

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SATURACIÓN DEL HUMEDAL PUGLLOHUMA MEDIANTE EL USO DE UAVS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

GABRIELA ALEJANDRA ESPINEL ENRÍQUEZ

gabesp24@jcloud.com

Director: ING. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES, PhD.

esteban.valencia@epn.edu.ec

Codirector: ING. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS, PhD.

xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2019

DECLARACIÓN

Yo, Gabriela Alejandra Espinel Enríquez, declaro que el trabajo aquí presentado es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

GABRIELA ALEJANDRA ESPINEL ENRÍQUEZ

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el siguiente trabajo fue desarrollado por Gabriela Alejandra Espinel Enríquez, bajo nuestra supervisión.

Dr. Esteban Valencia Torres
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Xavier Zapata Ríos
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi madre, por ser mi quién me ha guiado, apoyado, cuidado y me ha brindado las herramientas para lograr mis objetivos, quien sin dudar ha estado para mí en mis logros y más aún en mis derrotas, por ser la mujer paciente, cariñosa y amorosa que es con toda su familia.

A mi tía Olga por ser mi segunda madre, quien ha sabido dar aliento a mí y a mi madre.

A cada miembro de mi familia por ser un ejemplo a seguir, cada uno enseñándome en diferentes etapas de mi vida y hasta el día de hoy me acogen con los brazos abiertos.

A mi primo Esteban por ser el cómplice y el mejor hermano mayor que pude tener, por las noches de desvelo, por los consejos, el aliento para lograr mis metas, por siempre decir que sí a cualquier locura y enseñarme que el más grande apoyo que puedo tener es mi familia.

A mis amigos Cristian, David, Lichita, Tamilu y Dianita, quienes en distintas maneras han sabido darme palabras de aliento, un abrazo o solamente su tiempo para escucharme, no solo en mi formación académica si no han compartido conmigo momentos inolvidables a lo largo de mi vida.

A los colegas del Centro de Investigación y Control Ambiental CICAM, quienes me acogieron durante mis pasantías, compartiendo conocimiento y con quienes viví una época inmemorable.

A todas las amistades que a lo largo de la carrera he conocido, con quienes a más de compartir horas de clase, llegaron a ser parte de mi vida.

Finalmente al grupo de investigación del Laboratorio de Simulación de Procesos quienes me acogieron y donde conocí a personas inigualables.

DEDICATORIA

¡A mi madre, por todo su sacrificio y amor!

A mi familia por ser el pilar que me sostiene y me guía.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
SIGLAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
PRESENTACIÓN	XIV
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	6

2.1	MARCO TEÓRICO	6
2.1.1	<i>HUMEDAL PUGLLOHUMA</i>	6
2.1.2	<i>VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS</i>	7
2.1.3	<i>Fotogrametría</i>	11
2.2	ESTADO DEL ARTE	12
2.2.1	<i>Eje de investigación</i>	12
2.2.2	<i>Documentos revisados</i>	12
2.2.3	<i>Principales hallazgos</i>	13
2.2.4	<i>Diagnóstico</i>	15
CAPÍTULO III.....		16
METODOLOGÍA.....		16
2.3	ESTUDIO PRELIMINAR.....	17
2.3.1	<i>Humedal Pugllohuma</i>	17
2.4	TRABAJO DE CAMPO	20
2.4.1	<i>Plan de vuelo</i>	20
2.4.2	<i>Nivel Freático</i>	25
2.5	TRABAJO DE GABINETE	27
2.5.1	<i>Procesamiento de imágenes con Agisoft photoscan</i>	27
2.5.2	<i>procesamiento con qgis</i>	29
2.5.3	<i>Mapas temáticos</i>	32
CAPÍTULO IV		34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		34
3.1	ORTOMOSAICO UAV	34
	39
3.2	INFORMACIÓN DE CAMPO	40
3.3	COMPARACIÓN IMÁGENES SATELITALES.....	42
3.4	DISCUSIÓN.....	43
CAPÍTULO V		47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		47
4.1	CONCLUSIONES.....	47

4.2 RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS	49
ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS UAVs DE ACUERDO CON LA CLASE DE ALIMENTACIÓN, Y SI ES MÁS LIGERO O MÁS PESADO QUE EL AIRE.....	8
TABLA 2. PROS Y CONTRAS DE LOS UAVs MÁS COMUNES.	8
TABLA 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	9
TABLA 4. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
TABLA 5. BITÁCORA DE VUELOS	23
TABLA 6. COORDENAS DE POZOS FREÁTICOS.....	26
TABLA 7. ESPECIFICACIONES DE LA ESTACIÓN DE TRABAJO.....	27
TABLA 8. DATOS DE CAMPO DE NIVEL FREÁTICO	40

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ENSAMBLAJE DEL DRON.....	10
FIGURA 2. PANEL DE CALIBRACIÓN, RECEPTOR GPS Y CÁMARA MULTIESPECTRAL	10
FIGURA 3. MARCO CONCEPTUAL DEL TRABAJO	16
FIGURA 4. RESERVA ECOLÓGICA ANTISANA.....	18
FIGURA 5. DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO DEL AÑO 2018	19
FIGURA 6. GENERACIÓN DEL POLÍGONO.....	20
FIGURA 7. BARRA DE ACCIONES.....	21
FIGURA 8. CREACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA CUADRICULA DE ESTUDIO.....	22
FIGURA 9. PLAN DE VUELO 1 Y 2	22
FIGURA 10. PANEL DE CALIBRACIÓN.....	23
FIGURA 11. UBICACIÓN POZOS DE NIVEL FREÁTICO.....	25
FIGURA 12. MEDICIÓN EN LOS POZOS DE NIVEL FREÁTICO	27
FIGURA 13. PÁGINA DE DESCARGA COPERNICUS OPEN ACCESS HUB.....	30
FIGURA 14. OPCIONES DE COMBINACIÓN QGIS.....	31
FIGURA 15. IMÁGEN SATELITAL	31
FIGURA 16. IMAGEN SATELITAL DELIMITADA CON EL HUMEDAL	32
FIGURA 17. DETALLES DE LA ZONA DE ESTUDIO	34
FIGURA 18. ORTOMOSAICO DEL HUMEDAL PUGLLOHUMA.....	35
FIGURA 19. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES	36
FIGURA 20. CURVAS DE NIVEL DEL HUMEDAL PUGLLOHUMA	37
FIGURA 21. MAPA DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE AGUA (NDWI).....	38
FIGURA 22. TURBIDEZ.....	39
FIGURA 23. INUNDACIÓN	39
FIGURA 24. MAPA PIEZOMÉTRICO CON DATOS DE CAMPO	41
FIGURA 25. COMPARACIÓN DE DATOS DE CAMPO CON ORTOMOSAICO DEL UAV	42
FIGURA 26. COMPARACIÓN DE LA RESOLUCIÓN CON IMÁGENES SATELITALES.....	43

SIGLAS

ACHA	Área de Conservación Hídrica Artesana
DAC	Dirección General de Aviación Civil
DEM	Digital Elevation Models (Modelo Digital del Terreno)
DSM	Digital Surface Model (Modelo Digital de Superficie)
EPMAPS	Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito
FONAG	Fondo para la Protección del Agua
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)
NDWI	Normalized Difference Water Index (Índice Diferencial de Agua Normalizado)
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
RGB	Red, Green, Blue
UAS	Unmanned Aircraft Systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

RESUMEN

El Ecuador es un país con riquezas naturales invaluableles y depende de ellos para la subsistencia de su población, especialmente en el recurso agua. Los humedales altoandinos se han ido degradando por la intervención humana, muchas ciudades andinas dependen por completo del agua de los páramos. Por ejemplo, Quito utiliza agua superficial para el 85% de su suministro ($7,4 \text{ m}^3/\text{s}$), exclusivamente del páramo, siendo el Área de Conservación Hidrica (ACHA) el aportante del 16% de este recurso. En este contexto el presente estudio desarrolla una metodología para la evaluación de saturación del humedal Puglllohuma con un vehículo aéreo no tripulado de ala fija. La metodología se basa en la toma de datos con el UAV, para ser procesados y comparados con imágenes satelitales y datos de campo. Recolectando imágenes RGB y multiespectrales para la generación de mapas en los cuales se identifique las características de la zona de estudio. Los resultados obtenidos corroboran la hipótesis de que los vehículos aéreos no tripulados de ala fija proporcionan imágenes de alta resolución, con un total de 2.950 imágenes a una resolución de 6cm/pixel a diferencia de las imágenes satelitales de 10m/pixel, que son útiles para el monitoreo de zonas alto andinas obteniendo un área total del humedal de 174.330 m^2 , con un área saturada de $86.168,49 \text{ m}^2$ y para la creación de mapas temáticos de la zona, como son el mapa de las zonas de inundación y el de turbidez. Así también se valida la metodología con datos adquiridos en campo, realizando un mapa esquemático superponiendo el mapa de inundación con el mapa piezométrico identificando que el 49,42% del humedal se encuentra saturado.

ABSTRACT

Ecuador is a country with an invaluable, natural resources, and dependent on them for the population subsistence, especially with the water resource. High Andean wetlands have been degrading a cause of the human activities, many Andean cities completely depend on the water that comes from the paramos. For example, Quito use 85% of surface water for his supply, who comes from the paramo and specifically 16% comes from the Area de Conservación Hidrica (ACHA). In this context, the present study develops a methodology which evaluate the saturation of the Pugllohuma wetland with a fixed wing unmanned aerial vehicle. The methodology is based on data collection with the UAV, to be processing and compared with satellite images and field data. Collecting RGB and multispectral images for generated maps where we can identify the area characteristics. The results obtained bear up the hypothesis that fixed wing unmanned aerial vehicles provide high resolution images, the camera took 2 950 images in total, with a ground resolution of 6cm per pixel, unlike the satellite images with 10 m per pixel, were used for the monitoring in the andean regions, a 174 300 m² study area at Pugllohuma wetland, with a saturated area of 86 168,49 m² and used for creating thematic maps, such as map of flood zones and turbidity. Thus, the methodology is also validated with field data, making a schematic map superimposing the flood map with the piezometric map identifying that 49.42% of the wetland is saturated.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo desarrolla una metodología que evalúa la saturación del Humedal Puglohuma, mediante la adquisición de imágenes con el uso de aeronaves no tripuladas comúnmente conocidas como drones, comparándolas con imágenes satelitales y datos obtenidos en campo. Además recopila información referente a los estudios que se han realizado sobre el monitoreo ambiental con UAVs

En el Capítulo I, se describe la introducción, objetivos, alcance y justificación de este trabajo de investigación.

En el Capítulo II, se presenta el marco teórico, en el cual se recopila información de la zona de estudio, información sobre los UAVs y fotogrametría. Además de representar el estado del arte donde se resume la información bibliográfica consultada acerca de este tema.

En el Capítulo III, abarca la metodología que se desarrolló empezando por el estudio de la zona piloto, el trabajo de campo y finalmente el trabajo de gabinete realizado, todo esto de manera secuencial para el cumplimiento de los objetivos.

En el Capítulo IV, se expone los resultados obtenidos y la discusión de los mismos. De los que se puede resaltar la utilidad de los drones para el monitoreo a grandes alturas. También se encuentra la comparación con datos de campo y con imágenes satelitales de libre acceso.

Finalmente el Capítulo V muestra conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron luego del desarrollo del presente trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La implementación de los vehículos aéreos no tripulados UAV (**U**n**m**anned **A**erial **V**ehicle), por sus siglas en inglés, en el área civil se han ido desarrollando mediante el empleo de la teledetección de alta resolución, que supera las barreras de la teledetección actual en cuanto a la resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes obtenidas mediante herramientas satelitales. Hoy en día las aplicaciones civiles de los UAVs son: mediciones atmosféricas, evaluación de daños, agricultura, mapeo y cartografía.

De manera general existen dos tipos de UAVs: de ala fija y de ala rotatoria. La selección de ésta dependerá del objetivo buscado. Varios autores tienen su propia clasificación en función del tamaño, carga útil, entre otras, una de las maneras de selección en base a esta clasificación es: la superficie a estudiar, la resolución espacial requerida y las condiciones para el despegue y el aterrizaje en la zona (Boon et al., 2017).

El aspecto más importante que ha permitido que los UAVs sean plataformas útiles en los ámbitos antes mencionados, es la evolución de la microelectrónica y la miniaturización de los elementos que integran la aeronave como los sensores utilizados, lo que ha contribuido con el desarrollo de vehículos aéreos más pequeños y sencillos de operar. Actualmente se han perfeccionado sensores multispectrales que se pueden embarcar en el dron, los cuales pueden llegar a tener hasta 6 bandas espectrales (Samiappan et al., 2017) . Por lo general estos sensores están diseñados para los estudios referentes a la vegetación.

La fotogrametría de UAV describe una plataforma que opera de forma semiautónoma o autónoma, dicha plataforma se encuentra equipada con un sistema de medición fotogramétrico, que incluye, entre otros, una cámara de video pequeño o mediano, sistemas de cámara térmica o infrarroja, o una combinación de ellos. Los UAV estándar actuales permiten el registro y seguimiento de la posición y orientación de los sensores implementados en un sistema de coordenadas local o global (Eisenbeiss, 2009).

Como resultado de la fotogrametría tenemos productos cartográficos como los modelos digitales de superficie y los ortomosaicos georreferenciados. El modelo digital de superficie DSM (por sus siglas en inglés) representa la información de altura de la superficie de la Tierra asociada a un sistema de referencia global, de todos los elementos registrados por el UAV (alturas de edificaciones, vegetación y demás objetos presentes en la superficie), de este se puede obtener el Modelo Digital de Elevaciones. Por otro lado, los ortomosaicos son el conjunto de imágenes traslapadas tomadas desde una o varias cámaras, que son unidas para tener una visión amplia de la escena y se encuentran corregidos de las distorsiones que pudiese tener el terreno y los objetos en él (Escalante et al., 2016).

Para la obtención de lo antes mencionado el procesamiento de las imágenes obtenidas se enmarca en tres etapas principales: primera, la triangulación del bloque fotogramétrico para lo cual se basa en la técnica de estructura del movimiento (SfM) donde se extrae características en imágenes individuales que se pueden combinar con sus características correspondientes en otras imágenes del vuelo del UAV y el resultado es la determinación de la posición y orientación para cada ubicación individual del sensor; segunda, la reconstrucción 3D del lugar a partir de la extracción de una nube de puntos, y tercera, la generación del Modelo Digital de Superficie y la ortorrectificación de las imágenes (Mesas et al., 2015)

Ya en el año de 1983, se menciona las aplicaciones que los UAV podrían tener en el ámbito ambiental (Hardin y Hardin, 2010). Con el pasar del tiempo y con el desarrollo tecnológico el uso de estas plataformas en el monitoreo ambiental ha ido desarrollándose, los vuelos rápidos y a bajo costo permiten el monitoreo de la tierra y el agua en varias épocas del año, así como el mapeo de catastros, monitoreo de la minería, del comportamiento de la vida salvaje, análisis geológicos, monitoreo de volcanes y humedales entre otros (Nex y Remondino, 2014).

El monitoreo de los humedales se ha vuelto un desafío debido a las grandes extensiones que poseen y a la interfaz de estos entre entornos terrestres y acuáticos hace que sea difícil examinar y comprender estos ecosistemas. Al ver que estos lugares son el hábitat de vida silvestre, además de regular la circulación de dióxido de carbono o metano, se ha vuelto imperativo su monitoreo frecuente (Kato et al., 2001). Pero gracias al desarrollo de los drones, esta tarea se ha ido simplificando, aunque aún está en crecimiento. Una de las principales actividades a realizarse es el monitoreo de la vegetación. Mediante el uso de

cámaras multiespectrales se puede clasificar a escala comunidades la vegetación, además se las usa principalmente para la obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) por sus siglas en inglés, entre otros.

La mayoría de los monitoreos realizados a los humedales han sido a nivel del mar, el desafío de esta investigación se denota en el monitoreo en zonas de alta montaña, debido a lo antes mencionado los humedales almacenan una parte significativa de la reserva global de carbono (C) del suelo. Sin embargo, los humedales de alta montaña contienen extensos suelos que aún no se han mapeado o incluido en las estimaciones globales de C. Esta falta de información retrasa, e incluso anula la capacidad de realizar políticas gubernamentales y aplicar prácticas de manejo sostenible, ya que los humedales están experimentando altas tasas de cambio en el uso y la cobertura del suelo. Es necesario una técnica rápida de mapeo a gran escala para cuantificar la extensión y la tasa de degradación de los humedales tropicales (Hribljan et al., 2017).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la aplicabilidad de UAV como herramienta de monitoreo en la zona piloto del Humedal Pugllohuma.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener un perfil microtopográfico de la zona, mediante el sobrevuelo del UAV en el humedal Pugllohuma.
- Desarrollar una metodología que correlacione los datos adquiridos para la realización de un mapa temático de la zona.
- Validar una metodología, mediante la comparación de los resultados obtenidos con imágenes satelitales y mediciones in situ.

1.3 ALCANCE

En el presente trabajo, se estudia la aplicabilidad de un vehículo aéreo no tripulado de ala fija como herramienta de monitoreo en el Humedal Pugllohuma, con el fin de demostrar que dichos equipos son útiles para el levantamiento microtopográfico y monitoreo de humedales

altoandinos. Con el fin de aportar con un nuevo método para el monitoreo continuo de zonas estratégicas.

De esta manera los resultados de esta investigación proporcionarán una guía en cuanto al monitoreo de zonas altoandinas con drones, lo que permitiría realizar monitoreos continuos de las zonas en proceso de regeneración, así como el aporte de información a plataformas digitales.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se justifica teóricamente ya que la degradación de los humedales altoandinos se genera por distintas causas como la actividad ganadera bajo un régimen de pastoreo intensivo (FONAG, 2016). Esto ha motivado a realizar intervenciones tanto nacionales como internacionales para gestionar y recuperar estas zonas. Es así que se crea la Convención sobre los humedales Ramsar en 1971 (Ramsar, 2010).

La dificultad para efectuar un monitoreo periódico de los ecosistemas mencionados, en conjunto con la carencia de un procedimiento para la gestión de los recursos hídricos del país, ha fomentado el desarrollo de una metodología de monitoreo de humedales mediante el empleo de UAVs, con el fin de innovar tecnológicamente la gestión de los recursos hídricos en el país.

En cuanto a la metodología sabemos que la utilización de UAVs ha demostrado tener gran acogida en otras industrias como: minería, aplicaciones ecológicas y otros retos como lo son los ríos. Además, dependiendo de la instrumentación, estos dispositivos traen consigo la reducción de costos operativos mediante la disminución del tiempo de adquisición de datos relevantes para estudios ambientales (Boon et al., 2016).

Las aplicaciones de los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) tanto en bosques, humedales y en la ecología son de gran importancia, ya que sirven para la clasificación de la vegetación, especiación y determinación de especies invasoras, de igual manera podemos producir inventarios y monitoreos de los cambios a lo largo del tiempo. La identificación de la contaminación a través de imágenes multispectrales, así como el mapeo de vegetación acuática sumergida y flotante, batimetría e inventarios de especies de plantas de humedales son algunos servicios de los UAS en el monitoreo de cuencas (Gundlach, 2016).

De forma práctica es justificable ya que se espera contribuir con una alternativa innovadora, para la tecnificación del monitoreo de zonas altoandinas (Humedal Pugllohuma) durante su fase de restauración, debido a que de esta zona se abastece el sistema la Mica que contribuye con 16 % del agua destinada a la población del sur de la ciudad de Quito (EMAAP-Q, 2011) y además de aportar conocimiento al estado del arte sobre el uso de UAVs en el monitoreo de sistemas hídricos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 HUMEDAL PUGLLOHUMA

El Humedal Pugllohuma, ubicado en la Hacienda Contadero, la cual pertenece a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), quien se encarga de su gestión y conservación (FONAG, 2016), de esta zona se abastece el sistema la Mica que contribuye con 16 % del agua destinada a la población del sur de la ciudad de Quito (EMAAP-Q, 2011). Antes de que sea adquirida por EPMAPS, en el humedal se realizaron acequias o drenes por los dueños anteriores, esto para que las ovejas que habitaban el lugar no se enfermasen por el agua acumulada.

El Humedal Pughllohuma durante varios años fue la cuna de pastoreo intensivo, aproximadamente de unas 6000 cabezas de ganado y 22000 ovejas. La hacienda fue adquirida por EPMAPS en el 2011, con un total de 7549,5 hectáreas, lo que representa aproximadamente el 60% de la superficie de la cuenca aportante al embalse de la Mica (FONAG, 2016).

Ahora EPMAPS juntamente con FONAG realizan investigación para recuperar las cualidades hidrofísicas del suelo a través de la mejora de la cobertura vegetal. El objetivo es que el agua infiltre lentamente y en la época seca el suelo tenga una saturación mayor y el caudal del río aumente, con el fin de que la regulación hídrica en la época seca se intensifique.

La restauración se da en casos, donde la alteración es tan alta que llega al punto de que el ecosistema no puede continuar con el proceso de natural de auto-regeneración, que es lo sucedido con el Humedal Pugllohuma. Para ello el proceso de restauración del humedal en cuestión inició con la revisión de las bases de datos desde el 2016 para monitorear su

avance, donde se han colocado 18 pozos de monitoreo del nivel freático a lo largo del humedal, y se han taponado las corridas más extensas dentro del mismo. Un indicador de que la zona está en proceso de restauración es la presencia de vida silvestre como son familias de venados, conejos y lobos en la zona.

2.1.2 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

Los vehículos aéros no tripulados, por sus siglas en inglés UAV, son dispositivos controlados a distancia capaces de recolectar información en áreas de difícil acceso disminuyendo la perturbación al ecosistema (Palomera et al., 2012). También se han adoptado otros nombres como: Drone, Aviones de Sistema Remoto (ASR), Sistema de vehículo no tripulado UVAs.

Las aplicaciones de estos instrumentos en el área civil son: monitoreo de la tierra y teledecepción, la agricultura y la seguridad pública. Sin embargo, el desarrollo tecnológico de las aeronaves no tripuladas, ha permitido su incursión en el monitoreo ambiental en cuanto a meteorología y control de la contaminación atmosférica, control hidrogeológico y geofísico, y monitoreo de áreas afectadas por desastres naturales o contaminación (Bendea et al., 2008).

2.1.2.1 Clasificación de los UAV

La clasificación de los vehículos aéros no tripulados engloba: los vehículos aéros no tripulados (UAV) de alas fijas y rotativas, vehículos aéros no tripulados más ligeros que el aire, vehículos aéros letales, señuelos y objetivos, aeronaves pilotadas alternativamente y vehículos aéros de combate deshabitados, esta clasificación la determinará el autor de cada trabajo debido a que su criterio dependerá de la aplicación que se le da a esta herramienta. Podemos observar en la Tabla 1 una clasificación de las aeronaves para aplicaciones fotogramétricas. Cabe mencionar que hoy en día se ha desarrollado un dispositivo híbrido que combina las ventajas que envuelve a los multirrotores con un ala fija. Esta combinación da como fruto un dispositivo de despegue y aterrizaje vertical, por sus siglas en inglés VTOL, está orientado principalmente a la industria agrícola, energética y de transporte (Montero, 2016).

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS UAVS DE ACUERDO CON LA CLASE DE ALIMENTACIÓN, Y SI ES MÁS LIGERO O MÁS PESADO QUE EL AIRE.

	Más ligeros que el aire	Más pesados que el aire		
		<u>Ala flexible</u>	<u>Ala fija</u>	<u>Ala rotatoria</u>
No motorizado	Globos	Ala delta	Planeadores	Cometa de rotor
		Parapente		
		Cometas		
Motorizado	Dirigible	Parapente	Hélices	Rotores simples
			Motores a reacción	Coaxial
				Cuadrópteros
				Multirotores

Fuente: Eisenbeiss, 2009

De la clasificación anterior podemos realizar una simplificación de acuerdo a los pros y contras que los UAVs más comunes, teniendo en cuenta: la distancia de vuelo resistencia, clima y dependencia del viento y maniobrabilidad (Tabla 2).

TABLA 2. PROS Y CONTRAS DE LOS UAVS MÁS COMUNES.

Tipo de aeronave	Distancia de vuelo	Resistencia	Clima y dependencia del viento	Maniobrabilidad
Planeadores de alas fijas	++	+	+	+
Motores de hélice y reacción	++	++	+	+
Rotor simple (helicóptero)	+	+	+	++
Coaxial	+	++	+	++
Cuadrópteros	0	0	0	++
Multicópteros	+	+	+	++

- 0: Valor más bajo
- +: Valor medio
- ++: Mejor

Fuente: Eisenbeiss, 2009

Los drones de multirrotor pueden operar cerca de su objetivo y tienen mayor flexibilidad al momento de maniobrarlos. Por otro lado, los UAV de ala fija tienen muy buena resistencia de vuelo y son capaces de cubrir grandes áreas en un vuelo, requiriendo experticia por parte del piloto y una amplia área de aterrizaje para evitar daño a la aeronave y los sensores. La capacidad de los UAV de ala fija de volar a baja altura con los sensores adecuados brinda la oportunidad de completar las mediciones realizadas en campo a escala, en una resolución espacial fina y, por lo tanto, hacerlas herramientas ideales para el mapeo ambiental.

Por tal razón se ha elegido un dron de ala fija (Figura 1) para el monitoreo del Humedal Pugllahoma teniendo las siguientes características:

TABLA 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

	Tipo	Ala fija
Hardware	<i>Dimensiones [cm]</i>	190*130
	<i>Envergadura [cm]</i>	190
	<i>Peso [kg]</i>	2.5
	<i>Material</i>	Espuma de poliolefina expandida de alto rendimiento (EPO)
	<i>Tipo de batería</i>	Li-Po
	Operación	<i>Autonomía [min]</i>
<i>Alcance [km]</i>		58
<i>Velocidad crucero [m/s]</i>		12
<i>Carga máxima [g]</i>		500 g
<i>Velocidad de viento [km/h]</i>		43.2
Comunicación	<i>Distancia de control [km]</i>	5
	<i>Controlador de vuelo</i>	Pixhawk 2.1
	<i>Sistema de procesamiento</i>	PPK
Adicionales	<i>Tipo de despegue</i>	Manual
	<i>Tipo de aterrizaje</i>	Paracaídas

Fuente: EVENT38, 2019



Figura 1. Ensamblaje del dron

Elaboración: propia

La aeronave no tripulada escogida, tiene como ventajas el control autónomo, la misión se planifica previamente delimitando el área de estudio, datos de vuelo en tiempo real: altitud, velocidad, dirección, nivel de batería y su ubicación en un mapa, diseñada para transportar una variedad de sensores, como cámaras de luz visible, multiespectrales. La cámara MicaSense RedEdge (Figura 2), es una cámara multiespectral, que capta simultáneamente 5 bandas espectrales: roja, verde, azul, rojo cercano, e infrarrojo cercano.



Figura 2. Panel de calibración, Receptor GPS y Cámara multiespectral

Elaboración: propia

En cuanto a la normativa del uso de sistemas de aeronaves no tripuladas en el Ecuador, la Dirección General de Aviación Civil (DAC) en post de salvaguardar la seguridad operacional de las actividades aéreas, usuarios del transporte aéreo y público en general, emite la Resolución N° 251, en el cual se disponen la normativa para la operación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPDAS) o conocidas como Drones o Sistemas de Aeronaves no tripuladas (UAS) (ANEXO 1).

2.1.3 FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría defina por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección es “el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”. Dicha disciplina creada en 1840 ha ido evolucionando con el transcurso de los años, utilizando ahora plataformas más avanzadas y adoptándose a las diferentes aplicaciones entre las que se destaca geodesia, cartografías y topografía.

Existen de igual manera varias formas de clasificación, la fotogrametría dependiendo de la distancia de enfoque puede ser satelital, aérea y terrestre. La satelital enfocada principalmente a la cartografía y las dos restantes en las áreas de la arquitectura e ingeniería. Así como también se la clasifica por el medio empleado, donde encontramos la fotogrametría analógica donde se determina un objeto en el espacio utilizando fotografías aéreas formando modelos estereoscópicos, reconstruyendo el modelo espacial con sistemas ópticos o mecánicos. Por otro lado en la fotogrametría analítica la toma de datos es manual, pero aplica modelos informáticos para el cálculo del modelo final. Por último, la fotogrametría digital que surge gracias a los avances informáticos que permiten la transmisión directa de las imágenes a las computadoras para su posterior procesamiento (Ruiz et al., 2015).

La adquisición de información en los estudios fotogramétricos se lo realiza a través de fotografía digital y gracias al desarrollo de la tecnológico se puede emplear también sensores remotos como cámaras multispectrales, que en conjunto con sistemas de posición global y su respectivo procesamiento, da como resultado diversos productos como modelos digitales de elevación, ortomosaicos y parámetros relativos para el estudio de la vegetación.

2.2 ESTADO DEL ARTE

2.2.1 EJE DE INVESTIGACIÓN

Una vez realizado el trabajo de recopilación bibliográfica de la literatura científica existente, es posible mencionar que el monitoreo de humedales con vehículos aéreos no tripulados es un campo inexplorado en nuestro país. Sin embargo los estudios que se han realizado se encuentran en desarrollo, y en su mayoría no presentan retos significativos en cuanto a las condiciones climáticas. En gran medida el monitoreo de humedales en el mundo se está dedicando al estudio de la vegetación que estos poseen, más no al estudio hidrológico, ni a su conservación.

Denotando que el desarrollo tecnológico en el uso de drones se encuentra en auge, en el país aún no se interesan en innovar su tecnología y realizar con mayor facilidad los monitoreos, considerando que estos deben ser periódicos.

2.2.2 DOCUMENTOS REVISADOS

En la Tabla 4 se presenta la recopilación bibliográfica, referente al tópico que el presente trabajo intenta ampliar y sobre las cuales se fundamenta.

TABLA 4. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tipo de trabajo	Número	Ámbito	Año de publicación
Artículos Científicos	31	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de vehículos aéreos no tripulados para monitoreo de humedales. - UAV fotogrametría. - Vehículos pilotados remotamente a pequeña escala en investigación ambiental. - Uso de imágenes multiespectrales en cultivos. - Comparación de drones de ala fija y multicopteros para estudios ambientales. 	1996-2018

		<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de fauna y flora con UAVs - Índices usados en humedales. - Teledetección ambiental de alta resolución con UAV. 	
Documentos Gubernamentales	2	<ul style="list-style-type: none"> - Conservación de humedales - Operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) 	2010-2016
Folletos Informativos	3	<ul style="list-style-type: none"> - Manejo del agua en Quito - Diseño de monitoreo del humedal Puglllohuma. - Humedales altoandinos. 	2001-2015
Libros	2	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño de sistemas de aeronaves no tripuladas. - Restauración ecológica de los páramos de Jatunhuaycu 	2012-2014
Manuales	9	<ul style="list-style-type: none"> - Uso racional de los humedales - Productos Sentinel-2 - Guía para la restauración de los Páramos del Antisana. - Event dron de ala fija - Cámara multiespectral 	2010-2019
Tesis	2	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización hidrogeológica vertientes del volcan Antisana - Fotogrametría con UAVs 	2009

Elaboración: propia

2.2.3 PRINCIPALES HALLAZGOS

A lo largo del tiempo se han ido implementando diferentes tipos de vehículos aéreos no tripulados en distintas áreas de la ingeniería, en la ingeniería civil se los usa para el levantamiento topográfico de terrenos tanto abiertos como de difícil acceso, de igual manera se los usa para la modelación 3D de estructuras de gran altura. Si bien en su mayoría los drones tipo multicópteros son los más comerciales, fáciles de adquirir y sencillos de

maniobrar, tienen limitaciones en cuanto al tiempo y distancia de vuelo, por el contrario, aquellos tipo avión o de ala fija se aplican con mayor frecuencia en el monitoreo de biodiversidad, siendo más caros y complicados de volar (Mandujano et al., 2017).

En cuanto al monitoreo de humedales existen estudios enfocados al levantamiento de información de la vegetación, utilizando tanto multicópteros como los de tipo avión. Especialmente para el monitoreo de grandes extensiones de terreno se emplea drones de ala fija conjuntamente con cámaras multiespectrales.

Uno de los trabajos realizados con un UAV multirrotor, se lo llevo a cabo en Sudáfrica en la provincia de Gauteng, el cual tuvo por objetivo obtener ortofotos de alta resolución y un modelo de la superficie del mapeo de un humedal. Los resultados adquiridos superaron las expectativas de los investigadores ya que consiguieron mapas precisos, rápidos y valiosos del humedal que se han usado para su estudio, apoyando y mejorando la toma de decisiones (Boon et al., 2016).

Boon y Tesfamichael (2017) realizan el sobrevuelo de un humedal en Sudáfrica, trabajando con un UAV de la fija JAG-M y una cámara multiespectral MicaScene RedEdge, igual a la que se usará en este trabajo. El resultado obtenido fue un mapeo preciso y refinado que les ayudo a mejorar la evaluación integral de la vegetación. Como un aporte comprobaron cual era el mejor procesador de imágenes entre ATLAS, Pix4D y Agisoft PhotoScan, siendo este último el de mayor confiabilidad.

En la Universidad de Nebraska llevaron a cabo el monitoreo de las cuencas hidrográficas central sur de Nebraska, utilizando un cuadriptero Dji Phantom 4Pro y un ala fija Firefly6, con diferentes cargas útiles entre ellas una cámara multiespectral MicaScene RedEdge-M, ArcGis y el procesador de imágenes Pix4D. Practicando varios sobrevuelos, realizados en varios meses, obtuvieron monitoreo de vida salvaje, el promedio del volumen de biomasa y la variación de la inundación del humedal además de una modelación 3D del lugar y un mapa de la zona. Obteniendo los siguientes resultados: de febrero a marzo el volumen de inundación es más variable, la altitud de vuelo es crucial para el monitoreo de la vida silvestre y el volumen promedio de biomasa varía de agosto a octubre gradualmente (Hu et al., 2018).

Una investigación similar se realizó en los humedales de las costas del Golfo de México, en donde se usó Precision Hawk Lancaster UAV y al igual que el estudio anterior la cámara

multiespectral utilizada es la Mica Scene RedEdge, este estudio se lo realizó con los objetivos de estudiar la efectividad de la cámara para el mapeo de una planta invasiva, estudiar el impacto de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI), así como validar la precisión del mapeo. El sistema propuesto ayudó a producir un mapa geoetiquetado preciso de la planta invasiva para ayudar en los esfuerzos de control, gestión y erradicación de la misma, así como el uso de índices basados en la clasificación de los píxeles en las imágenes adquiridas (Samiappan et al., 2017).

2.2.4 DIAGNÓSTICO

El uso de imágenes adquiridas con UAVs para el monitoreo ambiental está enfocado principalmente en el monitoreo de vegetación, de la caracterización y estado de la flora de los lugares, así como también se encuentran documentos relacionados con el monitoreo de fauna. Interesantes artículos como el de Campos et al. (2012), en donde emplea el índice normalizado de agua para la detección de agua permanente y estacional en África donde la nubosidad es baja, mediante el apoyo de imágenes satelitales han sido desarrollados. Así también es importante el análisis comparativo de los drones de ala fija y los multicopteros para determinar cuál de ellos es óptimo para el monitoreo ambiental. Cabe mencionar que todos los monitoreos en humedales se han realizado en zonas costeras donde tanto la nubosidad, la precipitación y la altura no son un factor determinante.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

A continuación se muestra a detalle el proceso llevado a cabo para el cumplimiento de los objetivos propuestos (Figura 3).

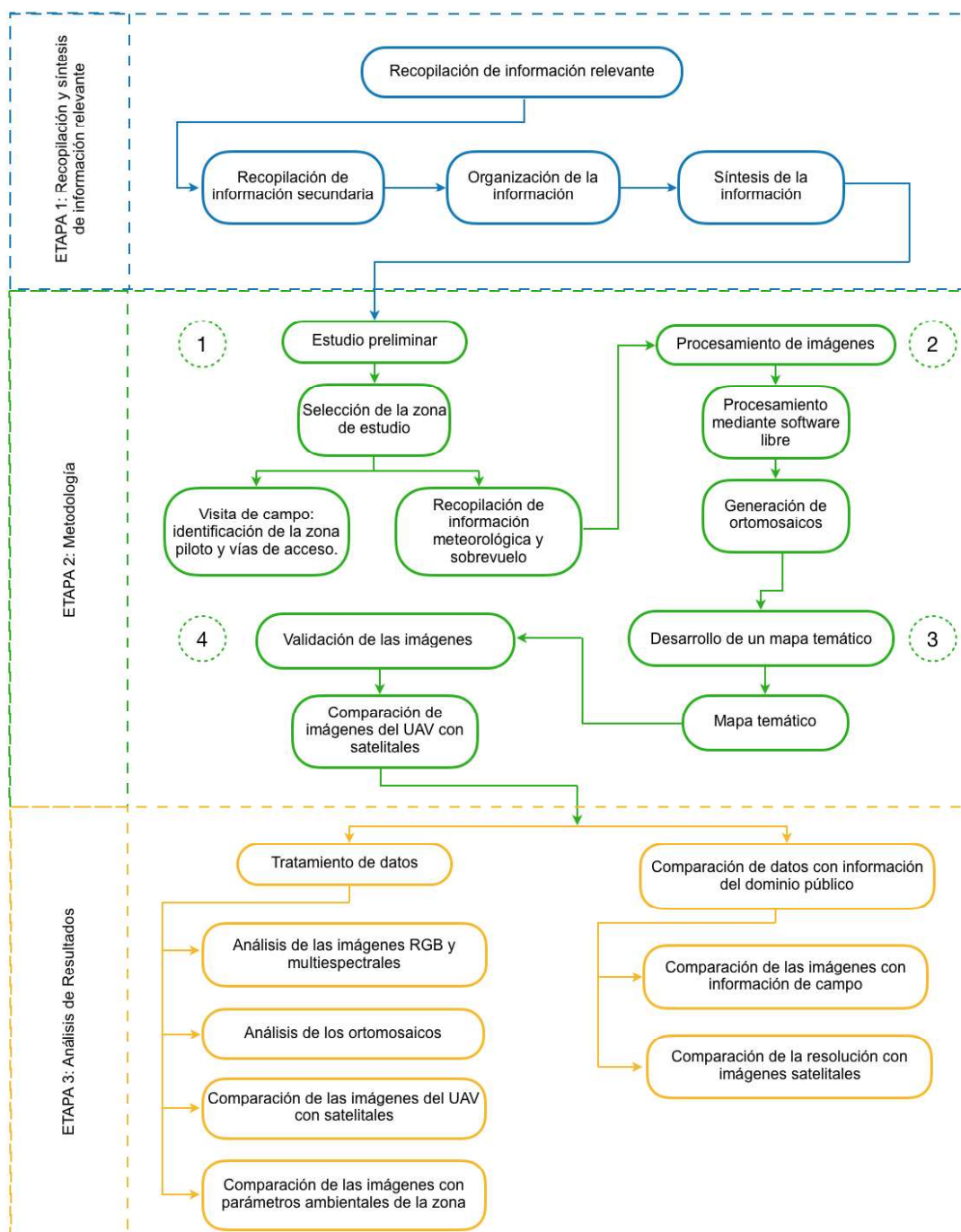


Figura 3. Marco conceptual del trabajo

Elaboración: propia

2.3 ESTUDIO PRELIMINAR

El estudio de los páramos ecuatorianos mediante la herramienta propuesta requería de una cantidad significativa de recursos. En consecuencia, para el presente trabajo se ha considerado adecuado, seleccionar una zona piloto. Identificada gracias al apoyo del Fondo para la Protección del Agua (FONAG), quienes se encuentran a cargo del monitoreo del lugar. Dicha área se ha visto afectada por el pastoreo intensivo, que ha ido degradando el suelo provocando el deterioro del humedal.

Como primera fase de la metodología, se realizó una visita preliminar para la identificación de las vías de acceso a la zona, localizar los pozos de nivel freático, por último, verificar posibles obstáculos tanto naturales como artificiales que se puedan presentar como: árboles o antenas. Es importante identificar el área que será destinada para el despegue de la aeronave, así como para el aterrizaje, como se mencionaba con anterioridad por ser un dron de ala fija necesita un área considerable para ambas maniobras.

2.3.1 HUMEDAL PUGLLOHUMA

Ubicado en la vertiente oeste del volcán Antisana, en la provincia del Napo sobre la cordillera Oriental, aproximadamente a unos 50 km de la ciudad de Quito (Figura 4). Perteneciente al Área de Conservación Hídrica (ACHA), el humedal Pugllohuma a 4115 msnm, tiene una extensión de 14.2 ha y fue seleccionado como zona piloto para desarrollar una metodología que permita tener un monitoreo continuo del proceso natural de restauración.



Figura 4. Reserva Ecológica Antisana

Elaboración: propia

El clima en la zona de estudio es de tipo húmedo y muy húmedo, representado por una alta humedad relativa casi siempre superior a 90% con variaciones apreciables en el transcurso del día y una variación poco significativa de la humedad relativa media mensual a lo largo del año. La temperatura media fluctúa alrededor de los 8°C, en pocas ocasiones sobrepasan los 20°C y sus valores mínimos generalmente son valores de 0°C. Los totales de lluvia anual son irregulares, oscilan alrededor de los 1.600 mm., las precipitaciones son generalmente de larga duración con débiles intensidades (Aguirre y Torres, 2014). FONAG, para llevar a cabo el monitoreo continuo del humedal coloca 18 pozos de monitoreo de nivel freático de los cuales se adquiere información de campo sobre la saturación del humedal y calidad del agua.

Con información proporcionada por INAMHI de la estación Meteorológica Automática Jatunhuayco M5126, tomada como base al ser la más cercana al lugar de estudio. Se obtiene datos de dirección y velocidad promedio del viento para el año 2018 (Figura 5) graficados en el programa Wind Rose Plots (WRPLOT); parámetro necesario para los sobrevuelos. Se observa que el valor mínimo de velocidad de viento es de 0,5 m/s y el máximo de 11,10 m/s, y que su dirección por lo general del este.

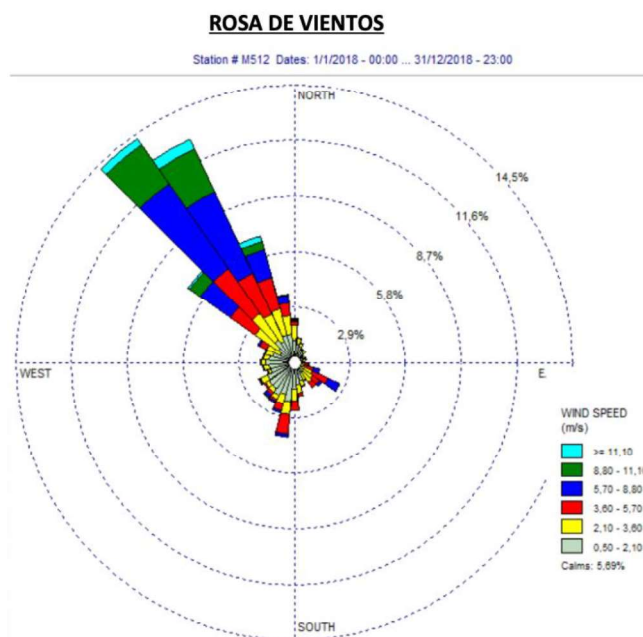


Figura 5. Dirección y velocidad del viento promedio del año 2018

Fuente: INAMHI, 2018

Elaboración: propia

Con respecto a la precipitación, la estación húmeda está entre los meses de abril y junio, con precipitaciones medias mensuales superiores a 70 mm y un pico de 200 mm en junio; por otra parte la época seca aparece en los meses de enero, febrero y septiembre con valores menores a 40 mm (Soria, 2016). El monitoreo de UAV debe llevarse a cabo durante la estación seca para obtener resultados confiables y no poner en peligro el equipo adquirido, ya que en los periodos de lluvias la nubosidad es un problema para el sobrevuelo.

2.4 TRABAJO DE CAMPO

Una vez que se ha analizado la zona de estudio, se debe desarrollar la planificación de las visitas para los sobrevuelos, empezando por la ubicación de la estación terrena, la cual debe colocarse lo más cerca posible de la zona de estudio, previamente se realiza el plan de vuelo, y en el lugar se debe modificar de acuerdo a los parámetros climatológicos, y finalmente luego de realizado el vuelo se levanta los datos de los pozos de nivel freático.

2.4.1 PLAN DE VUELO

Una vez identificados los pozos se procede a elaborar el plan de vuelo, en campo, porque en ese instante se necesita colocar datos de la dirección y velocidad del viento en tiempo real, aun cuando se verifique dichos datos con anterioridad. Como en la zona piloto no hay presencia de torres de celular para dar cobertura de datos ni voz, antes de llegar al lugar se utiliza la herramienta Windy (<https://www.windy.com/-0.592/-78.042?-1.218,-78.042,8>) que proporciona datos meteorológicos en tiempo real y su acceso es libre.

El plan de vuelo, será establecido en el programa Mission Planner 1.3.48 for Event 38 instalado previamente en la estación terrena. Este programa nos permite observar una vista satelital de GoogleHybridMap de la zona en la cual se delimitó el humedal (Figura 6).

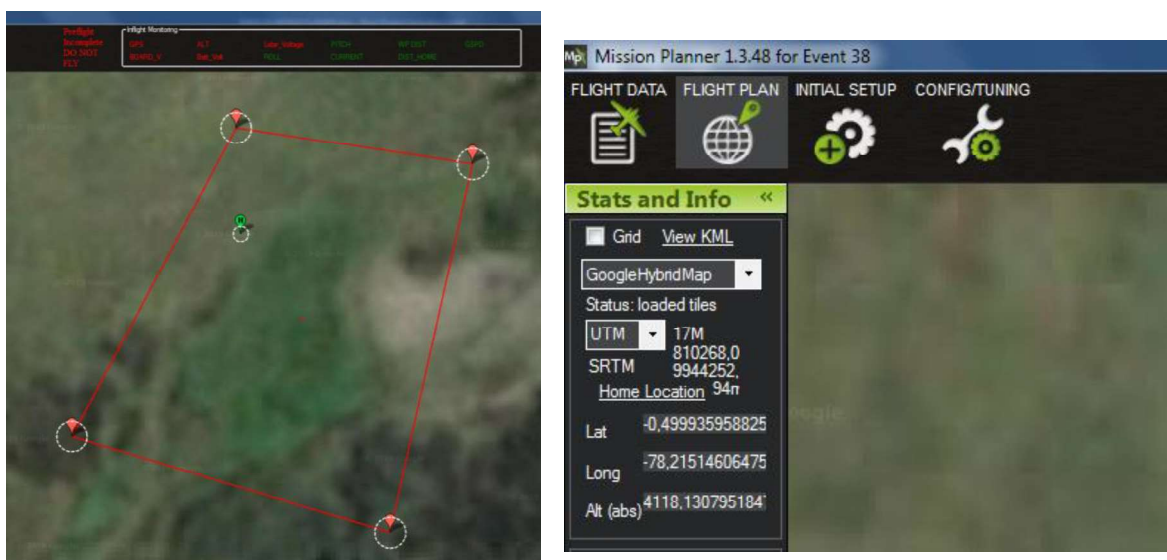


Figura 6. Generación del polígono

En el Misión Planner proporcionado por la empresa Event38, se ingresa en la parte superior izquierda en FLIGHT PLAN, luego en el menú derecho en POLYGON OPTIONS en ADD (Figura 6) se dibuja los puntos necesarios para abarcar la zona de estudio, teniendo en consideración, que por el tamaño del dron y las condiciones de viento de la zona, el dron debe realizar giros con radios de curvatura significativos respecto a las distancias entre las rutas de vuelo para seguir la trayectoria, además que el polígono debe estar dibujado por lo menos a 100 m a la redonda de la zona de estudio.

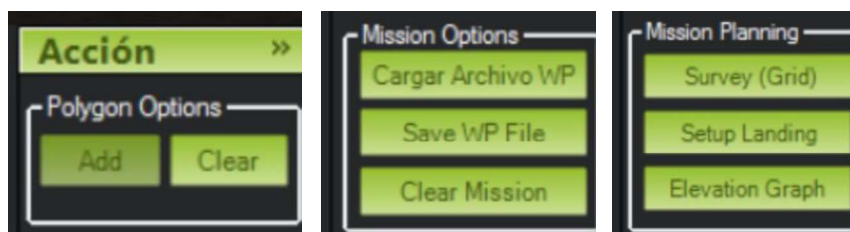


Figura 7. Barra de acciones

Seguido en Mission Planning seleccionamos la opción de *SURVEY (GRID)*, Figura 7, se desprenderá la siguiente pantalla (Figura 8), en el cual se debe seleccionar el tipo de cámara que se utilizará para el sobrevuelo, la altitud en metros (mínimo de 80 m y máximo de 120 m), el ángulo de la trayectoria de vuelo, que dependerá de la dirección del viento puesto que la trayectoria del dron siempre debe ser perpendicular a la dirección del viento, (en el caso de estudio el viento tiene dirección este), se configura el punto de inicio de manera que este lo más alejado del lugar de despeje, de tal forma que el dron tenga el espacio suficiente para alcanzar la altura de vuelo. Por último, se configurará *OVERLAP* y *SIDELAP*, es recomendado que se encuentren en un 80% y 60% respectivamente, ya que de estos dependerá la sobreposición de las imágenes para su reconstrucción.

Como se observa en la Figura 8 en la parte inferior podemos verificar el estado aproximado del vuelo como: el área cubierta, la distancia recorrida, el número de imágenes, la resolución del suelo y tiempo aproximado de vuelo.

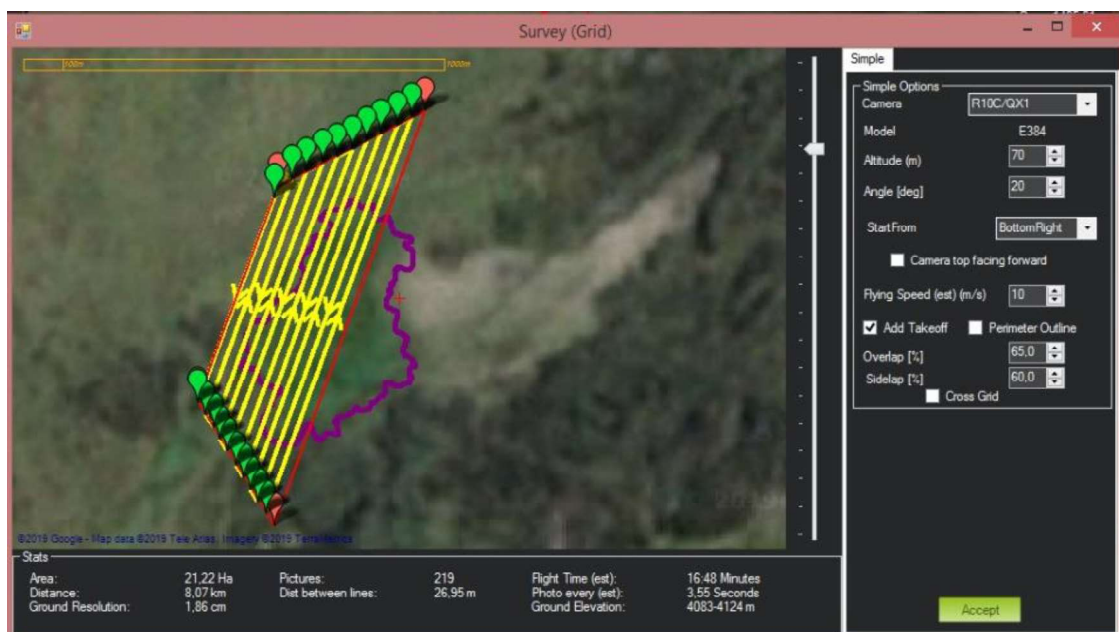


Figura 8. Creación y configuración de la cuadrícula de estudio

Como medida de seguridad el plan de vuelo se divide en dos, para asegurar que la batería del dron no se consuma en su totalidad durante el sobrevuelo y el UAV pueda regresar sin ningún inconveniente a tierra.

Luego de planificar las partes del sobrevuelo (Figura 9), con los pasos anteriormente mencionados, se procede a colocar el lugar de aterrizaje, tomando en cuenta que el UAV debe aterrizar en contra del viento, con la opción SETUP LANDING. Para finalizar se guarda la misión con SAVE WP FILE.

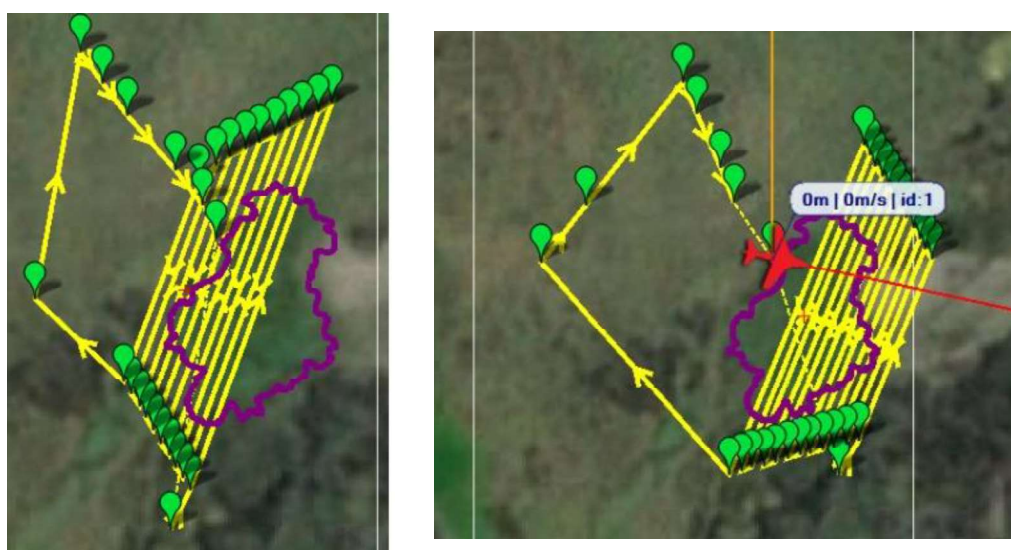


Figura 9. Plan de vuelo 1 y 2

Una vez realizado el plan de vuelo, se procede a realizar la calibración radiométrica de la cámara multispectral, con el panel de reflectancia proporcionado por la empresa EVENT (Figura 10). El acceso a la calibración se lo realiza mediante un dispositivo móvil, ya que la cámara se conecta mediante Wifi, se abre un navegador y se coloca "192.168.10.254" en donde se despliega la página de inicio para la calibración. Con el UAV se coloca de tal manera que no llegue sombra al panel y en la pantalla se visualice el cuadro gris del panel.



Figura 10. Panel de calibración

2.4.1.1 Pruebas de vuelo

Desde la llegada de la aeronave no tripulada al Laboratorio de Simulación de Procesos, se ha llevado a cabo su adaptación y análisis por parte de los ingenieros electrónicos y de telecomunicaciones para su funcionamiento en el páramo. En la siguiente Tabla 5 se detalla una Bitácora de vuelos, donde se indica las observaciones que se han presentado y el tiempo que ha tomado tener un vuelo exitoso.

TABLA 5. BITÁCORA DE VUELOS

# de vuelo	Fecha	Lugar	Personal participante	Observaciones
1	20/06/19	Área de Conservación Hídrica Antisana	Ing. Esteban Valencia, PhD Ing. Iván Changoluisa Ing. Dario Rodríguez Sr. Kevin Palma Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Reconocimiento de campo Planificación de la misión de vuelo Prueba de vuelo de un UAV de ala fija.
2	08/07/19	Área de Conservación Hídrica Antisana	Ing. Dario Rodríguez Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Comprobación de puntos de control y colocación de triángulos de reconocimiento,

				debido a las condiciones climatológicas el vuelo no es posible.
3	23/07/19	Área de Conservación Hídrica Antisana	Ing. Iván Changoluisa Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Se realiza una prueba de vuelo, pero al momento del despegue la hélice se dobla por la fuerza del viento y se enreda con el paracaídas, provocando su ruptura.
4	08/08/19	Carcelén	Ing. Iván Changoluisa Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Se realiza prueba de vuelo, el despegue y la misión las realiza de manera correcta, pero debido a las condiciones del viento el motor se sobrecaliente y se apaga provocando la caída del UAV.
5	19/08/19	Cayambe	Ing. Iván Changoluisa Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Se realiza prueba de vuelo, el despegue y la misión se realizan correctamente pero el aterrizaje se complica debido a la presencia de tendido eléctrico.
6	25/09/19	Área de Conservación Hídrica Antisana	Ing. Iván Changoluisa Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Vuelo del dron event, el despegue, misión de vuelo y el aterrizaje se realizan correctamente, se obtienen imágenes de la zona de estudio, no georeferenciadas
7	25/10/19	Área de Conservación Hídrica Antisana	Ing. Iván Changoluisa Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel	Al tener ya varios vuelos el dron sufre una ruptura de la cola, la cual provoca un cambio total de fuselaje.
8	07/11/19	Área de Conservación Hídrica Antisana	Ing. Iván Changoluisa Sr. Henry Guerra Srta. Gabriela Espinel Sr. Kevin Palma	Se realiza dos sobrevuelos para cubrir el área de estudio obteniendo imágenes multiespectrales.

Elaboración: propia

En los diferentes vuelos realizados, los primeros aterrizajes no son óptimos por lo que la aeronave sufre daños menores en las alas y en el fuselaje principal que tienen que ser reparados, otro problema suscitado es las lluvias continuas y los fuertes vientos de la zona de estudio. El último vuelo que se realiza, de igual manera se lo divide en dos para cubrir la

zona de estudio en su totalidad, cada vuelo dura aproximadamente 30 minutos, esto depende de las condiciones de viento, siendo de 7,0 m/s el promedio, tomando en cuenta que las ráfagas de viento más fuertes son de 10 m/s, las cuales hacen que el motor de la aeronave trabaje con mayor potencia y alargando el tiempo de vuelo.

2.4.2 NIVEL FREÁTICO

Para el análisis de la saturación del humedal, existen 18 pozos (Tabla 6), Figura 11, que se construyeron utilizando tubería PVC de 3" con una longitud de 1 metro y se encuentran cubiertos de tela tipo visillo a manera de filtro y agujeros que permiten el ingreso del agua a ser medida (FONAG, 2016). Para su identificación se ha usado la siguiente codificación PUG # F.

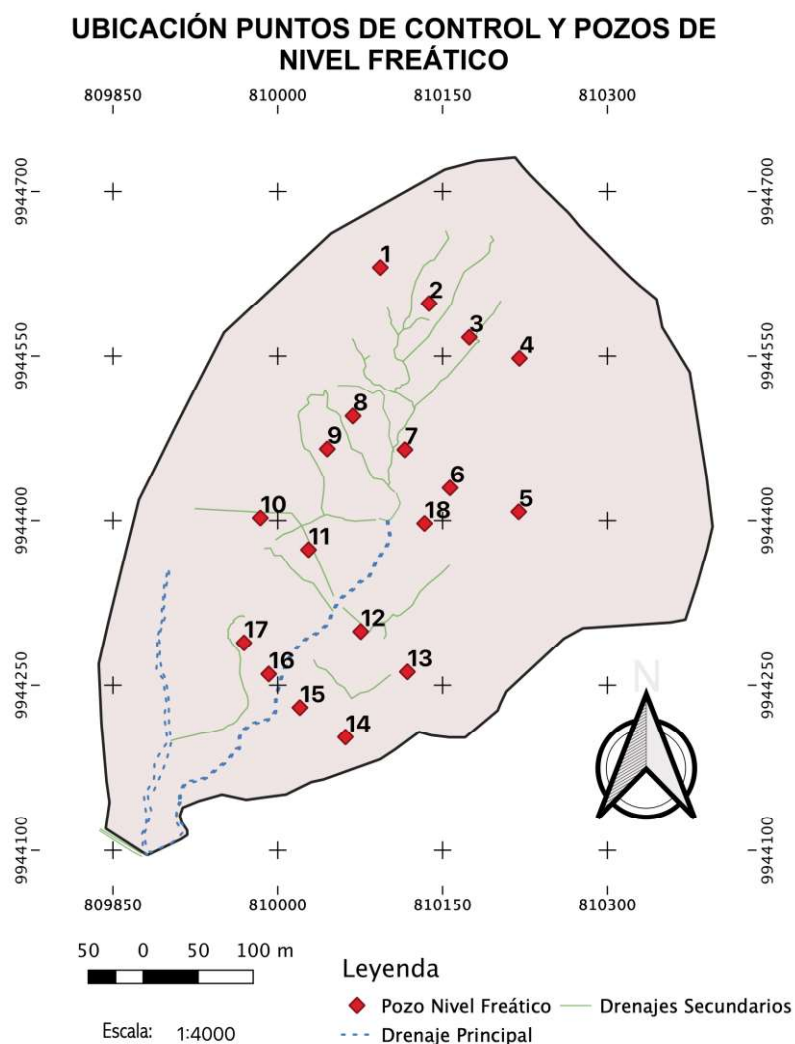


Figura 11. Ubicación pozos de nivel freático

Elaboración: propia

TABLA 6. COORDENAS DE POZOS FREÁTICOS

Elevación	Número	Este	Norte	Código
4110	4	810219.915	9944548.025	PUG 04 F
4109	3	810174.269	9944567.183	PUG 03 F
4108	5	810219.236	9944408.110	PUG 05 F
4109	1	810093.291	9944631.066	PUG 01 F
4107	6	810156.753	9944430.013	PUG 06 F
4107	7	810115.662	9944464.848	PUG 07 F
4108	8	810068.425	9944495.286	PUG 08 F
4101	12	810075.493	9944299.201	PUG 12 F
4106	10	809984.129	9944402.451	PUG 10 F
4109	2	810137.671	9944598.181	PUG 02 F
4107	9	810045.020	9944465.571	PUG 09 F
4105	11	810027.954	9944373.497	PUG 11 F
4106	18	810133.615	9944397.454	PUG 18 F
4102	13	810117.900	9944262.300	PUG 13 F
4098	15	810020.128	9944229.696	PUG 15 F
4099	16	809991.766	9944260.384	PUG 16 F
4098	14	810061.622	9944202.666	PUG 14 F
4101	17	809969.272	9944288.873	PUG 17 F

Fuente: FONAG, 2016

Luego de realizado el sobrevuelo de la zona de estudio y verificando en campo que las imágenes adquiridas son las correctas tanto en su georreferenciación, los parámetros de superposición y el número de imágenes. Se procede a realizar las mediciones en campo que consiste en recorrer el humedal pasando por cada pozo de nivel freático efectuando la medición correspondiente como se muestra en la Figura 12. Para la medición se necesita un flexómetro, una vez ahí se quita la tapa y se verifica el número de pozo, tomando como referencia la flecha dibujada en el interior del tubo, se inserta el flexómetro llegando hasta la superficie del nivel de agua, para tomar la medida.



Figura 12. Medición en los pozos de nivel freático

2.5 TRABAJO DE GABINETE

El procesamiento de las imágenes adquiridas por el UAV de ala fija Event38 se realizó con Agisoft PhotoScan, y se utilizó el Sistema de Información Geográfica Libre y de Código Abierto (QGIS) tanto para la creación de mapas como para el procesamiento de imágenes satelitales.

La estación de trabajo que se empleó para el procesamiento presenta las especificaciones técnicas de procesador en la Tabla 7.

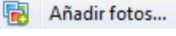
TABLA 7. ESPECIFICACIONES DE LA ESTACIÓN DE TRABAJO

Edición de Windows	Windows 10 Pro 2019	
Sistema	Procesador	Intel® Core™i7-44770 CPU @ 3.40GHz
	Memoria Instalada (Ram)	8,00 GB (7,88 GB utilizable)
	Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits

2.5.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CON AGISOFT PHOTOSCAN

La versión empleada fue proporcionada en la capacitación de Mapeo con Drones impartida por la empresa Blue it Capacitación Profesional, que de la misma manera actualizaron el programa para realizar las operaciones correspondientes.

Para un mejor entendimiento de los procesos realizados el programa se lo configuró en español. El primer paso es cargar las imágenes que se desea procesar al programa, yendo a la barra de herramientas se selecciona la opción *Flujo de trabajo*, se desplegará un menú

donde se escoge la opción  , a continuación se abrirá una ventana donde el sistema pedirá que seleccione el sistema de datos con el que se desea añadir las imágenes, se selecciona *Crear cámaras multiespectrales a partir de carpetas como bandas*, dicha opción agrupa las imágenes de las 5 bandas en una sola para cargarlas al programa, así de 2950 fotografías tendremos 590 para procesar.

Antes de la orientación de fotos, se debe realizar la calibración de reflectancia de la cámara. Para ello se debe acceder en el menú *Herramientas* a la opción de calibrar reflectancia. Se abrirá una ventana donde encontraremos las fotografías que el programa encontró sobre el panel de calibración. En calibración del panel se selecciona *Seleccionar el panel* y se carga el archivo csv. que contiene la información necesaria de las bandas multiespectrales, seguido click en aceptar. En la opción de *Flujo de trabajo* se seguirán las opciones paso por paso.

2.5.1.1 Orientar fotos

Una vez ingresados calibrada la reflectancia, se procede a orientar las fotos, para lo cual se despliega una ventana, en sus opciones generales se escoge Precisión: Alta, Pre-procesar emparejamiento de imágenes: Referencia y por último Aceptar. Al finalizar todas las imágenes serán orientadas en función de las coordenadas X Y Z que la cámara haya adquirido en el vuelo.

2.5.1.2 Creación de nube de puntos densa

En función de la posición de cada imagen, el programa calcula la información de profundidad para combinarlas y crear una nube de puntos densa. Los parámetros usados Son Calidad: Alta y Filtrado de profundidad: Agresivo. Este paso es de suma importancia, ya que con su resultado se genera el Modelo Digital de elevaciones.

2.5.1.3 Creación de malla

Con el anterior proceso finalizado, el siguiente paso es generar una malla, la cual será necesaria para obtener datos de área y volumen, configurada de la siguiente manera; Tipo de superficie: Bajorrelieve/terreno, Datos de fuente: Nube de puntos densa, Número de caras: Alta.

2.5.1.4 Modelo Digital de Elevaciones

Aquí se debe escoger el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM 17S (EPSG::32717), en datos de fuente se debe escoger Nube de puntos densa, para mayor precisión para la gráfica de las curvas de nivel.

2.5.1.5 Generación de Ortomosaico

Para la generación del ortomosaico se escoge en *Flujo de trabajo, Crear ortomosaico* donde se despliega una ventana en donde se escoge: la Proyección tipo geográfica y Superficie en Modelo digital de elevaciones.

2.5.1.6 Curvas de nivel

Para la generación de las curvas de nivel, se vuelve a la barra de herramientas, se selecciona la opción *Herramientas*, y se escoge *Generación de curvas de nivel*. El intervalo seleccionado entre cada curva es de 1 metro. A fin de generar un mapa temático de la zona en el programa QGIS, las curvas generadas se exportan en formato shape. En el menú, seleccionamos *Herramientas, Exportar, Exportar curvas de nivel*.

2.5.2 PROCESAMIENTO CON QGIS

La información satelital se las obtuvo de la misión Europea Copernicus Sentinel-2 que consta de dos satélites, cuyo objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre con una temporalidad de 10 días en el Ecuador con uno de sus satélites y 5 días con ambos en condiciones meteorológicas óptimas. Las imágenes adquiridas se pueden descargar de manera gratuita de espectro ancho, alta resolución y multiespectral.

Los productos se clasifican en 3 niveles, para la aplicación se toma el segundo Nivel-1C en el cual los datos se organizan en gránulos también llamados ortoimágenes de 100*100 km² en proyección UTM WGS84, debido a que el primer nivel no contiene rectificación en sus imágenes y el tercero son datos empleados en trabajos de mayor complejidad. El nivel-1C contiene las bandas Red, Green, Blue (RGB) necesarias en la comparación del estudio representadas como B04, B03 y B02 respectivamente.

El acceso a la página de descarga se lo realiza registrando un usuario, el cual permite usar Copernicus Open Access Hub. Filtrando las opciones que se desea adquirir, para el caso de estudio se selecciona *Mission Sentinel-2* y *Product Type: S2MSI1C* y seleccionando el área de estudio como se muestra en la Figura 13.

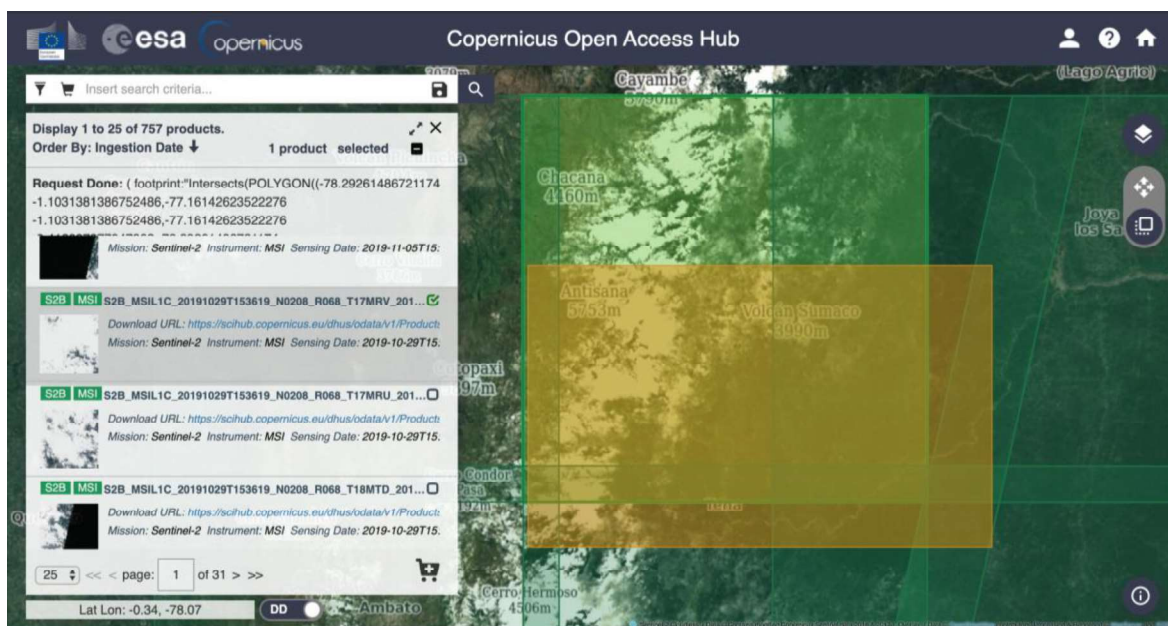


Figura 13. Página de descarga Copernicus Open Access Hub

Fuente: Copernicus Open Access Hub, 2019

Las imágenes satelitales se las procesa en QGIS; de la carpeta de descarga se toma las imágenes de las bandas B04, B03 y B02 (Red, Green, Blue; RGB). En el programa QGIS en la barra de herramientas se busca la opción *Raster*, luego *Miscelanea* y se escoge *Combinar*. Se desplegará la siguiente ventana Figura 14 donde en el archivo de entrada se coloca las 3 bandas mencionadas para su combinación, así como el archivo de salida que tendrá el nombre de RGB, se escoge la opción de *Coloque cada archivo de entrada en una banda separada*, para su posterior edición y aceptar.

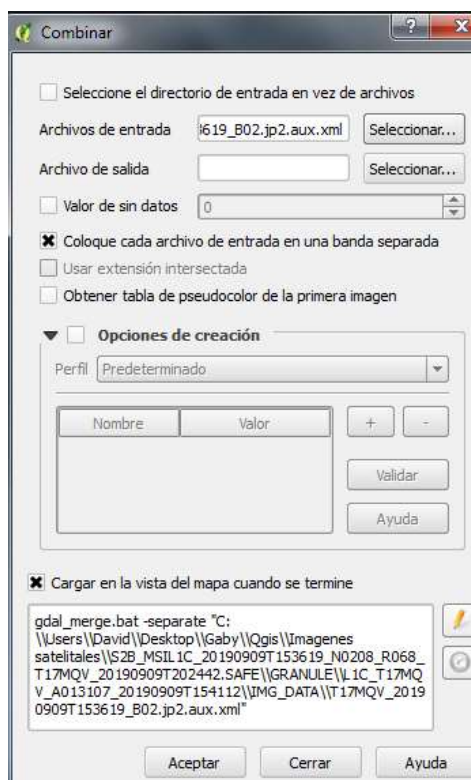


Figura 14. Opciones de combinación QGIS
Fuente: QGIS, 2019

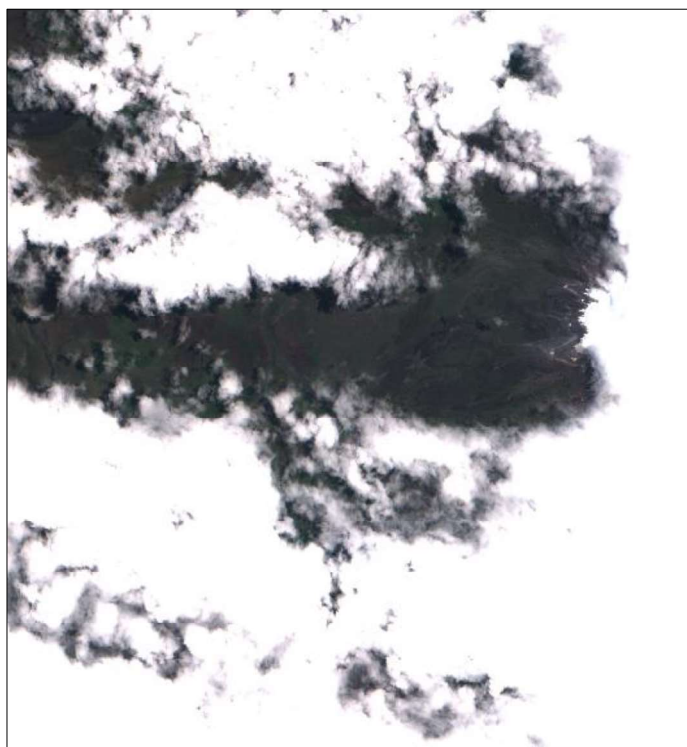


Figura 15. Imágen satelital

Fuente: Sentitel 2, 2019

En la Figura 15 se puede observar la cantidad de nubes que existe en el lugar, la mayoría de imágenes de la zona de estudio están cubiertas en un 95% de nubes, con los fuertes vientos, las nubes cambian de lugar constantemente, por lo que en esta ocasión se pudo observar el humedal (Figura 16), para la obtención de esta figura se empleó la herramienta *Clipper*, delimitándola así con el humedal.



Figura 16. Imagen satelital delimitada con el humedal

Elaboración: Gabriela Espinel

2.5.3 MAPAS TEMÁTICOS

Para el desarrollo de los mapas temáticos se utiliza el programa de libre acceso QGIS. En el cual se carga el ortomosaico y el modelo digital de elevaciones resultado del procesamiento en Agisoft. Una vez allí se ingresa a las propiedades de la capa, modificando las etiquetas y la simbología. Seguido en *Nueva composición de impresión* se elabora el mapa, agregando: título, cuadrícula, escala, flecha de norte, leyenda (si fuese el caso), necesarios para la identificación del lugar.

Las imágenes multiespectrales al tener la banda Infrarrojo cercano, permite calcular el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés) con la siguiente ecuación (McFeeters, 1996):

$$(Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (3.1)$$

Para su procesamiento se ingresa a la barra de *Herramientas, Establecer la transformación raster* donde se despliega una ventana en la que se debe ingresar la ecuación, como resultado un mapa a blanco y negro en el cual los rangos del índice van de -1 a 1. Y para la visualización del regimen de inundación se usa la banda NIR (Delgado et al., 2019).

Adicionalmente se calcula la pendiente del terreno, basado en el desnivel existente (Y) mediante las cotas y su variación en el espacio (X) mediante la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{(Cota\ max - Cota\ menor)(m)}{Distancia\ X\ (m)} \right] * 100 \quad (3.2)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ORTOMOSAICO UAV

A partir de la generación del ortomosaico del lugar (Figura 18) mediante el sobrevuelo del UAV de ala fija realizado el 7 de noviembre de 2019, se realiza un mapa observando con detalle la zona saturada en restauración del humedal ubicado en la parte media del mismo. Además con claridad se observa zonas que contienen una vegetación distinta (Figura 17) mostrándose de colores diferentes a aquella en la zona media del humedal; no se realiza una identificación de la vegetación, ya que el objetivo de este estudio es determinar la saturación del humedal. Con el programa Agisoft se crea un polígono delimitando la zona, debido a que en los sobrevuelos el UAV toma fotografías extras en los extremos del humedal. Se mide el área total de la zona de estudio, teniendo el valor de: 174.330 m².

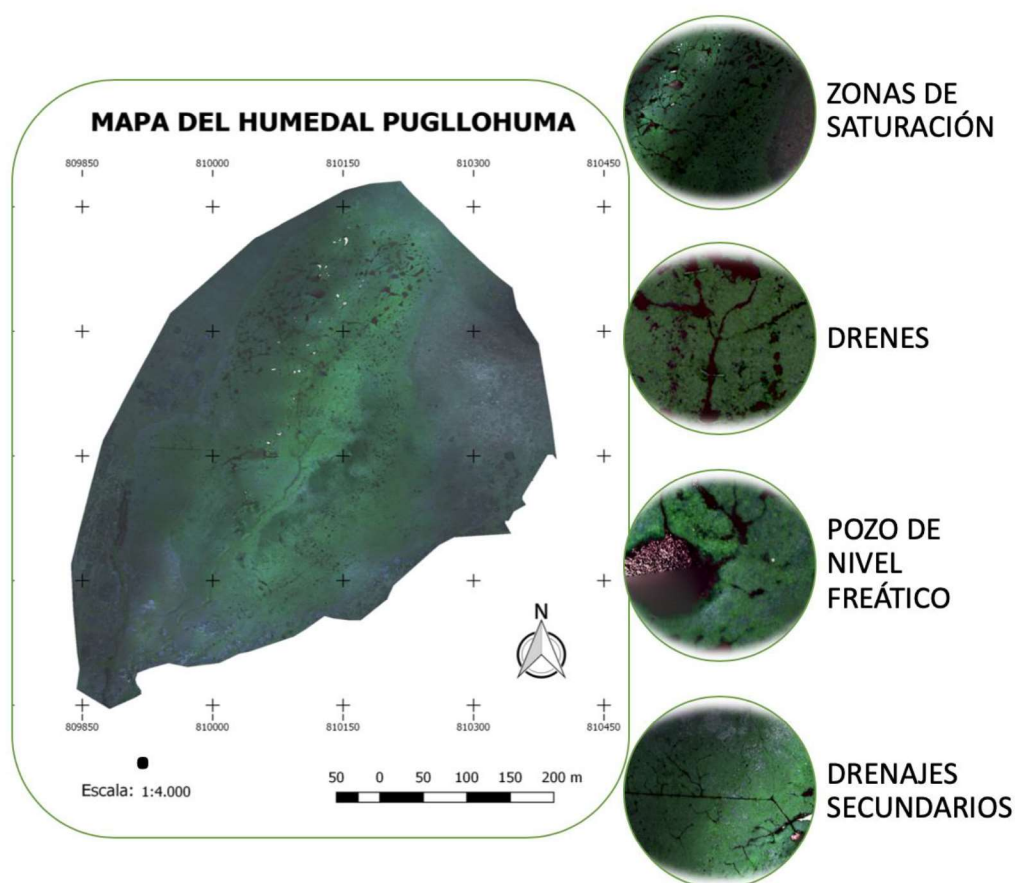


Figura 17. Detalles de la zona de estudio

Elaboración: propia

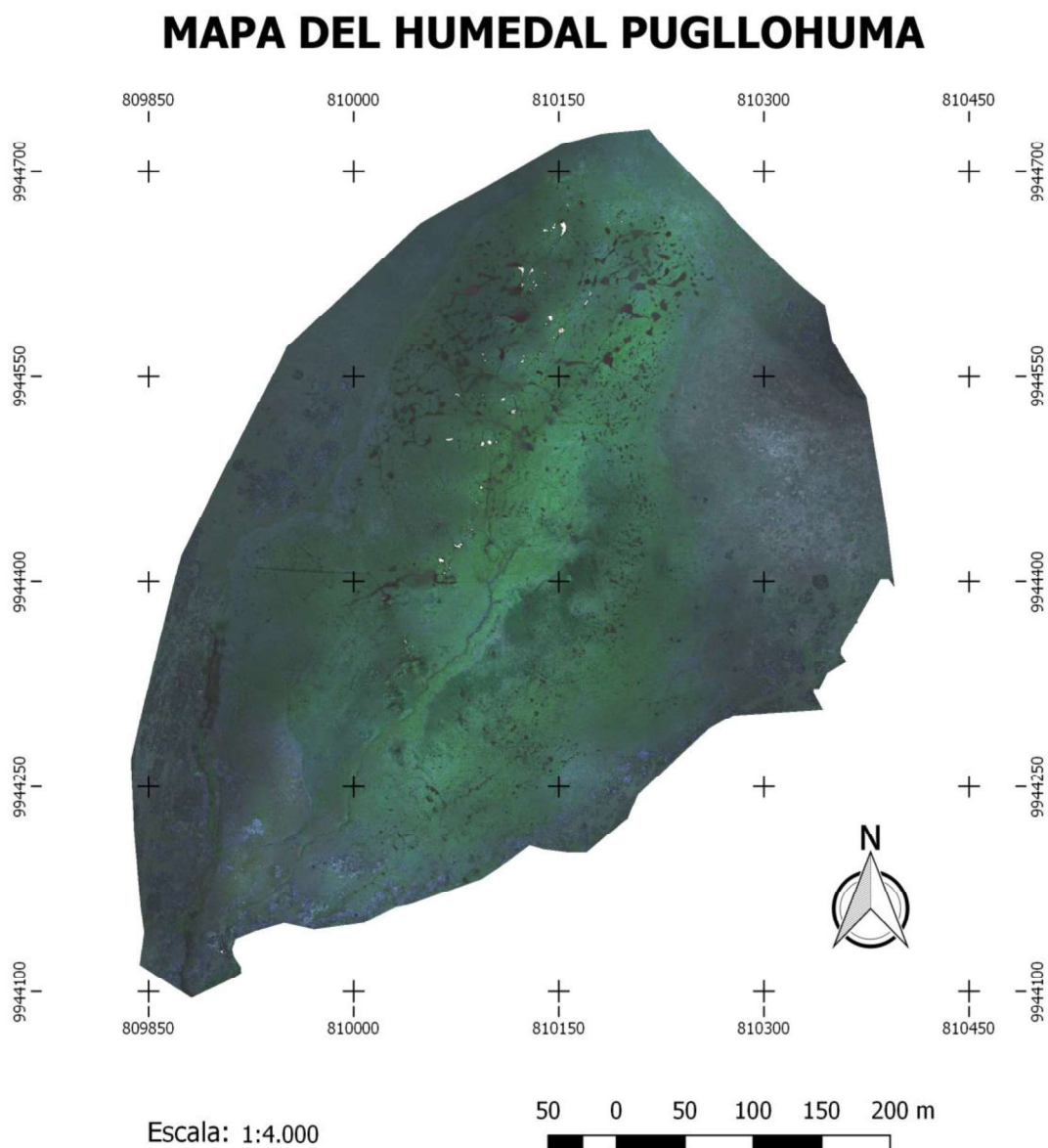


Figura 18. Ortomosaico del Humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

El Modelo Digital de Elevaciones (DEM) Figura 19, del cuál se observa que el área total de estudio se encuentra entre las alturas 4.126,8 y 4.105,2 msnm. También se extraen de Agisoft las curvas de nivel del lugar, las cuales van desde la altitud de 4.126 hasta 4.098 msnm con una equidistancia de 1 metro, las curvas se las obtuvo mediante la clasificación de nube de puntos densa que considera solamente la superficie del suelo. En este mapa (Figura 20) se observan líneas irregulares a lo largo del terreno, que con un acercamiento

se observa de igual manera que el relieve del terreno se dibuja en las zonas saturadas, creando un detalle minucioso del humedal. Logrando realizar el levantamiento microtopográfico del Humedal Pugllohuma.

MAPA DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

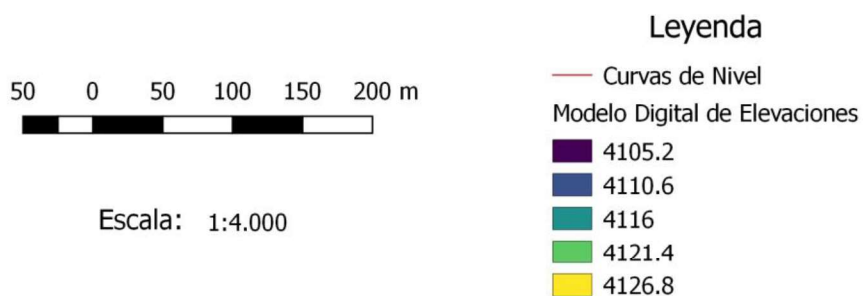
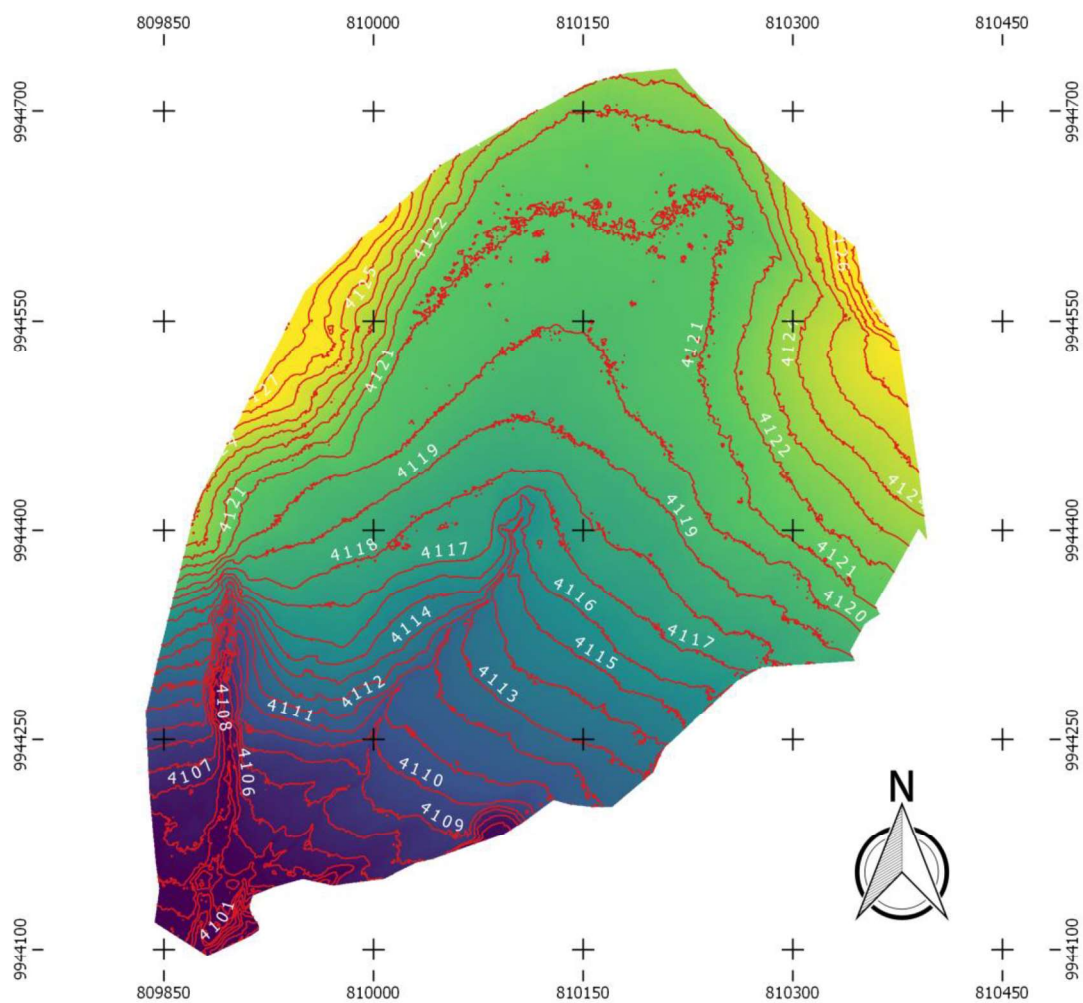


Figura 19. Modelo Digital de Elevaciones

Elaboración: propia

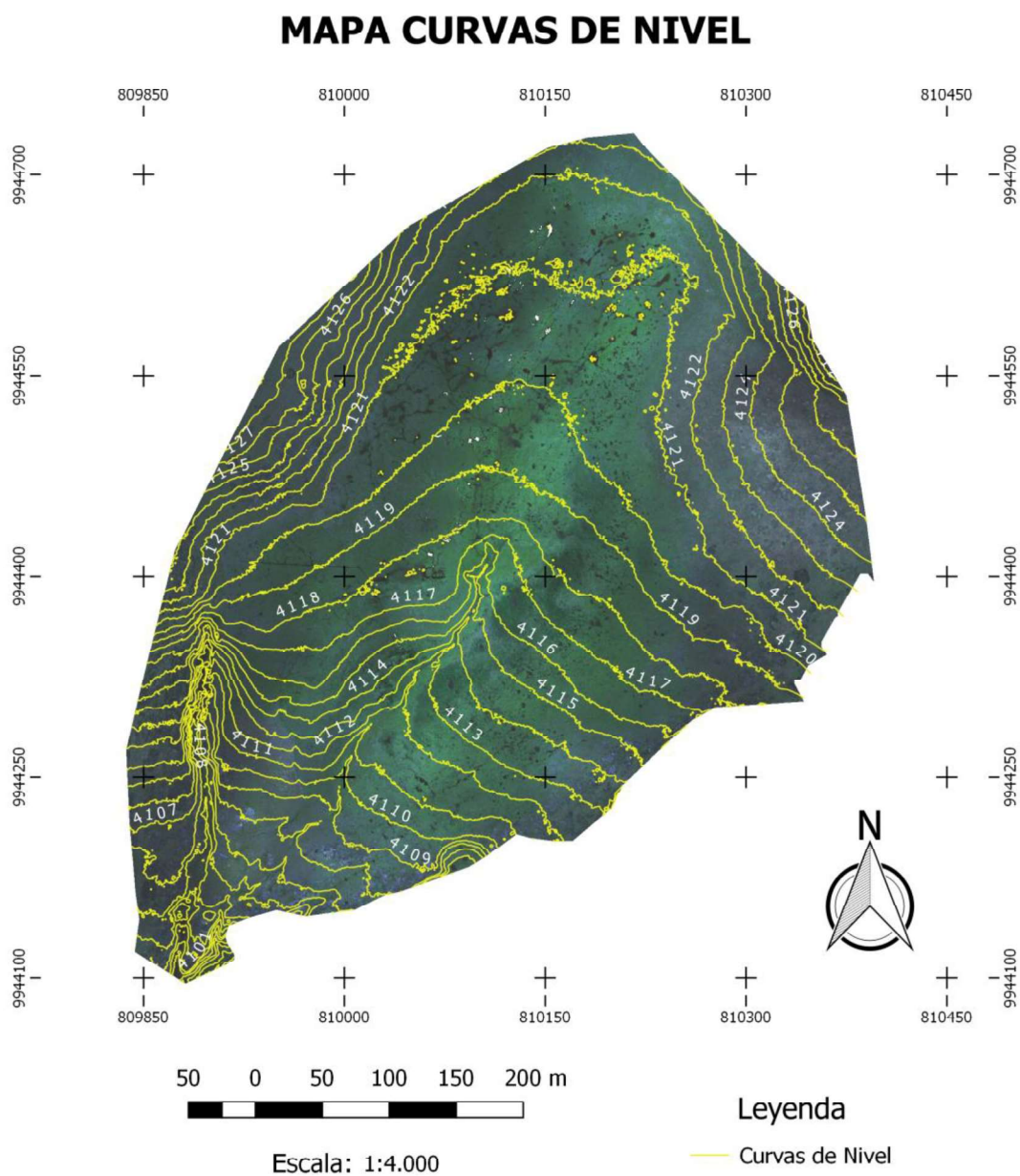


Figura 20. Curvas de nivel del Humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Se calcula la inclinación del terreno, con la ecuación 3.2, se emplea la cota mayor 4.126,8 msnm y la menor 4.105,2 msnm y la distancia entre estas de 640m, la pendiente de la zona es de 3,37%; siendo un pendiente suave lo que denota en la acumulación del agua ya que a mayor pendiente, mayor velocidad del flujo del agua. Y debido a que es una zona practicamente plana se forman charcos y como consecuencia el humedal.

$$\left[\frac{(4.126,8 - 4.105,2)(m)}{640 (m)} \right] * 100 = 3,37\%$$

La ecuación 3.1 usada para el cálculo de NDWI, fue la primera que se usó con las bandas espectrales a las que se tenía acceso en la época. Dicho índice tiene dos ecuaciones más $NDWI_{NIR/MIR}$ y $NDWI_{G/MIR}$, que usan la banda del infrarrojo medio con la cual se puede realizar un cálculo más preciso para la detección de agua permanente y estacional en el humedal.

Se calcula el índice, obteniendo un imagen en blanco y negro Figura 21, donde las aguas abiertas son blancas; y el suelo y la vegetación terrestre son negros. Se realizó el índice para la comprobación de las zonas saturadas del humedal, verificando que se encuentran en la parte media del mismo. Además de la detección de agua, el NDWI nos proporciona información sobre la turbidez del agua, a mayor contenido de sedimentos en el agua mayor reflectancia y en el espectro visible lucirá más clara, por lo que en la Figura 22 se muestra que en su mayoría las áreas inundadas tienen turbidez mayores a 15 NTU, lo cual se verifica visualmente al momento de recolectar la información de campo. En el programa QGIS, se usa la banda de infrarrojo cercano para verificar las zonas inundadas y las zonas que no lo están Figura 23, obteniendo un área inundada de 86.168,49 m², observando que la parte media del humedal es aquella que contiene mayor saturación.

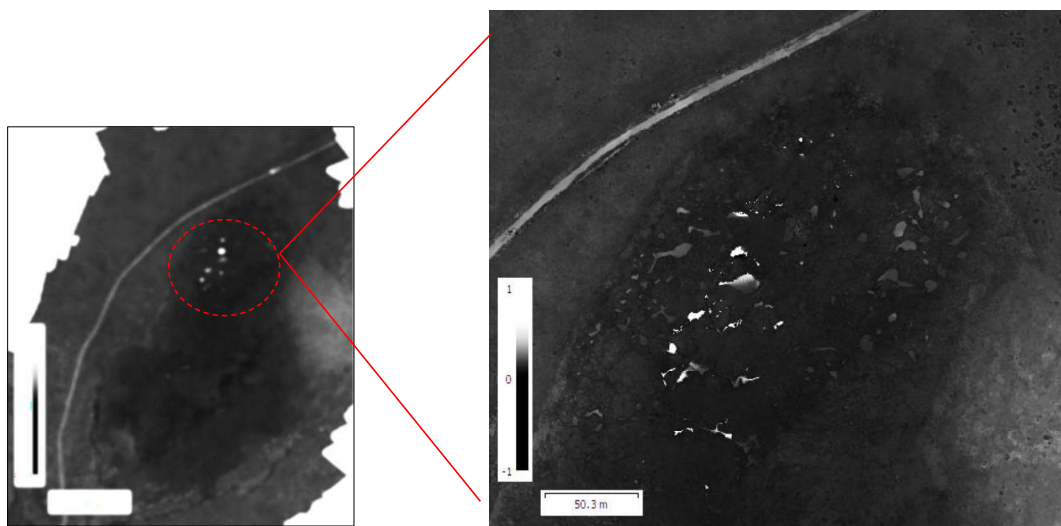


Figura 21. Mapa del índice normalizado de agua (NDWI)

Elaboración: propia

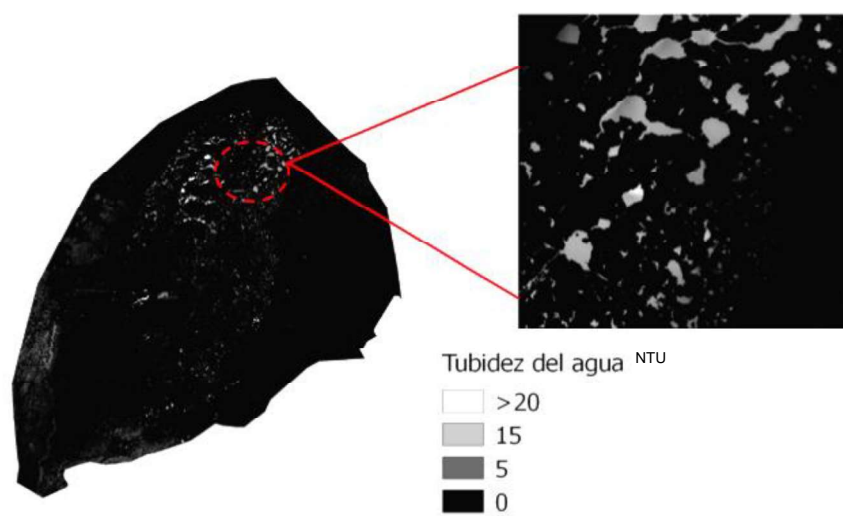


Figura 22. Turbidez
Elaboración: propia

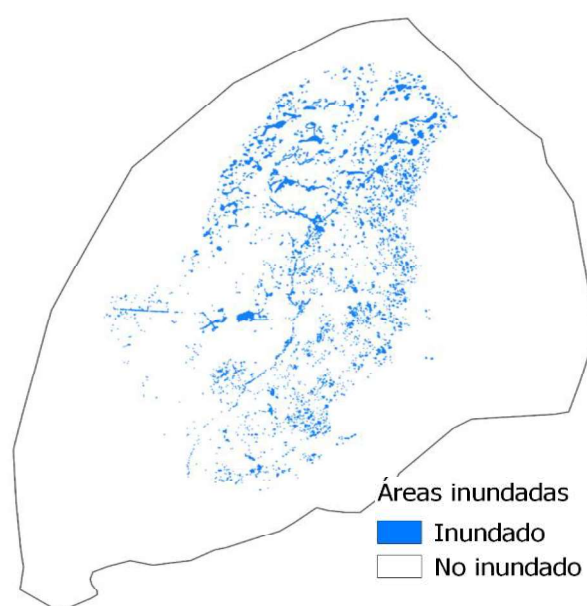


Figura 23. Inundación
Elaboración: propia

3.2 INFORMACIÓN DE CAMPO

Inmediatamente luego de los sobrevuelos se efectúa el trabajo de campo, donde mediante el recorrido del humedal se desempeña un reconocimiento visual de la zona, verificando el estado de los drenes, así también realizando la medición del nivel freático en los 18 pozos, teniendo los siguientes resultados, Tabla 8. Los mismos que se restan de la altura de la ubicación del pozo para poder ingresarlos en QGIS y obtener el mapa de nivel freático de la zona (Figura 24Figura 24). En el mapa las zonas con mayor saturación son las ubicadas en los puntos 1, 2, 3, 5, 7, y 18.

TABLA 8. DATOS DE CAMPO DE NIVEL FREÁTICO

Número	Código	Medición (cm)
1	PUG 01 F	17,9
2	PUG 02 F	10,8
3	PUG 03 F	13,8
4	PUG 04 F	28,5
5	PUG 05 F	14,2
6	PUG 06 F	23,4
7	PUG 07 F	12,8
8	PUG 08 F	26,4
9	PUG 09 F	28,6
10	PUG 10 F	25
11	PUG 11 F	12,9
12	PUG 12 F	18,4
13	PUG 13 F	21,3
14	PUG 14 F	21,9
15	PUG 15 F	21,1
16	PUG 16 F	16,2
17	PUG 17 F	22
18	PUG 18 F	12,6

Elaboración: propia

MAPA PIEZOMÉTRICO CON DATOS DE CAMPO

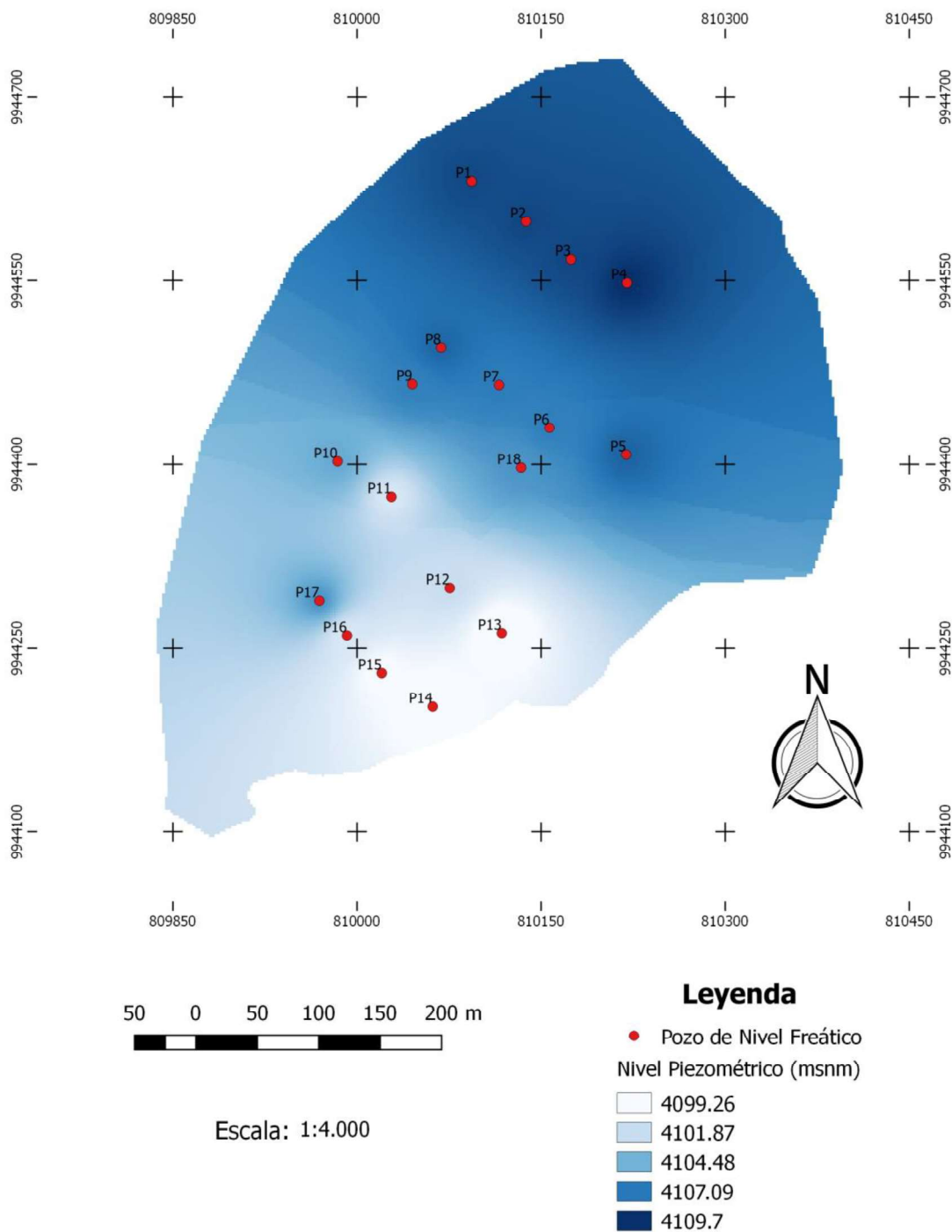


Figura 24. Mapa piezométrico con datos de campo
Elaboración: propia

La Figura 25 es un esquema donde se evidencia mediante la superposición del mapa de inundación y; el obtenido mediante la resta con la calculadora raster en QGIS del DEM y el mapa piezométrico, donde la zona media del humedal es aquella con un 49,42% de área saturada. Aquellos valores negativos son por causa de que el nivel del agua se encuentra por encima del nivel del terreno, formando zonas donde se empoza el agua. La parte baja es una zona abierta donde el agua desemboca al cause principal.

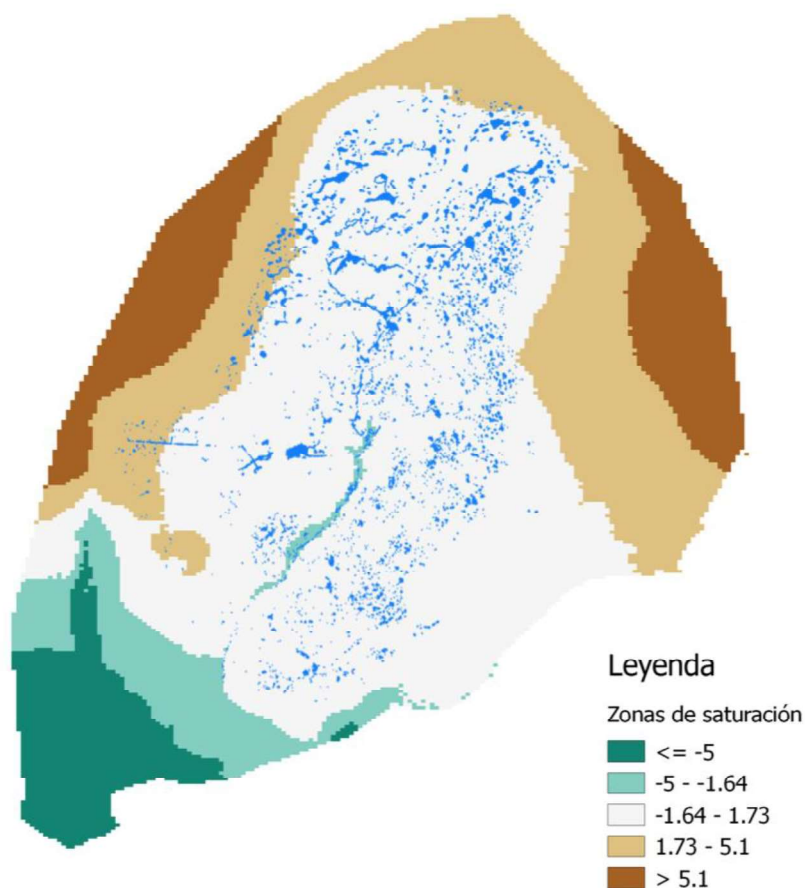


Figura 25. Comparación de datos de campo con ortomosaico del UAV
Elaboración: propia

3.3 COMPARACIÓN IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes adquiridas con la misión Sentinel-2, no son útiles para el estudio realizado a que pesar de que están georreferenciadas y tener imágenes a 10m la nubosidad del lugar hace que sea imposible su visualización, incluso el clima de la zona es incierto como se lo

pudo verificar en campo un día sin lluvia, nublado y con vientos moderados y al siguiente un día totalmente despejado y con fuertes vientos y a pesar de la temporalidad de 5 días no es posible coincidir. Y la mayoría de las imágenes del satélite tienen una nubosidad por encima del 60%. El problema de la nubosidad se podría resolver si se compran las imágenes de otras plataformas el inconveniente es el corto presupuesto para realizar esos monitoreos. Como se observa en la Figura 26 la resolución de la imagen satelital es de 10m/pixel a diferencia de los 6cm/pixel de la imagen tomada por el UAV.

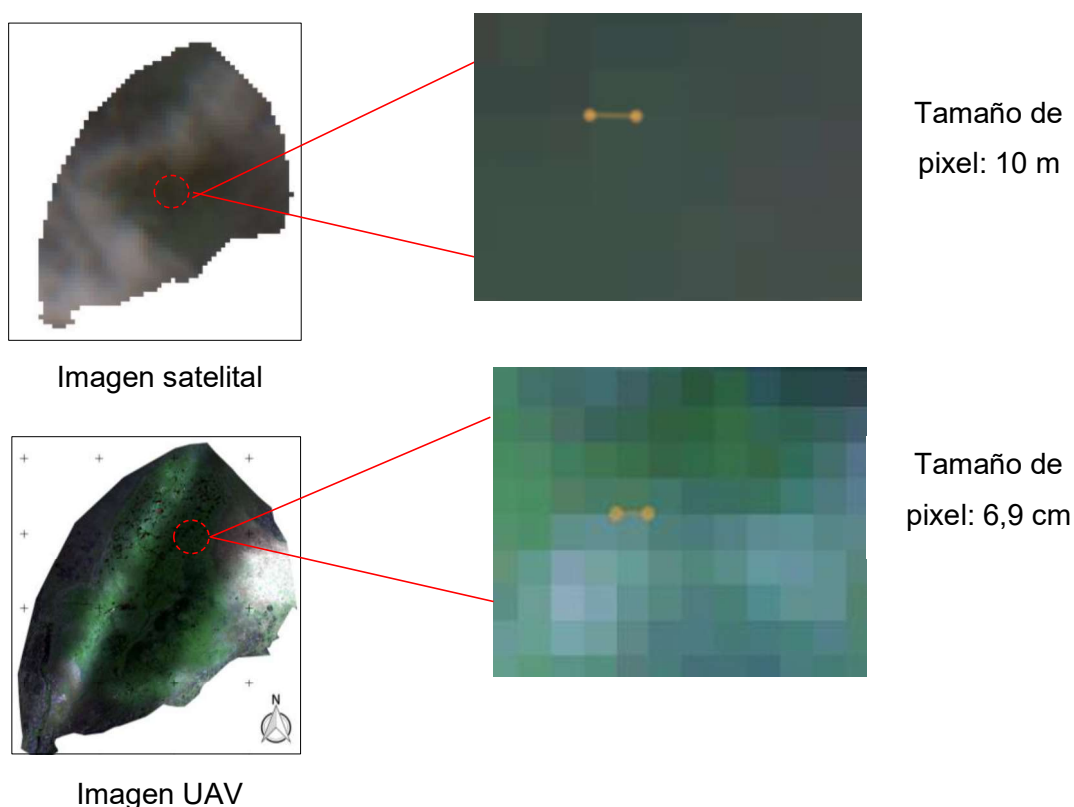


Figura 26. Comparación de la resolución con imágenes satelitales

Elaboración: propia

3.4 DISCUSIÓN

El trabajo realizado ha demostrado la aplicabilidad del monitoreo multiespectral por un UAV en la realización de mapas temáticos, para la identificación de la zona en restauración del humedal, a través del ortomosaico, siendo una imagen de color verdadero, permite observar sectores de color negro, esto debido a que el agua absorbe la energía en todas las bandas del espectro visible y se puede identificar un cuerpo de agua. Del mismo modo la vegetación luce de color verde porque refleja una mayor proporción de energía en la longitud de onda

de la banda verde y absorbe la correspondiente al azul y rojo; dicha información es relevante para evaluar la saturación del Humedal Pugllohuma. Aunque existen un conjunto amplio de indicadores para usar en humedales aquí se sugiere indicadores y variables prácticas de teledetección que se pueden emplear para evaluar la saturación del humedal mediante un UAV en las zonas altoandinas del Ecuador. El humedal estudiado está sujeto a factores que conllevan cambios en su nivel de inundación, el hidropérido o la calidad del agua (Flores et al., 2017). En nuestro caso, la identificación de las zonas saturadas, la microtopografía, la evaluación de las zonas de inundación y la turbidez del agua es muy ventajoso para el monitoreo del humedal en corto tiempo.

Con un total de 2.950 imágenes, con una altura de vuelo programada de 80 m, cubriendo un área total de 0,583 km² y una resolución en terreno de 6,97cm/pix, se realiza la cartografía con el UAV, obteniendo el Modelo Digital de Elevaciones y las curvas de nivel con una equidistancia de 1m, lo cual nos permite observar la microcuenca de la zona constituida por una red de drenajes tanto naturales como artificiales que confluyen a un lecho único de salida en la parte baja a una altura de 4.105,2 msnm, donde se muestra la operación rápida que brinda este tipo de herramienta equipada con la cámara multiespectral, en comparación con el trabajo de campo que tomaría alrededor de 3 días el mapeo e identificación del área.

La planificación de la misión puede diseñarse el mismo día del vuelo y modificarse según las condiciones climáticas, específicamente la dirección y velocidad del viento. En el vuelo realizado se divide la misión en dos secciones para salvaguardar la integridad de la aeronave, y se diseña ambas misiones con una superposición de imagen del 65% y con velocidad promedio de viento de 7,0 m/s. Una de las limitaciones es la necesidad de áreas abiertas y despejadas para el aterrizaje, éstas fueron ubicadas en la parte izquierda del acceso al humedal, siendo un área abierta sin pajonales de 4,5 km². Agregando que se realiza correcciones radiométricas mediante el panel de calibración de la cámara, antes y después de cada vuelo.

A través de la información recopilada por medio de la cámara multiespectral se establece que la banda 5 en la región NIR es la más ilustrativa. El NIR se vincula con la banda verde con éxito para la turbidez del agua que se modeló a través de una relación lineal con el índice de agua normalizada, NDWI, sugerido por McFeeters, 1996. De igual manera se lo aplica para denotar el régimen de inundación, aunque este es aplicable con un porcentaje

de aguas abiertas superior al 50% (Delgado et al., 2019), se realiza una corrección, eliminando los píxeles que no corresponden al régimen de inundación, y se obtiene un área inundada de 86.168,49 m². El mencionado índice se lo puede mejorar utilizando la banda espectral del infrarrojo medio (MIR), aplicando dos variantes del índice NDWI_{NIR/MIR} y NDWI_{G/MIR}, para un estudio más detallado de la zona, se debe efectuar un análisis comparativo a fin de reconocer cual de ellos es el apropiado. Además uno de los índices más comunes en la teledetección remota es el NDVI, el cual no es significativo en el análisis de humedales debido al problema de saturación de vegetación encontrados para este índice (Adam et al., 2010).

Adicionalmente el índice NDWI brinda información sobre la calidad del agua en cuanto a la turbidez, el agua mientras más sedimentos contenga mayor será la reflectancia y en el espectro visible (imagen de color verdadero) lucirá más clara, esto debido a que la zona tiene un alto contenido de hierro (Fe) y otros elementos como Magnesio (Mg), Manganeseo (Mn), Azufre (S), Amonio (NH₄) y Potasio (K). La modificación de la hidrología podría aumentar el pH, cambiar la disponibilidad de nutrientes y disminuir la capacidad de retención de humedad del suelo, debido a que disminuye el período de inundación y con ello los procesos de mineralización del suelo (FONAG, 2016). Por tal razón es importante realizar monitoreos continuos del humedal.

Otra función destacada del empleo de un UAV es que a pesar de las condiciones ambientales desfavorables, principalmente los fuertes vientos que caracterizan a la zona, así como los periodos de lluvias y nubosidad, el dron realizó el sobrevuelo sin ningún problema en cuanto al consumo de batería que fue del 80%, en la telemetría realizó un vuelo con altitud media de 103 m, y no perdió comunicación con la estación terrena ubicada a 700 m del punto más lejano.

El ortomosaico adquirido contiene 2'879.013 píxeles, cada uno con una resolución de 6cm, necesaria para la identificación del área saturada, así como la distinción de los drenes y pozos para el monitoreo del humedal; mientras que con las imágenes satelitales no se pudo tener ninguna relación, ya que éstas tienen una resolución de 10m/píxel y el problema de nubosidad del área hace que las imágenes sean inservibles para la representación de las características del humedal como son los drenes, los pozos de nivel freático en especial visualizar las zonas saturadas. También podría aplicarse un enfoque diferente utilizando los datos adquiridos con un UAV para mejorar las imágenes satelitales, tomando al UAV como

punto de control a escala. Conlleva un análisis de corrección atmosférica para trabajos futuros.

También se debe enfatizar la temporalidad en la que se puede utilizar esta herramienta, ya que la zona de estudio presenta periodos de lluvia que inician en los meses de abril y junio, con precipitaciones medias mensuales superiores a 70 mm y un pico de 200 mm en junio, en la cual no se podría disponer de este instrumento; por otra parte la época seca aparece en los meses de enero, febrero y septiembre con valores menores a 40 mm, que sería la época óptima para emplear un UAV, teniendo en consideración los fuertes vientos que logró resistir de 11 m/s. Estas misiones frecuentes mejoran claramente los datos para la creación y mejoramiento de índices que caractericen la zona, así como el monitoreo de estas áreas de importancia hídrica para el país.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El monitoreo del Humedal Pugllahoma usando un UAV de alas fijas es una herramienta valiosa al proporcionar la microtopografía del lugar en menor tiempo, ya que por otro lado al realizar el mismo trabajo con medios topográficos con una estación total o un gps diferencial, la generación de las bases necesarias, así como la toma de datos y su posterior procesamiento es mucho más laborioso, tanto en campo como el trabajo de gabinete.
- Se obtiene un perfil microtopográfico de la zona estableciendo un modelo digital de elevaciones en el cual, se divisa que el humedal no tiene una topografía compleja, con una pendiente de 3,3% que nos indica un terreno prácticamente plano. Conjuntamente un área del humedal de 174.330 m², con curvas de nivel a una equidistancia de 1 m.
- Se desarrolla una metodología que nos permite generar un mapa de inundación con la banda del infrarrojo cercano, permitiendo visualizar la zona de saturación con una extensión de 86.168,49 m². Comprobando cuales son las zonas más saturadas comparándolas con los datos recolectados en campo donde las zonas con de los pozos 2, 3, 5, 7, 11 y 18, son aquellas en las que se visualiza sitios de aguas abiertas.
- El monitoreo con imágenes satélites no es la mejor opción para la zona de estudio, ya que debido a la temporalidad de 5 días del satélite Sentinel-2, y las condiciones climatológicas de nubosidad de la zona, se puede tener un día sin lluvia, nublado y con vientos moderados y al siguiente un día totalmente despejado y con fuertes vientos como se lo comprobó en campo. Por lo que la mayoría de imágenes del satélite tienen una nubosidad por encima del 60%.
- Con las visitas de campo e información proporcionada por INAMHI se determina que la época recomendable para el uso de drones es la estación seca de enero, febrero

y septiembre, para obtener resultados confiables y no poner en peligro el equipo adquirido ni al personal que lo maneja, ya que en los periodos de lluvia tanto la nubosidad y la precipitación suponen un riesgo y un verdadero problema para el sobrevuelo.

4.2 RECOMENDACIONES

- Para el despegue de la aeronave no tripulada de ala fija es necesario construir un sistema que lo impulse como una catapulta, debido a que por las ráfagas de viento intermitentes se vuelve peligroso manipularlo.
- Para el procesamiento de las imágenes, la estación de trabajo que se utilice debe tener características similares a las presentadas o de mayores prestaciones, ya que el volumen de las imágenes y su resolución son altas.
- La adquisición de cámaras multiespectrales con mayores prestaciones brindará una posibilidad más amplia para el análisis de la zona, tanto en temperatura, vegetación, suelo y agua, desarrollando índices que ayuden al monitoreo. Aplicando para el monitoreo de saturación índices de agua para su detección permanente y estacional usando la banda del infrarrojo medio.
- Para futuras investigaciones se recomienda utilizar diferentes cargas útiles si el presupuesto lo permite, y así realizar un estudio completo del área, como el uso de cámaras térmicas o aquellas que tengan más bandas y así obtener diferentes índices relacionados con la vegetación, el suelo y la fauna.

REFERENCIAS

- Adam, E., Mutanga, O., & Rugege, D. (2010). *Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review*. 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>
- Aguirre, M., Torres, J., & Velasco, P. (2013). *Guía para la Restauración Ecológica en los Páramos del Anisana* (p. 64). p. 64.
- Aguirre, N., & Torres, J. (2014). *Restauración Ecológica de los Páramos de Jatunhuaycu: Degradación, Sistemas de Referencia y Estrategias de Restauración*. Recuperado de www.fonag.org.ec
- Altavian. (2016). Why use PPK with your drone (not RTK) - Altavian Inc. Recuperado el 16 de agosto de 2019, de <https://www.altavian.com/blog/use-ppk-not-rtk>
- Alvarado, C. (2009). *Caracterización hidrogeológica de las vertientes occidentales del volcán Antisana como parte de los estudios de los glaciares y páramos frente al cambio climático*. Recuperado de <http://infoagua-guayllabamba.ec/repositorio/web/files/TESIS ANTISANA.pdf>
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (2018). What is ASPRS? – ASPRS. Recuperado el 10 de julio de 2019, de <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>
- Arencibia-Carballo, G. (2016). Es posible el uso de drones en la investigación científica y el monitoreo ambiental? *REDVET. Revista electrónica de veterinaria*, 17(9), 3. Recuperado de <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n090916/091601.pdf>
- Bendea, H., Boccardo, P., Dequal, S., Tonolo, F. G., Marenchino, D., & Piras, M. (2008). Low cost UAV for post-disaster assessment. *Proceedings of The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Beijing China 31 July 2008*, XXXVII, 1373–1380. Recuperado de http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/8_pdf/14_ThS-20/37.pdf
- Boon, M. A., Drijfhout, A. P., & Tesfamichael, S. (2017). Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study. *International*

Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(2W6), 47–54. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>

Boon, M. A., & Tesfamichael, S. (2017). Wetland vegetation integrity assessment with low altitude multispectral UAV imagery. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 55. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-55-2017>

Boon, M. A., Greenfield, R., & Tesfamichael, S. (2016). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry produces accurate high-resolution orthophotos, point clouds and surface models for mapping wetlands. *South African Journal of Geomatics*, 5(2), 186. <https://doi.org/10.4314/sajg.v5i2.7>

Campos, J. C., Sillero, N., & Brito, J. C. (2012). Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara–Sahel transition zone. *Journal of Hydrology*, 464–465, 438–446. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.07.042>

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2005). *Los Humedales Altoandinos Ecosistemas estratégicos y frágiles que ofrecen servicios ambientales para el bienestar de millones de personas*. Chile.

Delgado, R., Cazacu, C., & Adamescu, M. (2019). *Rapid-assessment-of-ecological-integrity-for-LTER-Wetland-sites-by-using-UAV-multispectral-mapping.pdf*. 20. <https://doi.org/10.3390>

Díaz-Delgado, R., Cazacu, C., & Adamescu, M. (2018). Rapid Assessment of Ecological Integrity for LTER Wetland Sites by Using UAV Multispectral Mapping. *Drones*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.3390/drones3010003>

Dirección General de Aviación Civil (DAC). (2015). *Resolución No 251: Operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS)*. Quito-Ecuador.

Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrammetry*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264>

- Empresa Metropolitana de Alcantarrillado y Agua Potable de Quito (EPMAPS). (2011). *AGUA SEGURA PARA EL DESARROLLO HUMANO*. Recuperado de http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/factsheet_2011.pdf
- Escalante, J., Cáceres, J., & Porras, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119–140. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09>
- EVENT. (s/f). The E386 Mapping Drone – Event 38 Unmanned Systems. Recuperado el 20 de junio de 2019, de <https://event38.com/fixed-wing/e386-mapping-drone/>
- Flores-Verdugo, F., Moreno-Casasola, P., Agraz-Hernández, C. M., López-Rosas, H., Benítez-Pardo, D., & Travieso-Bello, A. C. (2017). La topografía y el hidropérido: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Botanical Sciences*, 80(80S), 33. <https://doi.org/10.17129/botsci.1755>
- Fondo para la Protección del Agua (FONAG). (206d. C.). *Historia de degradación del humedal Pugllahoma* - YouTube. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9A0jL0McxUE>
- Fondo para la Protección del Agua (FONAG). (2016). *Diseño de monitoreo del humedal Pugllahoma FONAG*. Recuperado de [http://infoagua-guayllabamba.ec/repositorio/web/files/Diseño del monitoreo de humedal.pdf](http://infoagua-guayllabamba.ec/repositorio/web/files/Diseño%20del%20monitoreo%20de%20humedal.pdf)
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Geospatial Data Abstraction Library (GDAL). (s/f). SENTINEL2 - Productos Sentinel-2. Recuperado el 6 de noviembre de 2019, de <https://gdal.org/drivers/raster/sentinel2.html>
- Granados, Y. Z. (s/f). *Manual para el postproceso de imágenes obtenidas a partir de una aeronave tripulada remotamente (drone) en los software Agisoft Photoscan y Pix4D*.
- Gundlach, J. (2012). Designing Unmanned Aircraft Systems. En *Designing Unmanned Aircraft Systems*. <https://doi.org/10.2514/4.868443>

- Hardin, P. J., & Hardin, T. J. (2010). Small-Scale Remotely Piloted Vehicles in Environmental Research. *Geography Compass*, 4(9), 1297–1311. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00381.x>
- Hribljan, J. A., Suarez, E., Bourgeau-Chavez, L., Endres, S., Lilleskov, E. A., Chimbolema, S., ... Chimner, R. A. (2017). Multidate, multisensor remote sensing reveals high density of carbon-rich mountain peatlands in the páramo of Ecuador. *Global Change Biology*, 23(12), 5412–5425. <https://doi.org/10.1111/gcb.13807>
- Hu, Q., Tang, Z., Woldt, W., & Smith III, J. (2018). *Using Unmanned Aerial System (UAS) for Playa Wetland Monitoring and Assessment*. Recuperado de <http://rwbjv.org/wp-content/uploads/2018/02/Using-UAS-for-Playa-Wetland-Monitoring-and-Assessment-Tang-Hu.pdf>
- Kato, M., Sonobe, T., Oyanagi, M., Yasuoka, Y., Tamura, M., & Hayashi, M. (2001). *ASTER Data Utilization for Wetland Mapping and Forest Mapping*. Recuperado de <https://crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/253kato.pdf>
- Mandujano, S., Pazmany, M., & Rísquez, A. (2017). *Drones : Una Nueva Tecnología Para El Estudio Y Monitoreo De Fauna Y Hábitats*. 10(November), 79–84.
- McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mesas, F., Torres, J., Clavero, I., García, A., Peña, J., Borra, I., & López, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by uav to support site-specific crop management. *Remote Sensing*, 7(10), 12793–12814. <https://doi.org/10.3390/rs71012793>
- MicaSense. (2018). *MicaSense Sensor User Guide* (p. 31). p. 31. Seattle.
- Montero, J. (2016). *AeroVironment presenta el sistema Quantix | ToDrone*. Recuperado de <https://www.todrone.com/quantix-sistema-no-tripulado-aerovironment/>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

- Orozco, O. (s/f). *Pendiente del terreno*. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/629/pendiente.pdf>
- Reads, C. (2019). *Nota técnica sobre el procesamiento fotogramétrico de imágenes multiespectrales captadas con drones usando la cámara Parrot Sequoia y el programa Agisoft PhotoScan Pro*. (March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11931.92965>
- Ruiz, J., Gallego, D., Peña, C., Molero, J., & Gómez, A. (2015). Fotogrametría aérea por dron en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en los castillos medievales del Campo de Montiel. *Virtual Archaeology Review*, 6(13), 5–19. <https://doi.org/10.4995/var.2015.4366>
- Samiappan, S., Turnage, G., Hathcock, L. A., & Moorhead, R. (2017). Mapping of invasive phragmites (common reed) in Gulf of Mexico coastal wetlands using multispectral imagery and small unmanned aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2861–2882. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1271480>
- Sardà-Palomera, F., Bota, G., Viñolo, C., Pallarés, O., Sazatornil, V., Brotons, L., ... Sardà, F. (2012). Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems. *Ibis*, 154(1), 177–183. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2011.01177.x>
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2010). Uso racional de los humedales: Conceptos y enfoques para el uso racional de los humedales. En *Curso Biodiversidad y Conservación de Humedales en la Región Metropolitana - Versión N° 16*. Suiza.
- Serco, Systems., G., Agency, E. S., & ESA. (s/f). Copernicus Open Access Hub. Recuperado el 6 de noviembre de 2019, de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Soria, I. F. (2016). *Evaluación de la calidad ecológica del Río Jatunhuayco (EPMAPS) utilizando comunidades de macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua*. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16736>
- Suárez, S. (2010). *Análisis Legal e Institucional de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Asentados en el Área de los humedales Abras de Mantequilla , La Segua e Isla Santay*. Quito-Ecuador.
- Unidad de Exhibición Biológica. (2013). *Humedales H O J A T E C N I C A N ° 3 E N E R O - J U N I O , 2 0 1 3 1 . ¿ Qué son los humedales?* Recuperado de www.facerunners.com

Valverde, S. A., Appel, A. F., & Rimolo-Donadio, R. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga.TEC*, (31), 4–4. Recuperado de https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/3475

Villarroel, A. (2016). Pendiente topografica. Recuperado el 8 de septiembre de 2019, de <https://es.slideshare.net/AIDAVILLARROEL1/pendiente-topografica-65644808>

Windy. (s/f). Windy: Reserva Ecológica Antisana previsión del clima. Recuperado de <https://www.windy.com/-0.592/-78.042?-1.218,-78.042,8>

Yuste, M., Vargas, N., & Yuste, N., Vargas, N., & Moya, J. (2013). Teledetección Ambiental de Alta Resolución mediante aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados. *Congreso Forestal Español*. Recuperado de http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/145

ANEXOS

ANEXO 1

NORMATIVA ECUATORIA PARA EL USO DE UAVS



DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL

RESOLUCIÓN No 251 / 2015

El Director General de Aviación Civil

Considerando:

Que, la Dirección General de Aviación Civil no dispone de una reglamentación que establezca requisitos para la Operación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS);

Que, con la finalidad de precautar la seguridad operacional en las actividades aéreas, usuarios del transporte aéreo y público en general, debido al incremento significativo de operaciones con Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS), es necesario establecer disposiciones generales para la operación de las Aeronaves antes citadas;

Que, de acuerdo con el Art. 6, numeral 3, literal a) de la Ley de Aviación Civil, publicada en el Registro Oficial No. S-435 del 11 de enero del 2007, se determina las atribuciones y obligaciones del Director General de Aviación Civil: "Dictar, reformar, derogar regulaciones técnicas, órdenes, reglamentos internos y disposiciones complementarias de la Aviación Civil, de conformidad con la presente Ley, el Código Aeronáutico, el Convenio sobre Aviación Civil Internacional y las que sean necesarias para la seguridad de vuelo, y la protección de la seguridad del transporte aéreo"; y,

En uso de las atribuciones legales,

RESUELVE:

Artículo Primero.- Aprobar el establecimiento de disposiciones complementarias que normen la Operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS), las mismas que se detalla a continuación:

Art. 1 Operaciones en las cercanías de un aeródromo

Se prohíbe la operación de las RPAS/UAS en espacios aéreos controlados.

La operación de las RPAS/UAS se mantendrá durante toda la duración del vuelo, a una distancia igual o mayor a 9 kilómetros (5 NM) de las proximidades de cualquier aeródromo o base aérea militar.

Art. 2 Altura máxima de vuelo

La operación de las RPAS/UAS no excederá en ningún momento una altura de vuelo de 400 pies (122 metros) sobre el terreno (AGL).

Art. 3 Horas de operación

Las RPAS/UAS serán operadas solamente en las horas comprendidas entre la salida y la puesta del sol; y en condiciones meteorológicas de vuelo visual (VMC), libre de nubes, neblina, precipitación o cualquier otra condición que obstruya o pueda obstruir el contacto visual permanente con la RPAS/UAS.

Art. 4 Responsabilidad por la operación

- (a) La persona que opera los controles de las RPAS/UAS será responsable por la operación general de la misma durante todo el vuelo, en forma solidaria con el explotador o propietario de la aeronave.

Art. 5 Integridad fisiológica del operador de una RPA

Ninguna persona operará los controles de una RPAS/UAS si:

- (a) Se encuentra fatigado, o si considera que pudiera sufrir los efectos de la fatiga durante la operación;
- (b) Se encuentra bajo el efecto del consumo de bebidas alcohólicas, o de cualquier droga que pudiera afectar sus facultades para operar los controles de manera segura.

Art. 6 Funciones de automatización

Si las RPAS/UAS tienen la capacidad de realizar vuelo automático, esta función podrá ser utilizada solamente si le permite al operador de los controles intervenir en cualquier momento para tomar el control inmediato de la aeronave.

Art. 7 Limitaciones

La persona que opera los controles de una RPAS/UAS es responsable por asegurarse que la misma sea operada de acuerdo con las limitaciones operacionales establecidas por el fabricante.

Art. 8 Seguros

El propietario o explotador de las RPAS/UAS están en la obligación de responder por los daños causados a terceros, como resultado de sus actividades de vuelo, para lo cual debe contratar la póliza de seguros de responsabilidad civil legal a terceros en los montos mínimos establecidos en la tabla que consta a continuación:

De 02 a 25 Kg. de masa máxima de despegue (MTOW)	USD 3.000,00
De más de 25Kg. masa máxima de despegue (MTOW)	USD 5.000,00



Resolución No. /2015

251 Página 3

Art. 9 Cumplimiento con las leyes y reglamentos locales

El cumplimiento de estas disposiciones, no exime al operador de las RPAS/UAS de cumplir con las leyes y reglamentos locales aplicables.

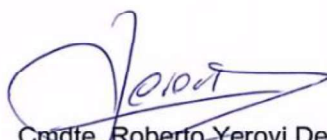
Art. 10 Consideración final

Cualquier aspecto no considerado en la presente resolución, será analizado y resuelto por la Autoridad Aeronáutica Civil.

Artículo Segundo.- La presente Resolución, sin perjuicio de su publicación en el Registro Oficial, entrará en vigencia a partir de su aprobación.

Artículo Tercero.- Encárguese a la Subdirección General de Aviación Civil la ejecución, control y aplicación de la presente Resolución.

Comuníquese y publíquese.- Dada en la Dirección General de Aviación Civil en Quito, Distrito Metropolitano, el 17 SET. 2015



Cmdte. Roberto Yerovi De la Calle
Director General de Aviación Civil

CERTIFICO que expidió y firmó la resolución que antecede el Cmdte. Roberto Yerovi De la Calle, Director General de Aviación Civil, en la ciudad de Quito, 17 SET. 2015



Dra Rita Huilca Cobos
Directora de Secretaría General DGAC

Mgs. Byron Carrión
Sr. Fidel Guitarra
Ing. Edgar Gallo
2015-09-17

ANEXO 2

REPORTE DEL PROCESAMIENTO EN AGISOFT

ACHA

Informe de procesamiento

16 November 2019



Datos del levantamiento

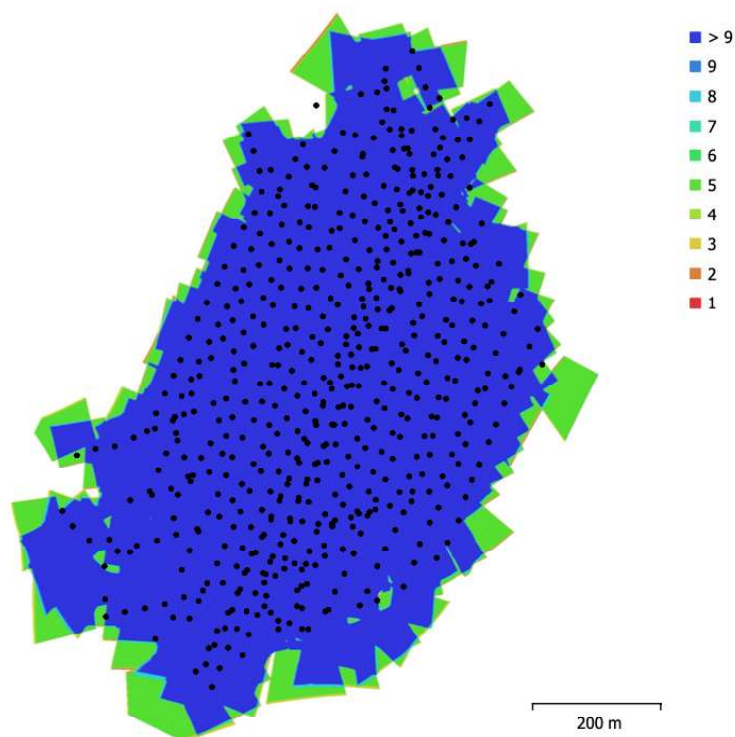


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	2,950	Imágenes alineadas:	2,850
Altitud media de vuelo:	103 m	Puntos de paso:	1,891,219
Resolución en terreno:	6.97 cm/pix	Proyecciones:	8,208,868
Área cubierta:	0.583 km ²	Error de reproyección:	0.536 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
RedEdge-M, Blue (5.5mm)	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras	Sí
RedEdge-M, Green (5.5mm)	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras	Sí
RedEdge-M, Red (5.5mm)	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras	Sí
RedEdge-M, Red edge (5.5mm)	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras	Sí
RedEdge-M, NIR (5.5mm)	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras	Sí

Calibración de cámara

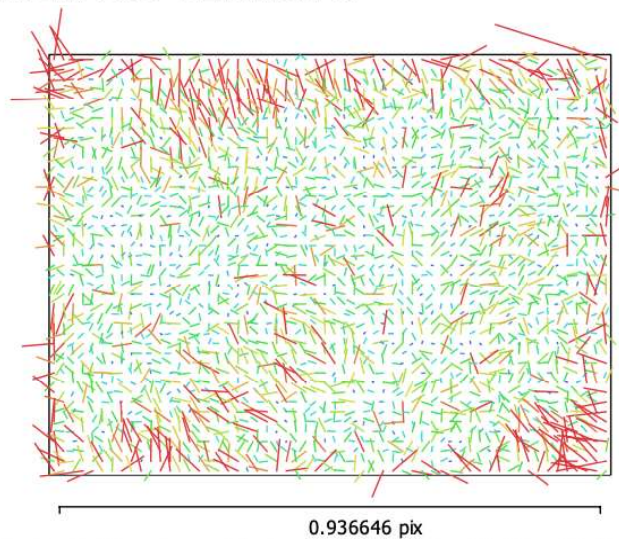


Fig. 2. Gráfico de residuales para RedEdge-M, Blue (5.5mm).

RedEdge-M, Blue (5.5mm)

590 imágenes, precalibrada

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1442.17	0.025	1.00	-0.02	-0.11	-0.29	0.27	-0.24	0.00	0.01
Cx	-14.5633	0.02		1.00	0.00	0.01	-0.01	0.01	0.89	0.00
Cy	7.12359	0.016			1.00	-0.00	-0.01	0.01	0.00	0.71
K1	-0.0985351	0.00014				1.00	-0.97	0.92	0.00	-0.01
K2	0.146264	0.0011					1.00	-0.99	-0.00	-0.00
K3	-0.0232909	0.0024						1.00	0.00	0.00
P1	6.90242e-005	4.3e-006							1.00	0.00
P2	0.000647275	3.2e-006								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

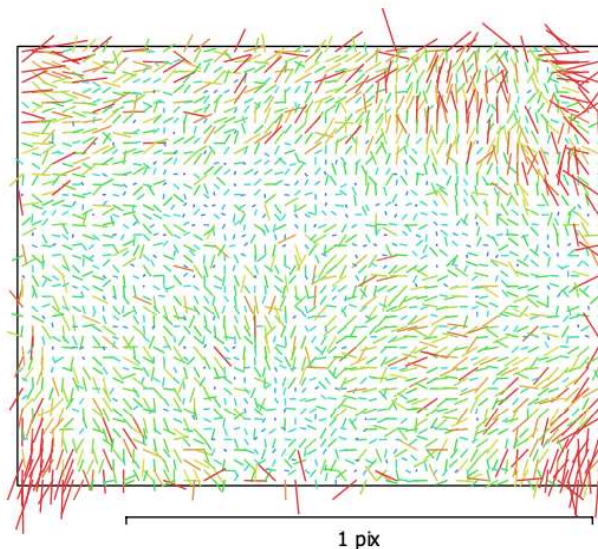


Fig. 3. Gráfico de residuales para RedEdge-M, Green (5.5mm).

RedEdge-M, Green (5.5mm)

590 imágenes, precalibrada

Tipo
Cuadro

Resolución
1280 x 960

Distancia focal
5.5 mm

Tamaño de píxel
3.75 x 3.75 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1440.37	0.025	1.00	-0.02	-0.10	-0.28	0.26	-0.23	0.00	0.01
Cx	-20.0988	0.02		1.00	0.00	0.01	-0.01	0.02	0.89	-0.00
Cy	7.34633	0.015			1.00	-0.01	-0.00	-0.00	0.00	0.71
K1	-0.102046	0.00013				1.00	-0.97	0.92	0.00	-0.01
K2	0.156114	0.001					1.00	-0.98	-0.00	0.00
K3	-0.0464923	0.0023						1.00	-0.00	-0.00
P1	0.000329388	4.1e-006							1.00	0.00
P2	-0.0008107	3.1e-006								1.00

Tabla 3. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

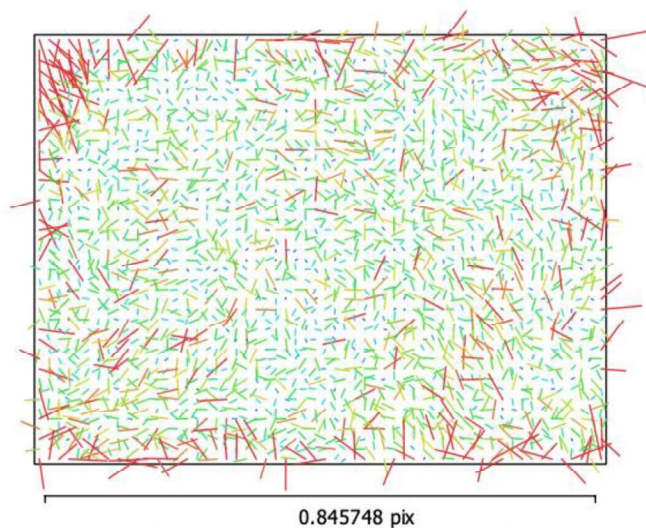


Fig. 4. Gráfico de residuales para RedEdge-M, Red (5.5mm).

RedEdge-M, Red (5.5mm)

590 imágenes, precalibrada

Tipo
Cuadro

Resolución
1280 x 960

Distancia focal
5.5 mm

Tamaño de píxel
3.75 x 3.75 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1445.89	0.025	1.00	-0.02	-0.12	-0.28	0.26	-0.23	0.00	0.02
Cx	-15.3455	0.02		1.00	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.89	-0.00
Cy	-25.6127	0.015			1.00	0.02	-0.03	0.03	-0.00	0.70
K1	-0.109027	0.00013				1.00	-0.97	0.92	0.00	-0.02
K2	0.180506	0.001					1.00	-0.98	-0.00	0.01
K3	-0.0894674	0.0023						1.00	0.00	-0.02
P1	-1.20713e-005	4.1e-006							1.00	0.00
P2	-0.000402615	3.1e-006								1.00

Tabla 4. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

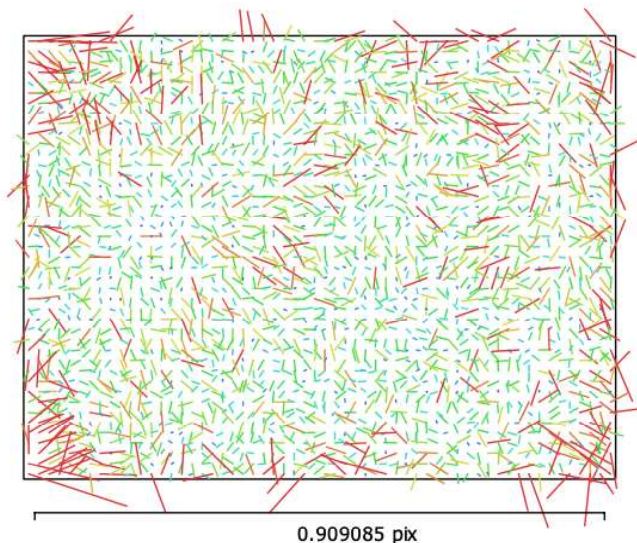


Fig. 5. Gráfico de residuos para RedEdge-M, Red edge (5.5mm).

RedEdge-M, Red edge (5.5mm)

590 imágenes, precalibrada

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1452.24	0.025	1.00	-0.02	-0.11	-0.28	0.26	-0.23	-0.00	0.02
Cx	-28.3032	0.02		1.00	-0.00	0.01	-0.01	0.02	0.89	-0.01
Cy	-21.5809	0.016			1.00	0.01	-0.02	0.02	-0.01	0.71
K1	-0.101699	0.00013				1.00	-0.97	0.92	0.00	-0.02
K2	0.155631	0.001					1.00	-0.98	-0.01	0.01
K3	-0.0549645	0.0023						1.00	0.00	-0.01
P1	-0.000478638	4.2e-006							1.00	0.00
P2	-7.55542e-006	3.2e-006								1.00

Tabla 5. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

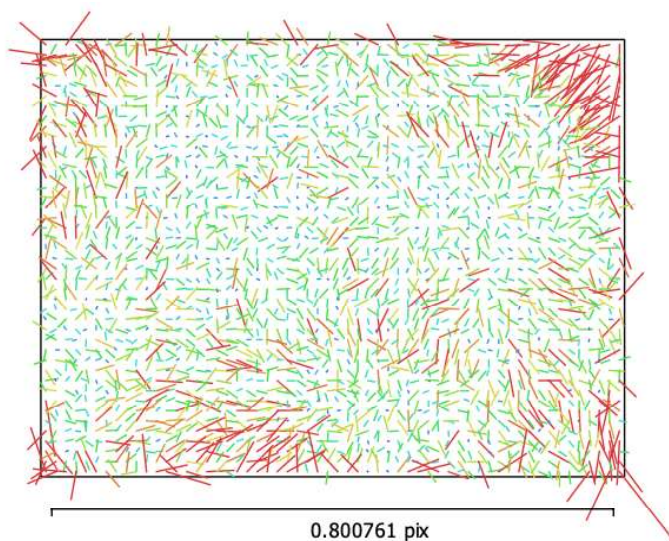


Fig. 6. Gráfico de residuales para RedEdge-M, NIR (5.5mm).

RedEdge-M, NIR (5.5mm)

590 imágenes, precalibrada

Tipo **Cuadro** Resolución **1280 x 960** Distancia focal **5.5 mm** Tamaño de píxel **3.75 x 3.75 micras**

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1449.16	0.024	1.00	-0.01	-0.13	-0.25	0.23	-0.20	0.01	0.02
Cx	-19.4062	0.018		1.00	0.00	0.01	-0.01	0.01	0.86	-0.01
Cy	-21.2794	0.014			1.00	0.02	-0.03	0.03	0.00	0.67
K1	-0.106942	0.00012				1.00	-0.97	0.92	0.00	-0.02
K2	0.13946	0.00088					1.00	-0.98	-0.00	0.01
K3	-0.0164426	0.002						1.00	-0.00	-0.02
P1	0.000638976	3.5e-006							1.00	0.00
P2	-0.000759827	2.7e-006								1.00

Tabla 6. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

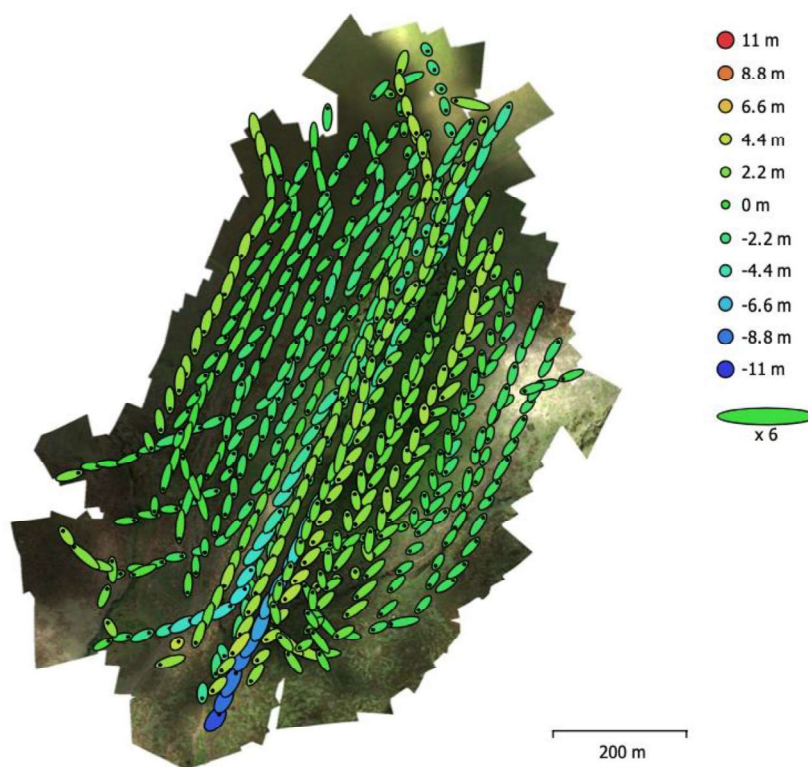


Fig. 7. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
2.13933	3.45264	2.25101	4.06171	4.64376

Tabla 7. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Longitud, Y - Latitud, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

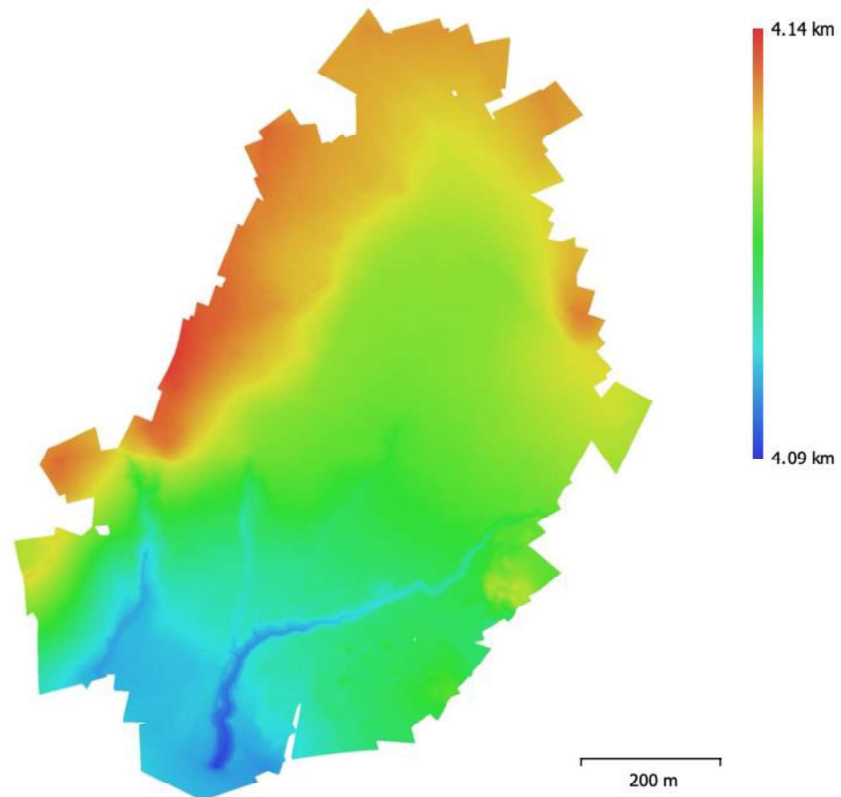


Fig. 8. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 13.9 cm/pix
Densidad de puntos: 51.4 puntos/m²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	2950
Cámaras orientadas	2850

Formas

Políneas	221
Polígonos	3510
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG::32717)
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	1,891,219 de 2,060,005
RMS error de reproyección	0.147898 (0.536383 pix)
Error de reproyección máximo	0.574743 (21.0561 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	3.28886 pix
Colores de puntos	1 banda, uint16
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	4.91026

Parámetros de orientación

Precisión	Alta
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de paso por foto	4,000
Filtrar puntos por máscaras	No
Enmascarar puntos de paso	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	2 horas 1 minuto
Tiempo de orientación	16 minutos 11 segundos

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	46 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

Mapas de profundidad

Número	570
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	1 hora 56 minutos

Nube de puntos densa

Puntos	26,219,206
Colores de puntos	5 bandas, uint16

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	1 hora 56 minutos

Parámetros de generación de la nube densa

Tiempo de procesamiento	9 minutos 43 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

Modelo

Generales

Caras	5,170,872
Vértices	2,590,702
Colores de vértices	5 bandas, uint16

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Tiempo de procesamiento	1 hora 56 minutos

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Bajorrelevé / terreno
Datos fuente	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	1 minuto 41 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

Modelo digital de elevaciones

Tamaño	8,633 x 10,077
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG::32717)

Parámetros de reconstrucción

Datos fuente	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	2 minutos 23 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

Ortomosaico

Tamaño	13,177 x 16,375
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG::32717)
Colores	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Tiempo de procesamiento	10 minutos 40 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

Transformar raster

Expresión	$(B2 - B5) / (B2 + B5)$
-----------	-------------------------

Software

Versión	1.5.5 build 9097
Plataforma	Windows 64