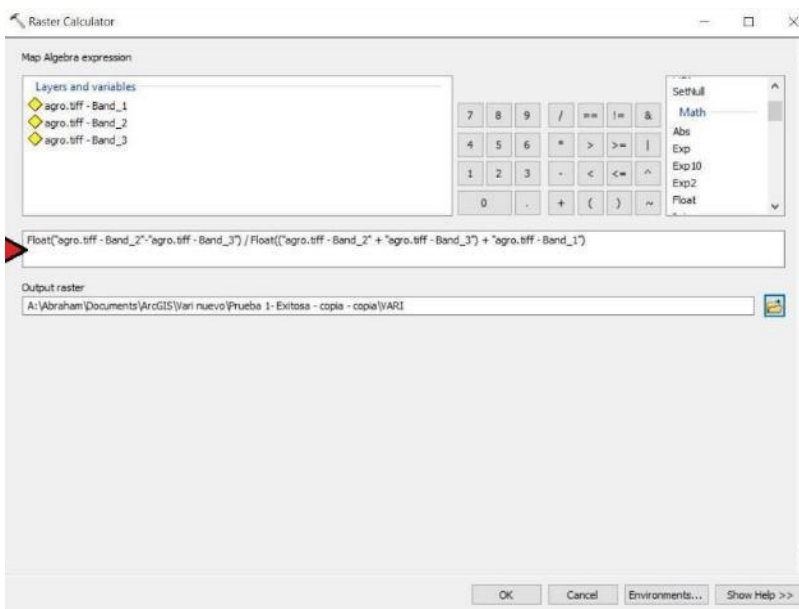


Figura 82 - Fórmula índice de VARI (elaboración propia)

Finalmente, en la sección output raster presionamos el botón que tiene forma de carpeta y seleccionamos la ruta donde será guardado el resultado de la operación, creamos un nombre para el archivo y guardamos, presionamos OK y esperamos a que el sistema calcule la operación.

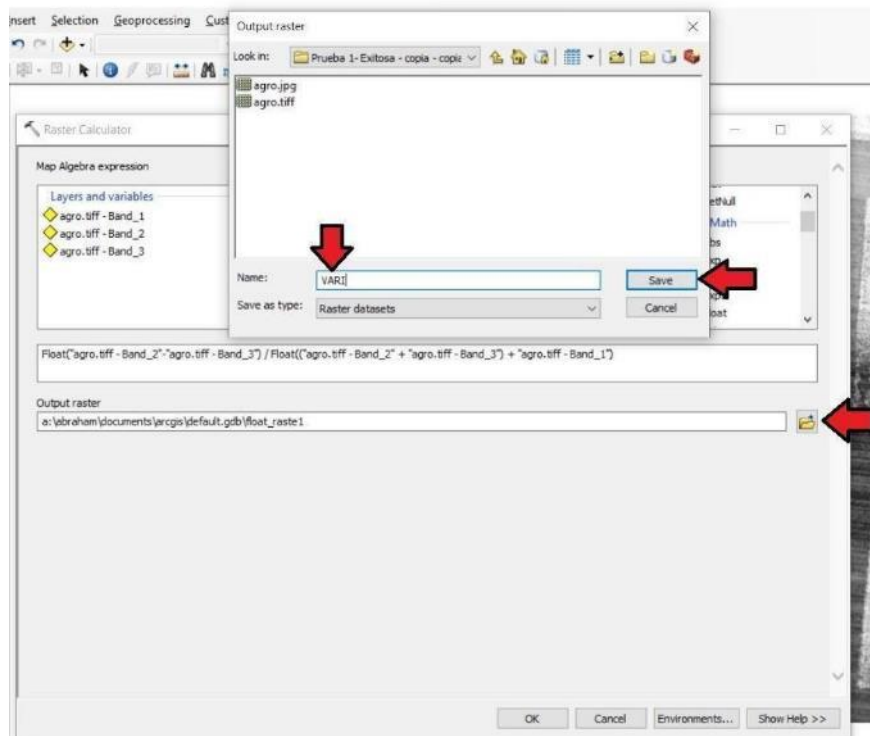


Figura 83 - Ruta de guardado (elaboración propia)

Para terminar, desactivamos las bandas 2 y 3, cambiamos la paleta de colores de rojo a verde, lo verde son las zonas con vegetación y las zonas rojas sin vegetación. También este índice compensa las variaciones de la luz que sean provocadas por la atmósfera por lo que es más notoria la vegetación que hay.

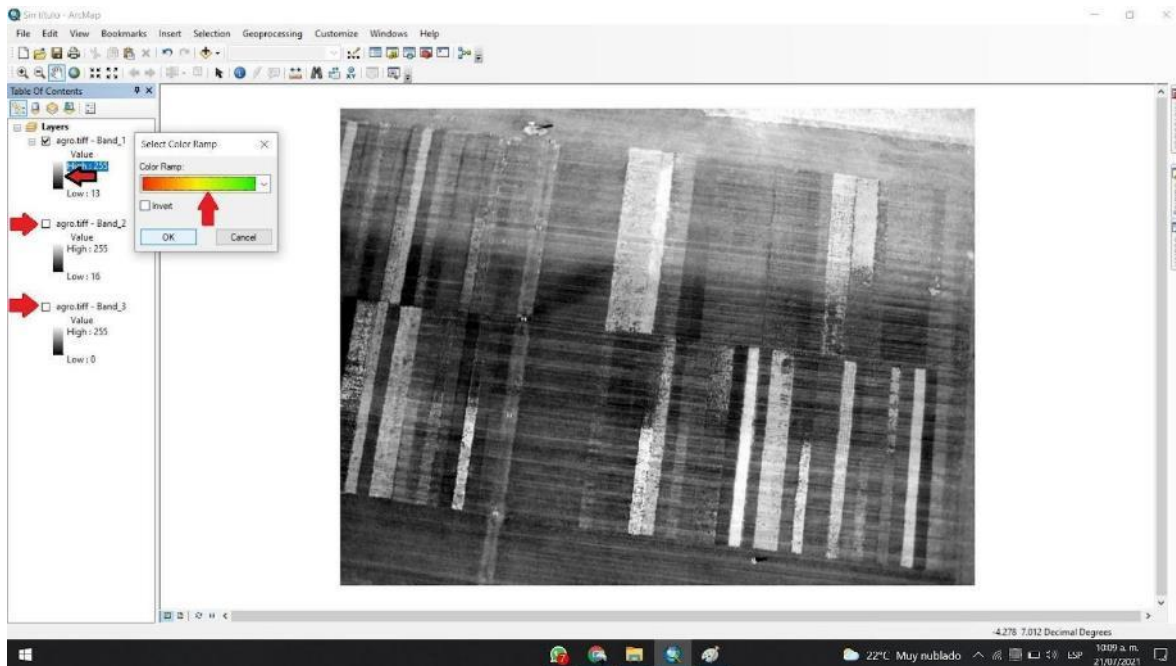


Figura 84 - Configuración de bandas (elaboración propia)

En la imagen siguiente se puede observar cómo se obtienen claramente las partes del terreno ya segmentadas con follaje y zonas áridas, lo cual nos permite desarrollar estrategias de acción. Hay métodos que permiten obtener datos más puntuales sobre el terreno, pero para lograr estos resultados se requiere equipo especializado que es más costoso.

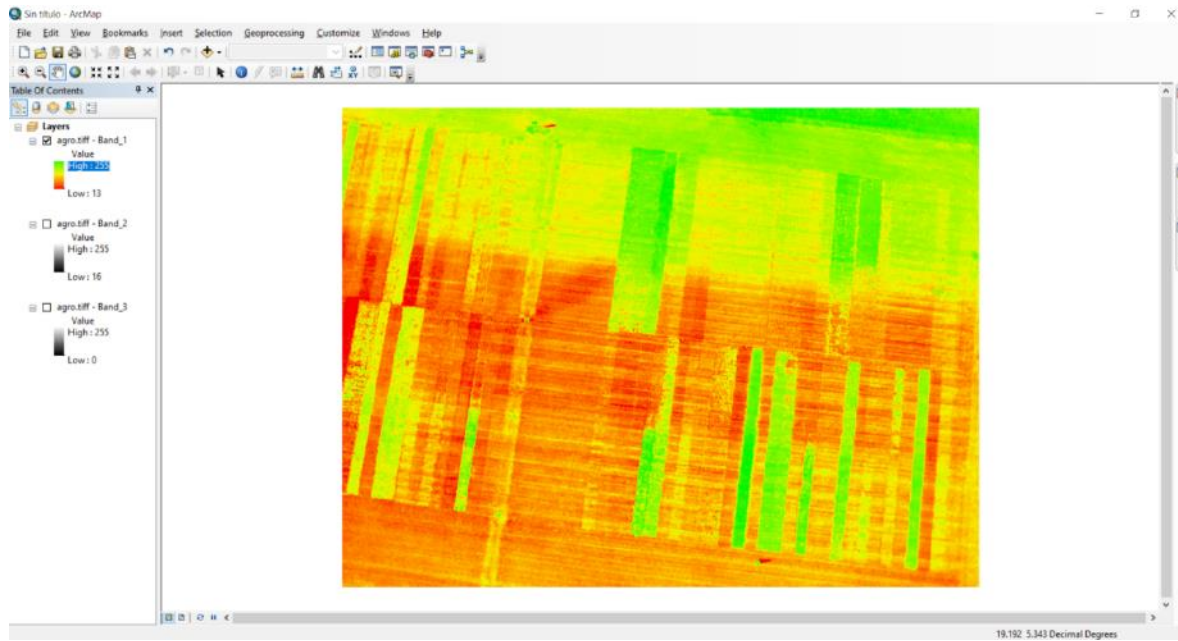


Figura 85 - Resultado final VARI (elaboración propia)

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de un estudio empírico en el que se aplicaron estas técnicas para analizar el desarrollo y la salud de los cultivos de una región específica.

En primer lugar, se describe la metodología utilizada para adquirir y procesar las imágenes satelitales, así como para realizar la descomposición de bandas RGB y la fotointerpretación. Luego, se presentan los resultados obtenidos, incluyendo las características específicas de los cultivos, como la distribución espacial y la densidad de follaje, entre otros parámetros.

4.1 Método fotointerpretación de imagen satelital landsat 8

Para la obtención de imágenes satelitales se utiliza el sitio web USGS Earth Explorer (Servicio Geológico de los Estados Unidos), la cual es capaz de hacer búsquedas de inventarios de satélites para poder identificar las áreas requeridas. En este caso, para el análisis de cultivos de un área extensa del valle del yaqui se descargaron imágenes satelitales del satélite Landsat 8, debido a que este transporta dos instrumentos, el sensor de imagen terrestre operativo (OLI) que provee de nueve bandas espectrales que cubren

el espectro desde los 0.433 μm a los 1.390 μm y sensor de infrarrojos térmico (TIRS) que provee de 10.30 μm a 12.50 μm .

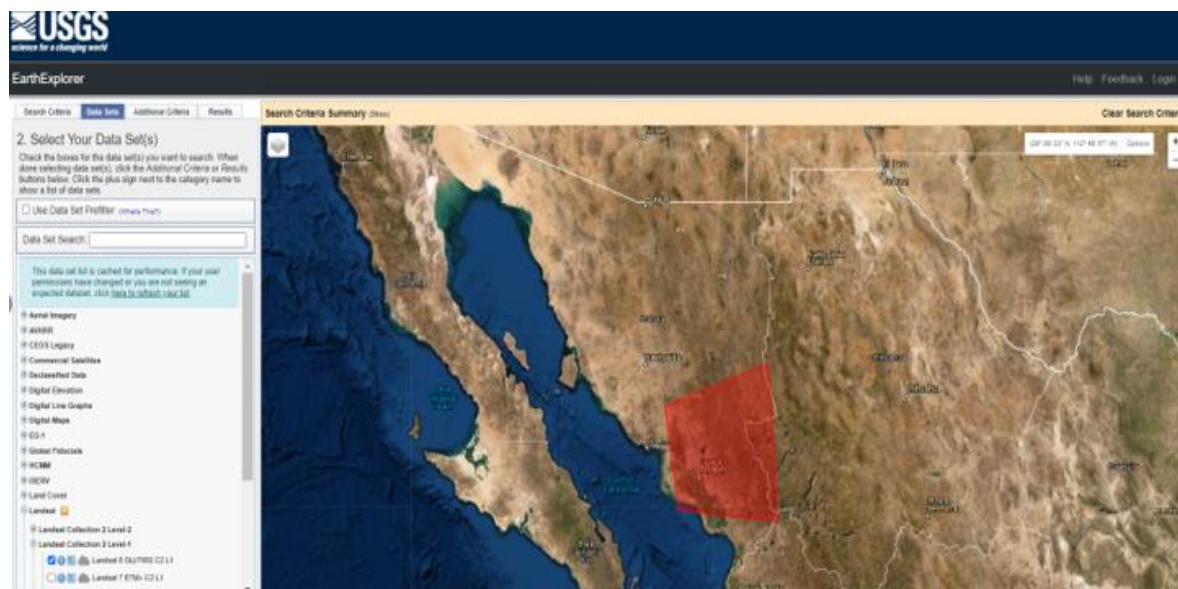


Figura 86 - Obtención de imagen satelital del sitio web USGS del valle del yaqui (USGS, s.f.)

4.2 Resultados obtenidos

4.2.1 Procesamiento en software ArcMap para fotointerpretación de imagen satelital landsat 8

El primer paso para el procesamiento de imágenes satelitales en el software ArcMap es cargar las imágenes que se obtuvieron del USGS, una vez cargadas se utiliza la herramienta “Bandas compuestas” para poder realizar las diferentes combinaciones, y para el análisis por medio de operaciones aritméticas se utiliza la herramienta “Función aritmética de banda”. A continuación, se muestra una tabla con las diferentes combinaciones de bandas y fórmulas que se utilizaron:

Tabla 3 - Fórmulas y bandas de los índices de vegetación (elaboración propia)

Índices de vegetación	Formula y bandas	Autor
1. Color natural	Combinación bandas 4,3,2	Landsat 8
2. Infrarrojo	Combinación bandas 5,4,3	Landsat 8

3. Agricultura	Combinación bandas 6,5,2	Landsat 8
4. Vegetación saludable	Combinación bandas 5,6,2	Landsat 8
5. Análisis de vegetación	Combinación bandas 6,5,4	Landsat 8
6. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)	$(B5-B4)/(B5+B4)$	Landsat 8
7. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)	$(B5-B3)/(B5+B3)$	Landsat 8
8. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)	$(B3-B6)/(B3+B6)$	Landsat 8
9. Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI)	$(B5-B6)/(B5+B6)$	Landsat 8

4.2.2 Color Natural

Para lograr el color natural de la imagen satelital se realiza la combinación de las bandas 4,3,2. Esta imagen sirve como punto de comparación con las demás combinaciones.

Al ser una combinación de colores naturales en la que se utilizan canales de gama visible la vegetación sana será color verde, los campos limpios aparecerán en color clara, la vegetación no saludable es marrón y amarilla, los caminos en gris y las costas en blanco. (EOS Data Analytics, s.f.)

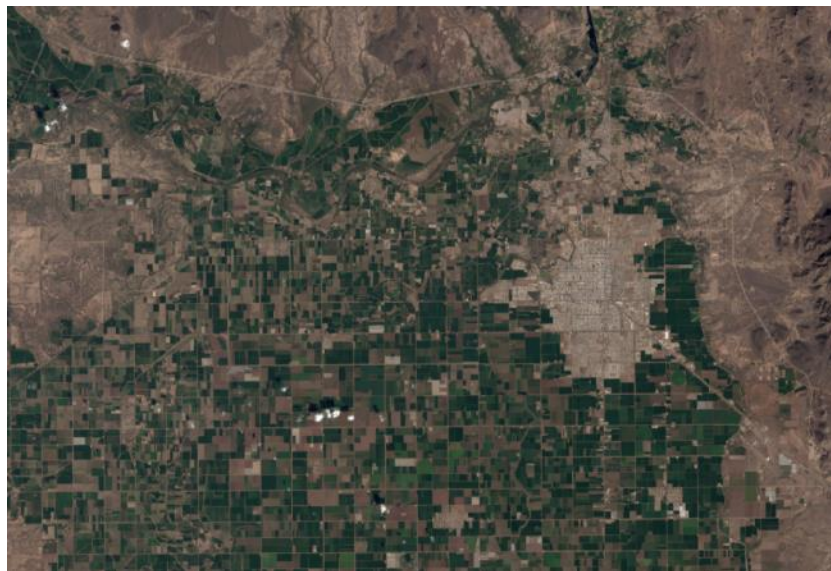


Figura 87 - Color natural, combinación 4,3,2 (Elaboración propia)

4.2.3 Color infrarrojo

Esta combinación de bandas tiene un alto grado de sensibilidad a la vegetación verde, debido a la alta reflectividad en el infrarrojo y la baja en el visible. Cada color detecta un indicador diferente; el color rojo detecta una vegetación bien desarrollada y sana, el rosa identifica una vegetación menos desarrollada o menos aglomerada, el blanco, áreas con vegetación nula o muy poca, el café, vegetación del tipo arbustiva muy variable, el negro o azul oscuro indica la existencia de agua y el beige o dorado indican zonas de transición, como por ejemplo pastizales secos y matorrales.



Figura 88 - Color infrarrojo, combinación 5,4,3 (Elaboración propia)

4.2.4 Agricultura

Con la combinación de bandas 6, 5, 2 podemos lograr un análisis para la detección de áreas de uso para la agricultura, estas están representadas con una tonalidad verde brillante y de igual forma se puede distinguir los cultivos con vegetación nula, representados con color blanco, mientras que las zonas amarillas son cultivos secos o con falta de agua y las zonas rojas son áreas con vegetación menos desarrollada o menos aglomerada.

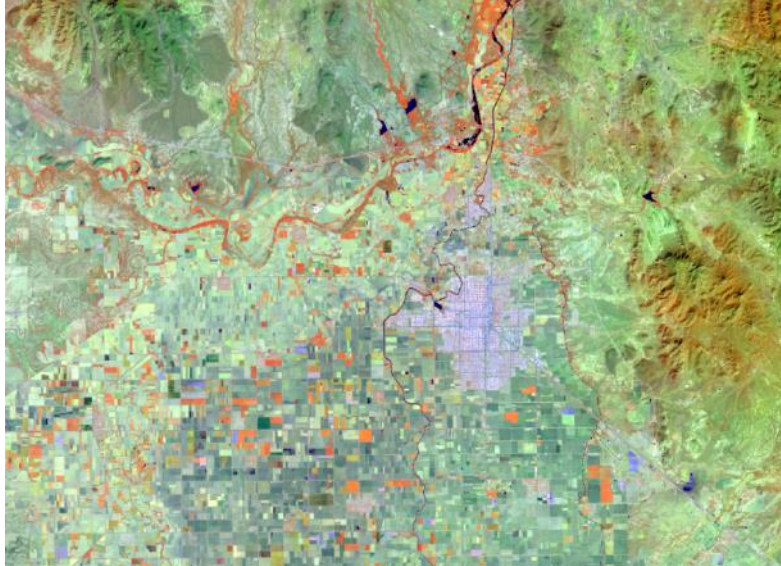


Figura 89 - Agricultura, combinación 6,5,2 (Elaboración propia)

4.2.5 Vegetación saludable

Con esta combinación se logra identificar la vegetación sana con tonos rojos, naranjas, amarillos y marrones. El área urbana se identifica en un tono blanco; el suelo, marrón; las áreas verdes, azul oscuro, azul y gris indican áreas de tala, y las áreas rojas indican áreas donde la vegetación está en crecimiento y pastizales con vegetación escasa. El agua clara y profunda, como oscura en combinación, y si el agua contiene sedimentos o es poco profunda, mostrará un tono de azul más claro.



Figura 90 - Vegetación saludable, combinación 5,6,2 (Elaboración propia)

4.2.6 Análisis de vegetación

La combinación de estas bandas proporciona información y contraste de color para detectar suelo desnudo y vegetación. Es adecuado para la investigación de la vegetación y se usa ampliamente en el monitoreo de cultivos, la detección y manejo de plagas y el manejo de la madera. Los cultivos en áreas secas y bosques de coníferas y caducifolios son de color verde oscuro, mientras que la vegetación irrigada y saludable es de color verde claro. El suelo parece lavanda, bronce o marrón.

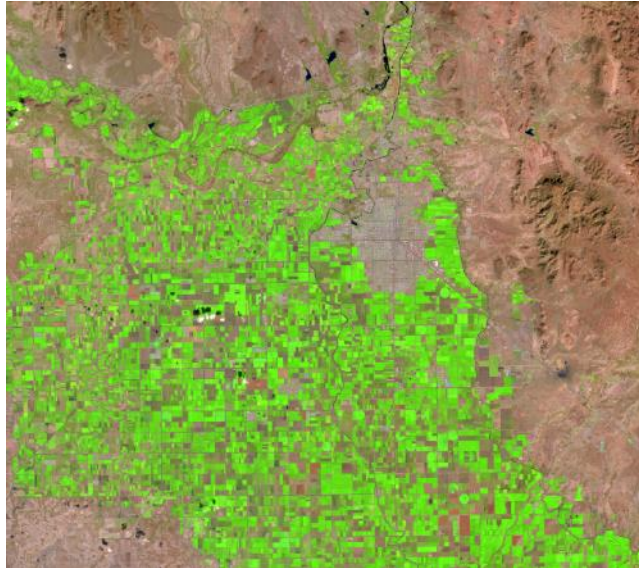


Figura 91 - Análisis de vegetación, combinación 6,5,4 (Elaboración propia)

4.2.7 Índice de vegetación (NDVI)

El índice define un valor de -1,0 a 1,0, donde los valores negativos se componen principalmente de nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero se componen principalmente de rocas y suelo desnudo. El valor mínimo (0,1 o menos) de la función NDVI corresponde a un área sin rocas, arena o nieve. Los valores medios (0,2 a 0,3) indican arbustos y pastizales, mientras que los valores más altos (0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales.

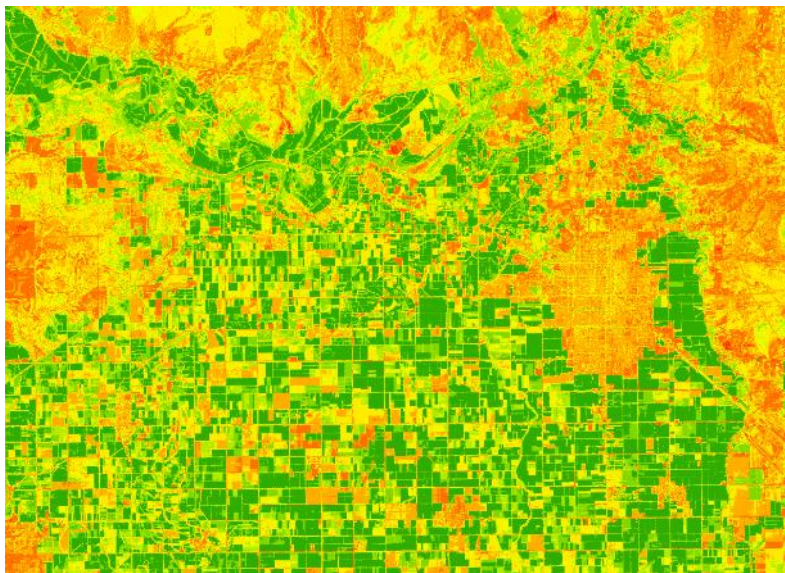


Figura 92 - NDVI Fórmula $(B5-B4)/(B5+B4)$ (Elaboración propia)

4.2.8 Vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI)

El color más alto (verde) corresponde a la sensibilidad a la variación del contenido de clorofila en el cultivo, visualizándose así menores tonos en color verde representando menor nivel de clorofila. Un valor GNDVI bajo (amarillo) indica un muy bajo nivel de clorofila o nulo.

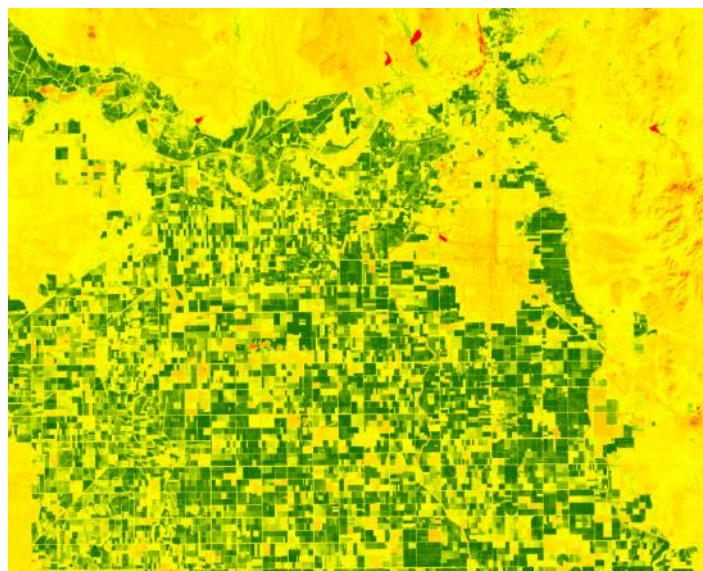


Figura 93 - GNDVI Formula $(B5-B3)/(B5+B3)$ (Elaboración propia)

4.2.9 Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

Un valor NDWI más alto (azul) corresponde al alto contenido de agua en la planta y al recubrimiento de la mayor parte de la planta. Un valor NDWI bajo (rojo) indica bajo contenido de agua. Durante períodos de escasez de agua, el valor de NDWI disminuirá.

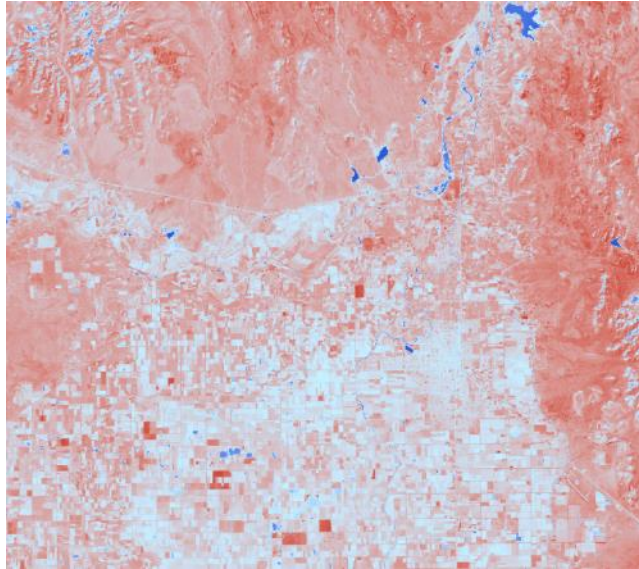


Figura 94 - NDWI Formula $(3-6)/(3+6)$ (Elaboración propia)

4.2.10 Índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI)

El color más alto (azul) corresponde al alto contenido de humedad en la vegetación, visualizándose así menores tonos azules representando menor humedad. Un valor NDMI bajo (rojo) indica un muy bajo nivel de humedad o nulo.

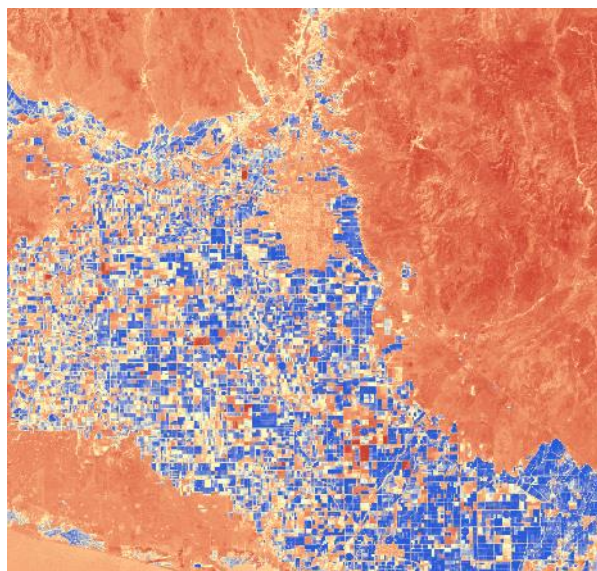


Figura 95 - $NDMI = (B05 - B06) / (B05 + B06)$ (Elaboración propia)

4.3 Comparación de métodos aplicados

Para poder responder a la incógnita presentada al inicio de esta tesis que es determinar cuál de los dos métodos es más beneficioso para su aplicación en la agricultura, se tomarán diferentes puntos a evaluar, a los cuales se asignarán puntajes, los cuales irán sumando hasta obtener una calificación final, seguido de esto se hará un análisis de los puntos evaluados y se hará una comparativa de la asignación de los puntajes, para así, obtener un resultado final.

Tabla 4 - Comparativa de las 2 técnicas para el análisis de cultivos mediante el procesamiento de imágenes (elaboración propia)

Rasgos a evaluar	Técnica de descomposición de bandas RGB	Fotointerpretación de imagen satelital
Color natural	X	X
Infrarrojo		X
Agricultura		X
Vegetación saludable		X
Análisis de vegetación		X
Índice de VARI	X	X

Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI)		X
Índice de vegetación de la diferencia normalizada verde (GNDVI)		X
Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)		X
índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI)		X
Precisión de imágenes de la zona a evaluar (Zoom)	X	
Precisión de los resultados finales	X	X
Facilidad al identificar secciones de terrenos.	X	
Rapidez en la obtención del resultado final		X
<u>TOTAL DE PUNTOS</u>	5 PUNTOS	12 PUNTOS

Como se puede observar en la tabla 4 el ganador por puntaje indudablemente es la fotointerpretación de imagen satelital. Sin embargo, analizaremos los puntos que han sido evaluados para poder comprender mejor, ya que dependiendo de lo que se está buscando en el análisis del cultivo va a depender que método utilizaremos, porque es cierto que la fotointerpretación de imagen satelital tiene muchas ventajas, pero hay algunos datos a tomar en cuenta.

La técnica de descomposición de bandas RGB es cierto que solo es viable en el caso que se requiera ya sea el método de color natural o índice de VARI, pero que ventaja tiene utilizar esta técnica en estos 2 casos puntuales. Principalmente la precisión de la zona a la cual se quiere evaluar, ya que con el uso de las imágenes satelitales no se puede hacer un acercamiento exacto al punto que se requiere, al mismo tiempo que la facilidad para identificar la zona a evaluar es más complicada ya que la zona de la imagen satelital es bastante extensa.

Cabe recalcar que para los demás métodos es posible hacerlo con el dron, pero como se explicó anteriormente la cámara especializada para la obtención de los datos de la imagen con las bandas necesarias para el procesamiento es extremadamente cara. Por lo que para todos los demás métodos será necesario el uso de la imagen satelital por versatilidad.

En resumen, mientras se necesite exactitud en la zona a analizar, o sea un terreno pequeño y sea requerido el método de color natural o índice de VARI, el utilizar la técnica de

descomposición de bandas RGB será la mejor opción. Si la zona a evaluar es grande, la opción adecuada sería utilizar la técnica de fotointerpretación satelital, ya que es más rápido, porque no se requiere asistir al lugar para tomar las imágenes.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones relacionadas con este trabajo de tesis.

5.1 Conclusiones

Los siguientes objetivos fueron cumplidos:

Se aplicó el método de descomposición de bandas de imagen RGB para analizar la vegetación de un cultivo.

Se aplicó el método de fotointerpretación de imagen satelital para analizar la vegetación y agua de un cultivo

Las conclusiones principales obtenidas fueron las siguientes:

- 1) Fueron cumplidos el objetivo primario y los objetivos secundarios.
- 2) La pregunta de investigación se responde de la manera siguiente: los beneficios que deja el análisis de cultivos con procesamiento de imágenes mediante el uso del software ArcMap son grandemente eficientes para el aprovechamiento del monitoreo de cultivos, pues se dejan evidencias y experiencia plasmada para poderla utilizar en nuevas

investigaciones en el desarrollo de esta área de estudio y para capacitar al recurso humano.

3) La aplicación del método de descomposición de bandas de imagen RGB para analizar la vegetación de un cultivo, deja en claro el análisis básico para poder

Aplicar los diferentes métodos para el procesamiento de imágenes en software.

4) La aplicación el método de fotointerpretación de imagen satelital para analizar la vegetación y agua de un cultivo, es bastante eficiente para analizar cultivos o en general terrenos, pues tiene una gran variedad de herramientas que da como resultado el poder analizar más a fondo y realizar otros tipos de análisis que ayuden no solamente en cultivos sino también a desarrollar más en la investigación de varios índices en diferentes tipos de terrenos.

5.2 Recomendaciones

Considérese las siguientes recomendaciones:

1) Se necesita dominar el software ArcMap en lo básico para comprender bien su funcionamiento y poder realizar un buen trabajo.

2) En caso de requerir datos adicionales o muy específicos de ciertas áreas de un cultivo se puede utilizar equipo profesional, tal como cámaras multiespectrales.

3) En cuanto a la teoría y práctica con referencia a la descomposición de una imagen satelital es necesario comprender el contenido para poder realizar un análisis bien ejecutado y obtener los resultados requeridos.

4) Es necesario conocer el ensamblado, la calibración, operación y configuración del dron Iris, para cuidado y su uso correcto.

Bibliografía

- Aerial Insights. (2017). *Aerial Insights*. Obtenido de <https://www.aerial-insights.co/blog/camara-multiespectral/>
- Alonso, D. (2019). *MappingGIS*. Obtenido de <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>
- ArduPilot. (2009). *Ardupilot*. Obtenido de Ardu Pilot Mega Features: <https://www.ardupilot.co.uk/>
- Aula fácil. (2022). *Conexión ESC a los motores*. Obtenido de <https://www.aulafacil.com/cursos/maquetas/como-hacer-un-dron-con-pasos-muy-sencillos/conexion-esc-a-los-motores-l40166>
- Austin. (2010). *Unmanned Aircraft Systems UAVS Design*. Reino Unido: Universidad de la laguna.
- Austin, R. (2010). *Unmanned Aircraft Systems UAVS Design*. Reino Unido: Development and Deployment.
- Birau, C. (15 de Julio de 2015). *Diseño y fabricación de un vehículo aéreo no tripulado*. Recuperado el 25 de Abril de 2018, de Upcommons: <https://acortar.link/f5cKxL>
- Cabacas, T. (14 de Marzo de 2012). *My computer*. Obtenido de Parrot AR. 2.0: <https://www.muycomputer.com/2012/03/14/parrot-ar-drone-2-0-caracteristicas-precio/>
- Cárdenas, G. (2017). Drones, ciencia al vuelo. *¿Como ves?*, 5.
- Carrasco. (2015). *Integración de un UAV (Vehículo aéreo no tripulado) en la plataforma robótica ARGOS*. Reino Unido: Universidad Autónoma de Madrid Politécnica Superior.

- Cerveral, C. (2016). Historical Evolution of the unmanned aerial vehicles to the present. *Dyna*, 288. doi:<https://doi.org/10.6036/7781>
- ChickenFPV. (s.f.). *LOS MEJORES CHASIS PARA DRONES DE CARRERAS Y FREESTYLE*. Obtenido de <https://chickenfpv.com/chickenfpv/los-mejores-componentes-para-drones-de-carreras-y-freestyle/los-mejores-chasis-para-drones-de-carreras-y-freestyle/>
- Cuerno, S. (12 de Mayo de 2016). *Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de Dyna: https://oa.upm.es/40803/1/INVE_MEM_2015_203893.pdf
- Delgado, V. (1 de Junio de 2016). *La era de los drones*. Recuperado el 18 de Enero de 2018, de Cinematographer: <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>
- Dinamo. (06 de Mayo de 2019). *Torrente digital*. Obtenido de Recibidor FlySky FS-IA6 Vinculo Con Eachine Racer 250: <https://torrentedigital.com/recibidor-flysr-250-tutorial/>
- DJI. (2015). *Phantom 3 professional*. Obtenido de <https://www.dji.com/mx/phantom-3-pro>
- Enric Lujan, J. S. (2014). El arma de moda: impacto del uso de los drones en las relaciones internacionales y el derecho internacional contemporaneo. *ICIP Research*, 231. Obtenido de Isip Research: https://www.icip.cat/wp-content/uploads/2020/11/ICIP_RESEARCH-4_WEB_compressed.pdf
- EOS Data Analytics. (s.f.). *EOS*. Obtenido de NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>
- GIS. (05 de Noviembre de 2017). *GIS&BEERS*. Obtenido de <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-ndwi-diferencial-de-agua-normalizado/>
- Gonzalez, A. (22 de Marzo de 2016). *Drones aplicados a la agricultura de precisión*. Recuperado el 15 de Febrero de 2018, de Publicaciones e investigación:

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/download/1585/1917>

Government, U. S. (Junio de 2018). *Dictionary of Military and Associated Terms*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, de Joint Chiefs of Staff: <https://www.hsdl.org/?view&did=813130>

Hacienda, C. E. (2015). Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. *La suma de todos*, 242. Obtenido de La suma de todos.

Hernández, F. B. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edición McGRAW-HILL ed.). Interamericana editores.

Herreros. (2015). *Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. España: Fundación de Energía de la Comunidad de Madrid.

Humphreys, W. (2014). La vulnerabilidad de los drones. *Investigación y ciencia*, 1. Obtenido de Investigación y ciencia.

Hutchinson. (2008). *Wikipedia*. Obtenido de https://simple.wikipedia.org/wiki/Pitch,_yaw,_and_roll

Jerry. (22 de Enero de 2018). *Mi dron de carreras*. Obtenido de ¿COMO ELEGIR EL MEJOR TRANSMISOR RC PARA TU DRONE?: <https://www.midronedecarreras.com/tutoriales/emisoras-y-transmisor-rc/>

Juniper, A. (2015). *The complete guide to drones: Whatever your budget*. United Kingdom: Editorial Wellfleet Press.

Kote Puerto. (08 de Septiembre de 2014). *Xataka*. Obtenido de <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/3d-robotics-iris-otro-drone-que-te-persigue>

- Martínez, M. A. (21 de Noviembre de 2021). *Ronix*. Obtenido de ¿Qué son los motores sin escobillas y qué ventajas ofrecen?: <https://ronixtools.com/es/blog/what-are-brushless-motors-and-what-advantages-do-they-offer/>
- McGrady, C. (18 de Enero de 2016). *Arrow*. Obtenido de ¿Con o sin escobillas? ¿Qué motor de CC debería elegir?: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/which-dc-motor-is-best-for-your-application>
- Meza, I. (18 de Mayo de 2015). *Los drones: Su aplicación en el mundo de la comunicación*. Obtenido de <https://acortar.link/dYGPWq>
- Michlig, A. (2019). *Auravant*. Obtenido de <https://help.auravant.com/es/articles/3636624-que-es-el-indice-gndvi>
- Miller. (28 de Julio de 2016). Linear BEC's versus Switching BEC's. *The power system specialist*, 3. Recuperado el 22 de Enero de 2018
- Montesinos, S. (23 de Octubre de 2015). *Aplicaciones operativas de los SARPs en agricultura*. Recuperado el 22 de Marzo de 2018, de Geodim: http://www.geodim.es/pdf/2015_SARPs_en_Agricultura.pdf
- Murcia, U. d. (s.f.). <https://www.um.es/geograf/sig/teledet/fotogeol.html>. Obtenido de Fotogeol: <https://www.um.es/geograf/sig/teledet/fotogeol.html>
- Olivera, O. C. (Julio de 2018). *CCEEA*. Obtenido de <https://ccea.mx/blog/instalaciones-electricas/fundamentos-de-los-circuitos-trifasicos>
- Parodi, C. (2015). Motores sin escobillas y tarjetas electrónicas de control de velocidad. *UVP*, 4. Recuperado el 22 de Febrero de 2018, de UVP.
- Prometec. (2019). *Prometec*. Obtenido de LO QUE HAY QUE SABER PARA ELEGIR UN EQUIPO TRANSMISOR / RECEPTOR DE RADIO PARA EL DRON: <https://www.prometec.net/elegir-transmisor-receptor-radio/>
- RC FANATIC. (2019). *¿Que es un BEC?* Obtenido de <https://rcfanatic.es/que-es-un-bec/>

Saber y ciencias. (02 de Febrero de 2013). *Saber y ciencias*. Obtenido de Mecatrónica: <http://saberesciencias.com.mx/2013/02/02/mecatronica/>

SOLAS Science & Engineering Co., Ltd. (s.f.). *SOLAS*. Obtenido de Fundamentos de la hélice: <https://acortar.link/7BvuhT>

Stumpp, J. (08 de Mayo de 2013). *Principios básicos de los motores de corriente continua*. Obtenido de Festo didactic: https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/571785_leseprobe_es_1.pdf

Toshiharu. (15 de Junio de 2015). *Diseño de un Vehículo Aéreo no Tripulado de cuatro rotores*. Recuperado el 22 de Enero de 2018, de PUCP: <https://acortar.link/lhOeHS>

UNAM. (26 de Marzo de 2016). *Definición de mecatrónica*. Obtenido de DIMEL: https://mecatronica.unam.mx/def_mecatronica.php

USGS. (s.f.). *USGS*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index>

Wingtra. (2020). *WingtraKnowledgebase*. Obtenido de <https://knowledge.wingtra.com/es/buenas-practicas-para-mantener-la-conexion-de-telemetria-durante-el-vuelo>

Yilmar, F. (17 de Febrero de 2017). *Diseño e implementación de un sistema de control de vuelo para un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadricóptero*. Obtenido de Tecnura: <https://acortar.link/j5T43X>