

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MONITOREO MULTITEMPORAL DEL HUMEDAL PUGLLOHUMA,
PERTENECIENTE AL ÁREA DE CONSERVACIÓN HÍDRICA
ANTISANA (ACHA), POR MEDIO DE IMÁGENES CAPTURADAS
DESDE UNA AERONAVE NO TRIPULADA DE ALA FIJA (UAV).**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL EN MENCIÓN HIDRÁULICA**

EDUARDO FABIÁN SALGADO RODRÍGUEZ
eduardo.salgado@epn.edu.ec

Director: PhD. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
xavier.zapata@epn.edu.ec

Codirector: PhD. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES
esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2023

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Salgado Rodríguez Eduardo Fabián, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada 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 por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



EDUARDO FABIÁN SALGADO RODRÍGUEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Eduardo Fabián Salgado Rodríguez, bajo mi supervisión.



Dr. Xavier Zapata Ríos

DIRECTOR



Dr. Esteban Valencia Torres

CODIRECTOR

DEDICATORIA

A mi madre Mercy y mi padre Eduardo

A mi familia por ser la fuerza que guía mi camino.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes me han brindado su apoyo incondicional y sabios consejos a lo largo de toda mi carrera universitaria. Su constante motivación y confianza en mis habilidades han sido esenciales para superar los desafíos y perseverar en la búsqueda de mis metas.

A mi novia Neyma, quien ha estado a mi lado en cada paso de este viaje, ofreciéndome amor, apoyo y comprensión, le extiendo mi más profundo agradecimiento.

Asimismo, agradezco a mis hermanas Lore y Vivi, cuya presencia ha sido una fuente constante de inspiración y fortaleza.

A mis profesores y mentores, les agradezco por impartirme sus conocimientos y por guiarme en mi formación académica. Su dedicación y pasión por la enseñanza han dejado una huella imborrable en mi desarrollo profesional y personal.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este proyecto de tesis. Su colaboración, apoyo y participación han sido fundamentales para el éxito de esta tesis.

A todos ustedes, mi familia, amigos y colaboradores, les dedico mi más profundo agradecimiento. Su amor, aliento y respaldo han sido pilares fundamentales en mi camino. Sin su apoyo, este logro no hubiera sido posible. Gracias por creer en mí y por ser parte de este sueño hecho realidad.

CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	VI
CERTIFICACIÓN	VII
DEDICATORIA.....	VIII
AGRADECIMIENTO.....	IX
CONTENIDO.....	X
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABLAS.....	XVI
LISTA DE ANEXOS	XVII
SIGLAS	XVIII
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
PRESENTACIÓN	XXI
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO II	6
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO	6
2.1. ESTADO DEL ARTE	6
2.1.1. EJE DE INVESTIGACIÓN	6
2.1.2. DOCUMENTOS REVISADOS	6

2.1.3. DIAGNOSTICO.....	8
2.2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.2.1. SISTEMAS AÉREO NO TRIPULADO (UAS)	10
2.2.2. VEHÍCULO NO TRIPULADO (UAV).....	10
2.2.3. ESTACIÓN DE CONTROL A TIERRA	11
2.2.4. TELEDETECCIÓN.....	12
2.2.5. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	12
2.2.6. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	12
2.2.7. FIRMAS ESPECTRALES	13
2.2.8. ÍNDICES ESPECTRALES	14
2.2.9. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN (CREACIÓN DE SUPERFICIES).....	16
CAPÍTULO III	18
METODOLOGÍA.....	18
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	19
3.2. PREPARACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS.....	21
3.2.1. DRON COMERCIAL DE ALA FIJA EVENT386 (UAV)	21
3.2.2. CAMARA MULTIESPECTRAL MICASENSE REDEEDGE-MX	22
3.2.3. ESTACION DE TIERRA Y SISTEMAS DE COMUNICACIÓN.....	23
3.2.4. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS	24
3.3. TOMA DE IMÁGENES	25
3.4. MEDICIÓN DE NIVEL FREÁTICO	27
3.5. INFORMACIÓN DE CAMPO MEDIANTE EL METODO DE LA BOTA	28
3.6. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN SOFTWARE PIX4D	30
3.7. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.....	33
CAPÍTULO IV	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1. GEORREFERENCIACIÓN DE LOS MAPAS	38

4.2.	MAPA A COLOR VERDADERO	40
4.2.1.	ORTOMOSAICOS RGB	40
4.3.	MAPAS DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS	43
4.3.1.	MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE (DSM)	43
4.3.2.	MAPA DE PENDIENTES.....	45
4.3.3.	CURVATURA	46
4.3.4.	CURVAS DE NIVEL Y PERFILES DE ELEVACIÓN	48
4.4.	ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL NIVEL FREÁTICO	53
4.4.1.	VARIACIONES ESTACIONALES DEL NIVEL FREÁTICO	53
4.4.2.	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN PARA EL DEM FREÁTICO	55
4.4.3.	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO	56
4.4.4.	ANÁLISIS MULTITEMPORAL MEDIANTE EL MÉTODO DE LA BOTA	59
4.5.	MAPAS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	61
4.6.1.	MAPAS NDVI.....	61
4.6.2.	MAPAS SAVI.....	64
4.6.	MAPAS DE ÍNDICES DE AGUA	67
4.7.1.	MAPAS NDWI.....	67
4.7.	COMPARACIÓN MULTITEMPORAL DE ÍNDICES ESPECTRALES	69
4.8.1.	ANÁLISIS MULTIVARIANTE DE NIVELES FREÁTICOS E ÍNDICES ESPECTRALES.....	71
4.8.	METODOLOGÍA DE MONITOREO EN REGIONES ANDINAS	78
4.9.	DISCUSIÓN	78
	CAPÍTULO V	83
	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	83
5.1.	CONCLUSIONES.....	83

5.2. TRABAJOS FUTUROS.....	85
REFERENCIAS.....	87
ANEXOS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de estación de control a tierra.....	11
Figura 2. Onda electromagnética.	13
Figura 3. Clasificación del espectro electromagnético por frecuencias y sus aplicaciones según la longitud de onda.....	13
Figura 4. Metodología de toma de imágenes en el humedal Pugllohuma.....	19
Figura 5. Ubicación del Humedal Pugllohuma en el Área de Conservación Hídrica Artesana (ACHA).	20
Figura 6. Equipos y materiales utilizados en la metodología.....	21
Figura 7. Calibración del dron de ala fija EVENT386.	25
Figura 8. Lanzamiento de dron EVENT386 en posición de despegue.	26
Figura 9. Captura de pantalla del software Mission Planner en el sobrevuelo del dron.	27
Figura 10. Pozo de control de medición freático.	28
Figura 11. Evaluación en sitio del método de la bota en el humedal Pugllohuma.	29
Figura 12. Transectos utilizados para la medición en campo del método de la bota.	30
Figura 13. Mapa de ubicación del lugar de estudio.	31
Figura 14. Opciones de procesamiento de la plataforma Pix4d.	32
Figura 15. Nube de puntos del procesamiento de imágenes.	33
Figura 16. Composición de bandas en el mes de 04 de febrero de 2021.	34
Figura 17. Calculo de índices multiespectrales en el mes de 04 de febrero de 2021.	35
Figura 18. Corrección de mapas con respecto a piezómetros.	40
Figura 19. Imágenes RGB de los distintos meses: 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021 en el humedal Pugllohuma.	42
Figura 20. Mapa DSM del humedal Pugllohuma.	44
Figura 21. Mapa de pendientes del humedal Pugllohuma.	46

Figura 22. Mapa de curvatura del humedal Pugllohuma.	48
Figura 23. Mapa de curvas de nivel y delimitación de los perfiles de elevación del humedal Pugllohuma.....	50
Figura 24. Perfiles de elevaciones a lo largo de los mayores ejes.	52
Figura 25. Medición de nivel freático en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.....	54
Figura 26. Comparación de métodos de interpolación para generación de nivel freático.	55
Figura 27. Elevaciones de nivel freático en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.....	57
Figura 28. Interpolación del método de la Bota en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.....	60
Figura 29. Mapa NDVI derivado de fotografías tomadas en los meses de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.	62
Figura 30. Mapa SAVI derivado de fotografías tomadas en los meses de febrero sin corrección, julio y agosto de 2021.	65
Figura 31. Mapa SAVI con distintos rangos derivado sin corrección de fotografías tomadas en los meses de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.....	66
Figura 32. Mapa NDWI derivado de fotografías tomadas en los meses de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.	68
Figura 33. Gráficos de dispersión de índices de índices de vegetación vs altura de agua con nivel freáticos respecto al nivel del mar y pendientes del terreno de 04 de Febrero, 07 de Julio y 04 de Agosto de 2021.....	74
Figura 34. Comparación de índices de vegetación y de agua en referencia a los pozos del Humedal Pugllohuma en 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.	77
Figura 35. Metodología generalizada para humedales altoandinos.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación bibliográfica pertinente al presente proyecto de titulación...	7
Tabla 2. Características del dron de ala fija EVENT386.	22
Tabla 3. Características de cámara multiespectral Micasense RedEdge-MX	23
Tabla 4. Puntos Georreferenciados de los piezómetros instalados por el FONAG. Sistema UTM 17S. Datum 1984.....	38
Tabla 5. Datos físicos de procesamiento de imágenes de 2021.	41
Tabla 6. Distribución de rangos y porcentajes de cobertura mapa de niveles freáticos en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.	58
Tabla 7. Distribución de rangos y porcentajes de cobertura del mapa NDVI en 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.	63
Tabla 8. Distribución de rangos y porcentajes de cobertura del mapa NDWI en 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.	69
Tabla 9. Comparación de índices de vegetación y de agua en el Humedal Pugllohuma.	70
Tabla 10. Ecuaciones lineales obtenidas de los datos de dispersión en los meses de 04 de Febrero, 07 de Julio y 04 de Agosto de 2021.....	75

LISTA DE ANEXOS

<u>ANEXO 1.....</u>	<u>96</u>
<u>REGLAMENTO DE OPERACIÓN DE UAV</u>	<u>96</u>
<u>ANEXO 2.....</u>	<u>115</u>
<u>DATOS DE MICRO TOPOGRAFIA POR PARTE DEL FONAG</u>	<u>115</u>
<u>ANEXO 3.....</u>	<u>117</u>
<u>DATOS EN CAMPO DEL METODO DE LA BOTA</u>	<u>117</u>
<u>ANEXO 4.....</u>	<u>119</u>
<u>TABLAS OBTENIDAS DEL ANALISIS CON PÍXELES Y AREAS.</u>	<u>119</u>

SIGLAS

ACHA	Área de Conservación Hídrica Artesana
BLUE	Banda Azul
DEM	Modelo Digital de Elevación
DSM	Modelo Digital de Superficie
FAA	Administración Federal de Aviación
FONAG	Fondo para la Protección del Agua
GCS	Estación de Control en Tierra
GI-ATA	Grupo de Investigación Aerodinámica y Termo fluidos Aplicados
GIS	Sistema de Información Geográfica
GREEN	Banda Verde
GSD	Distancia de Muestreo en el Terreno
IDW	Ponderación Inversa de Distancia
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
MAE	Ministerio del Ambiente Ecuador
NIR	Infrarrojo Cercano
NDVI	Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación
NDWI	Índice Normalizado de Diferencia de Agua
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
SIG	Sistema de Información Geográfica
RED	Banda Roja
UAS	Sistemas Autónomos No Tripulados
UAV	Aeronave No Tripulada
UTM	Universal Transverse Mercator

RESUMEN

La gestión de los recursos naturales requiere herramientas de planificación para que los recursos de la tierra puedan regularse de manera óptima. Esta gestión permite garantizar su disponibilidad para las generaciones futuras. Entre los recursos naturales fundamentales se encuentra el agua, la cual existe sobre el planeta en múltiples formas. Una de ellas es a través del almacenamiento de agua por los humedales. Por lo tanto, es fundamental comprender el estado de los humedales naturales; sin embargo, los cambios en el uso de suelo, principalmente la expansión de agricultura y actividades de pastoreo, han disminuido la cantidad de humedales en el planeta, entre ellos los ubicados en los países altoandinos como los páramos de Sudamérica.

En este estudio, se proponen métodos de evaluación mediante el análisis de mapas interactivos que determinan índices espectrales utilizando imágenes multiespectrales de UAV para evaluar la fenología de vegetación de los humedales de manera multitemporal. Se adoptó como área de trabajo el Humedal Puglllohuma perteneciente al Área de Conservación Hídrica Antisana, ubicado en la parte norte de los Andes al norte del Ecuador y a medio grado de latitud sur de la línea ecuatorial.

Como resultado de la investigación se obtuvieron los índices de vegetación (NDVI y SAVI), los cuales se basan en la interacción fenológica de la vegetación existente en el lugar; estos índices han demostrado ser eficaces para determinar el estado de la vegetación, identificando un área de alta densidad vegetativa de 0,150 Km².

Por otra parte, los cuerpos de agua y humedad de la vegetación se evaluaron a partir del índice espectral NDWI; siendo el índice con parámetros de área de aguas superficiales de 0,169 Km². Además, se estableció una zona de saturación máxima de agua en el humedal del 69.89% a partir del nivel freático, mapas topográficos e índices espectrales de agua. Con el análisis multivariante se estableció una ecuación general que relaciona los índices espectrales y la altura freática con respecto al nivel del mar.

Palabras clave: Índices espectrales, Zonas de saturación, Nivel freático, Contenido de clorofila, Humedales

ABSTRACT

Effective regulation of Earth's resources requires the utilization of planning techniques within the domain of natural resource management. This approach ensures the continued availability of resources for future generations. Water, a vital natural resource, is found in several states on Earth. One method involves the retention of water by wetland ecosystems. Hence, it is vital to comprehend the current condition of natural wetlands. Nevertheless, alterations in land utilization, along with the expansion of agricultural and grazing practices, have resulted in a decline in the global wetland areas, especially those situated in the high Andes like the paramos of South America.

This research presents a new methodology for analyzing vegetation phenology in a multi-temporal manner. The strategy involves the use of interactive map analysis and spectral indices derived from multispectral images captured by UAV. The selected research site for this study is the Pugllohuma Wetland, which is situated within the Antisana Water Conservation Area. Located in the northern Andes of Ecuador, slightly below the equator by a latitude of 0.5 degrees, this wetland has been chosen as the main area of focus for our research endeavor.

The investigation resulted on vegetation indices (NDVI and SAVI) that rely on the phenological state of the vegetation present in the area. These indices have demonstrated their efficacy in assessing vegetation conditions and have successfully identified a 0.150 km² region with high vegetative density. In contrast, the assessment of bodies of water and vegetation humidity was conducted using the NDWI spectral index, which yielded a surface water area parameter of 0.169 km². Furthermore, a maximum water saturation zone of 69.89% was determined in the wetland through the utilization of the water table, topographic maps, and spectral water indices. Through the utilization of multivariate analysis, a comprehensive equation was derived, establishing a connection between spectral indices and the groundwater table in relation to sea level.

Keywords: *Spectral indices, Saturation zones, Phreatic level, Chlorophyll content, Wetlands.*

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de titulación establece una metodología de monitoreo para evaluar el estado del humedal Pugllohuma ubicado en la parte norte de los Andes ecuatorianos a través de un análisis comparativo multitemporal entre índices espectrales, mapas topográficos y datos medidos en campo. Se utilizaron con este fin imágenes capturadas con un dron de ala fija equipado con un sensor multiespectral. La tesis se divide en cinco capítulos que abarcan desde la introducción hasta los trabajos futuros.

El Capítulo I proporciona una introducción al tema, antecedentes, objetivos, justificación e hipótesis de la investigación.

En el Capítulo II, se presenta el marco teórico que incluye información sobre la zona de estudio, la teledetección y la teoría de los índices espectrales utilizados en el análisis de la vegetación. Además, se realiza una síntesis del estado del arte basado en la literatura relevante para el proyecto.

El Capítulo III detalla la metodología desarrollada, desde los prerequisites establecidos para la toma de imágenes hasta los equipos utilizados y el procesamiento de mapas para la generación de los mapas multitemporales de índices espectrales y del Modelo Digital del Terreno (DSM).

En el Capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes y se generan diversos mapas temáticos a partir de los mapas multitemporales de reflectancia y del DSM. Además, se detallan los análisis realizados utilizando los datos recopilados en campo para verificar los resultados presentados. Se expone la metodología para el monitoreo multitemporal utilizando drones de ala fija y sensores multiespectrales para el monitoreo en páramos andinos.

El Capítulo V incluye las principales contribuciones y conclusiones obtenidas, así como los posibles trabajos futuros que se pueden seguir a partir de este proyecto.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Se ha observado una preocupante degradación de los humedales a nivel mundial, incluyendo Sudamérica, en los últimos años. De acuerdo con datos de la convención Ramsar, desde 1970 se estima que ha habido una disminución del 81% en la diversidad de especies de humedales en los continentes (Gardner et al., 2018). En Sudamérica, se ha registrado un deterioro del 32% en los ecosistemas de humedales, lo cual es un valor significativo que debe ser considerado debido a su impacto en el clima global (Hu et al., 2017).

Los humedales desempeñan múltiples funciones ecológicas y económicas clave. Por ejemplo, contribuyen a la captación de agua, al almacenamiento de carbono gracias a la productividad de las plantas y a la descomposición de materia orgánica (Suárez et al., 2016). En Sudamérica, los humedales altoandinos tienen un papel fundamental en la provisión de agua potable para ciudades como Bogotá, Lima, Quito y Sucre (Gardner et al., 2018). Además, la reserva biológica de páramos, que abarca cerca de 370 millones de hectáreas, ha sido valorada en 115.000 millones de dólares, lo que equivale a aproximadamente un tercio del PIB de los países de la Comunidad Andina de Naciones (Comunidad Andina [CAN], 2008). Se estima que la pérdida anual para la CAN en el año 2025 será de aproximadamente 30.000 millones de dólares debido a la degradación de los humedales.

En el caso de Ecuador, los ecosistemas ocupan alrededor de 12.600 km², lo que representa sólo el 5% del territorio nacional, y desempeñan un papel vital en la distribución de agua potable en la región de la Sierra ecuatoriana (Mena & Medina, 2001). La ciudad de Quito, como muestra representativa, depende en gran medida de estos humedales, con un 85% de su agua proveniente de ellos. Además, se anticipa que el sistema de La Mica, que abarca 8.406 ha, será el principal proveedor de agua para cerca de 657.000 habitantes hacia el año 2040 (Andrade et al., 2019; Empresa Publica Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, 2020).

En el Parque Nacional Antisana que esta ubicada el sistema La Mica resaltan la importancia de estos ecosistemas para la provisión y almacenamiento de agua, especialmente para zonas urbanas como el Distrito Metropolitano de Quito. Sin embargo, el cambio climático y sus efectos en el incremento de la temperatura global han causado serias repercusiones en estas zonas, siendo una de las más alarmantes la notable reducción del 25% de la masa de los glaciares andinos en los últimos 25 años (López, 2012). Estos glaciares, que juegan un papel esencial en la acumulación y almacenamiento del agua para los humedales, están viéndose amenazados, lo que, a largo plazo, podría resultar en una disminución significativa en el suministro de agua para millones de personas (Coudrain et al., 2005).

En este contexto ha conllevado evaluar el estado y comportamiento de los ecosistemas altoandinos utilizando herramientas tecnológicas como los Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) e imágenes satelitales. Estas herramientas proporcionan información valiosa para comprender el estado de dichos ecosistemas y contribuyen a su monitoreo y conservación (Coudrain et al., 2005; Hu et al., 2017).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar de forma multitemporal la fenología del humedal Pugllohuma, perteneciente al Parque Nacional Antisana (ACHA), mediante el análisis de mapas multitemporales que establezcan los índices espectrales con el uso de una aeronave no tripulada (UAV).

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar morfológicamente el humedal Pugllohuma mediante el uso de un modelo de superficie digital (DSM) e identificar el sistema de drenaje del humedal.
- Calcular índices espectrales multitemporales por medio del software ArcGIS Pro para entender las dinámicas espaciales y temporales del humedal.

- Establecer una metodología validada de monitoreo de humedales altoandinos, metodología que pueda ser aplicada a lugares con características similares al área de estudio.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La teledetección, como herramienta de monitoreo, cuenta con diversas plataformas de recolección de datos que ofrecen variadas resoluciones espaciales, espectrales, radiométricas y temporales. Esto ha permitido la medición de diversas variables de biodiversidad (Diaz et al., 2010). Por ejemplo, en el caso específico del monitoreo de humedales, existen tres tipos de metodologías para evaluar, clasificar y comprobar el estado de los humedales a través de imágenes aéreas: plataformas satelitales, aeronaves civiles y sistemas autónomos no tripulados (UAS) (Morales, 2020; Ojeda et al., 2017).

En este contexto, se han evaluado las ventajas y desventajas de diversas metodologías de teledetección para la evaluación de los humedales (Bradley et al., 2006; Coudrain et al., 2005; Hu et al., 2017). Las imágenes satelitales permiten cubrir vastas extensiones, pero enfrentan restricciones en zonas montañosas debido a su resolución espacial limitada y la interferencia de la nubosidad (Nex & Remondino, 2013). Por su parte, las imágenes capturadas desde aeronaves civiles ofrecen mayor precisión pero a un coste operativo más elevado y con una logística compleja (Diaz et al., 2010). Los UAVs, por otro lado, pueden proporcionar imágenes de alta resolución con frecuencia temporal y a un costo operativo reducido, aunque su alcance está confinado a áreas menores (Matese et al., 2015; Riou & Seyler, 1997). No obstante, la captura de imágenes mediante UAVs ha ganado relevancia en el monitoreo de humedales por su capacidad para ofrecer una cobertura amplia y resolución espacial variada, que facilita la identificación de patrones y la detección de áreas de saturación (Atkinson et al., 2012).

Los índices espectrales se han implementado para la evaluación del estado hidrológico de la vegetación en humedales (Boon et al., 2016), utilizando diversas métricas biofísicas asociadas a la vegetación que describen la biomasa del área, el índice foliar y la cobertura vegetal (Paz et al., 2011). El índice de vegetación

normalizada (NDVI) es comúnmente utilizado para medir la energía absorbida y emitida por la vegetación (Guerschman et al., 2009).

Estudios que han involucrado el uso de UAVs en el monitoreo de ecosistemas incluyen la investigación en el páramo altoandino de Chingaza (Colombia), donde se identificó el estado de la biodiversidad y se detectaron indicadores de estrés biótico en frailejones utilizando índices espectrales (Martín et al., 2019). En Caldas (Colombia), el humedal El Ocho fue objeto de monitoreo con sensores aerotransportados para establecer una metodología de cobertura vegetal en humedales altoandinos (Peláez, 2017).

El Fondo para la protección del agua (FONAG) ha llevado a cabo proyectos de conservación, mantenimiento y recuperación de fuentes hídricas basados en ciencia. Un ejemplo destacado es la hacienda Antisana, adquirida en 2011 por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), donde se han instalado piezómetros para el monitoreo permanente de un humedal y para estudiar trabajos de restauración, registrando el nivel freático en el campo (FONAG., 2016).

Como contribución a la temática del monitoreo de humedales, la Escuela Politécnica Nacional ha desarrollado tesis de pregrado. Se han realizado trabajos previos en el monitoreo del humedal Pugllohuma utilizando un dron de ala fija e imágenes satelitales para establecer la micro topografía y mapas temáticos de la zona de estudio. Las condiciones climáticas en el lugar no son favorables, por lo que las imágenes satelitales presentaron nubosidad por encima del 60 % y un tamaño de píxel de 10 m/píxel, en contraste con el UAV, que tuvo un tamaño de píxel de 6 cm/píxel, lo que impidió la comparación de las imágenes. Se generaron mapas temáticos, como el modelo digital de elevaciones y las zonas de saturación, en comparación con los datos obtenidos en campo (Espinel, 2019). Sin embargo, se hizo énfasis en el análisis cuantitativo y cualitativo de la cobertura vegetal y la saturación del suelo utilizando índices espectrales (Palma, 2020). Este estudio propone ajustar y aplicar una metodología de análisis multitemporal con transectos para una evaluación cualitativa del humedal, validando los índices espectrales con los datos obtenidos en campo.

Respecto al monitoreo con UAVs, se han seleccionado modelos actuales que brindan una alternativa para la captura de imágenes y la orientación mediante sensores, que establecen la ubicación de coordenadas tanto locales como globales (Escalante et al., 2016). Los UAVs de ala fija, en comparación con los multirrotor, son preferidos para la obtención de información en áreas de difícil acceso y en un rango más amplio de variaciones climáticas (Oñate de Mora, 2015). El dron de ala fija puede realizar vuelos con velocidades y alturas superiores, mientras que los multirrotor son óptimos para maniobras estacionarias a baja velocidad, siendo los de ala fija recomendados para la recopilación de datos cartográficos debido a su viabilidad y mayor alcance (Addati & Perez Lance, 2014).

El grupo de investigación Aerodinámica y Termofluidos Aplicados (GI-ATA) de la Facultad de Mecánica y el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional ha priorizado el monitoreo del humedal Pugllohuma utilizando imágenes multiespectrales y multitemporales con UAVs de ala fija. Los datos recabados son fundamentales para la toma de decisiones en proyectos de conservación hidrológica de humedales altoandinos. El Humedal Pugllohuma, situado dentro del sistema de agua potable la Mica, es de particular interés ya que su preservación es esencial para el suministro de agua a la población del sur de Quito.

1.4. HIPÓTESIS

Mediante el uso de imágenes multitemporales obtenidas de UAS y la derivación de índices espectrales vegetativos, es posible determinar la variabilidad del nivel freático y la saturación del humedal Pugllohuma, ubicado en el Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA).

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

2.1.1. EJE DE INVESTIGACIÓN

El eje de investigación se centra en el uso de sensores multiespectrales montados en UAVs para el monitoreo ambiental en humedales altoandinos. Se ha identificado una falta de atención en este tema en el país, a diferencia de Europa, donde se han llevado a cabo numerosos estudios utilizando UAVs para el seguimiento del estado de los ecosistemas. A medida que los drones han evolucionado con el tiempo, se han vuelto cada vez más innovadores en el campo del monitoreo. Existen distintas aplicaciones que se pueden realizar utilizando herramientas en diferentes tipos de ecosistemas, comprendido en los humedales altoandinos. Se ha visto una brecha en la investigación concerniente con el uso de sensores multiespectrales montados en UAVs para el monitoreo ambiental en los humedales altoandinos en el país en cuestión. Esto sugiere que hay una oportunidad para analizar y desarrollar esta tecnología en el contexto específico de los humedales altoandinos.

Al llevar a cabo una revisión de literatura y recopilación bibliográfica, se podrá investigar y analizar el estado actual de este enfoque en otras zonas, así como las aplicaciones y beneficios potenciales que puede ofrecer en el monitoreo de los humedales altoandinos. Esto proporcionará una base sólida para el desarrollo de estudios e investigaciones futuras en el área, y podría abrir nuevos aspectos en el monitoreo y conservación de estos ecosistemas valiosos.

2.1.2. DOCUMENTOS REVISADOS

En la Tabla 1 se presenta una recopilación bibliográfica relacionada con los temas tratados en el proyecto de titulación. Se incluyen diferentes tipos de trabajos, como artículos científicos, documentos gubernamentales, informes técnicos, libros, manuales y tesis. Cada tipo de trabajo aborda diferentes aspectos relevantes para el proyecto, como firmas espectrales, espectro electromagnético, uso de drones en

humedales, diseño de índices espectrales, estimación de fenología, ortomosaicos y modelos digitales, comparación entre UAVs y satélites, entre otros.

Tabla 1. Recopilación bibliográfica pertinente al presente proyecto de titulación.

Tipo de Trabajo	Número	Ámbito	Año de publicación	Referencia de Publicaciones
Artículos científicos	46	<ul style="list-style-type: none"> Firmas espectrales Espectro electromagnético Uso de drones en humedales Diseño de índices espectrales Estimación de fenología Ortomosaicos y modelos digitales Comparación UAVs y satélites 	1979-2020	<p>Corrales, R., & Ochoa, V. (2014). Vista de Firmas espectrales de la cobertura de la Tierra, aplicando radiometría de campo. <i>Ciencias Espaciales</i>, 7(1).</p> <p>Piedad, A., Hernández, D., Larraga, H., & González Zacarías. (2020). Teledetección en la agricultura de precisión: estado del arte de los índices de vegetación. 47–59.</p>
Documentos gubernamentales	11	<ul style="list-style-type: none"> Memoria de sostenibilidad Comunidad Andina en el 2008 Monitoreo del humedal Pugllahoma 	2008-2020	Comunidad Andina [CAN]. (2008). <i>La Comunidad Andina en el 2008</i> .
Informes técnicos	6	<ul style="list-style-type: none"> Beneficios de la restauración de humedales Nuevas tecnologías de drones 	2012-2020	Mejía, X., & Vásquez, J. (2018). <i>Nuevas tecnologías drones al Manejo Forestal Sostenible</i> .
Libros	7	<ul style="list-style-type: none"> Teledetección Drones y aplicación Cambio climático 	2012-2020	<p>Morales, N. F. (2020). <i>Teledetección y procesamiento de imágenes satelitales (2a ed., Vol. 2, Número Geomática Ambiental)</i>.</p> <p>Austin, R. (2010). <i>Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and</i></p>

		<ul style="list-style-type: none"> • Biodiversidad y servicios ecosistémicos • Índice de vegetación 		Deployment. En Wiley (1a ed.).
Manuales	1	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración de humedales 	2005	<p>Junta de Andalucía. (2005). Manual de restauración de humedales mediterráneos. 14–23.</p> <p>Palma, A. (2020). Evaluación del estado del humedal Pugllohuma, perteneciente al Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), mediante el análisis de índices espectrales de imágenes capturadas desde una aeronave no tripulada (UAV). [Escuela Politécnica Nacional].</p>
		<ul style="list-style-type: none"> • Clasificador de imágenes multiespectrales 		
Tesis	6	<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta espectral de imágenes • Estado del humedal Pugllohuma 	2015-2020	<p>Espinel, G. (2019). Desarrollo de una metodología para la evaluación de saturación del humedal Pugllohuma mediante el uso de UAVs. [Escuela Politécnica Nacional].</p>

Elaboración: propia

El número total de trabajos compilados en cada tipo y definen los temas o ámbitos desarrollados por cada conjunto de trabajos. Además, muestra el rango de años de publicación de los trabajos recopilados, que va desde 1979 hasta 2020.

2.1.3. DIAGNOSTICO

Los humedales son los ecosistemas más diversos, productivos y con gran utilidad de servicios para el mundo. Estos desempeñan diversos propósitos entre los cuales es proveer un entorno a la vida silvestre y solventar las necesidades fundamentales de los seres humanos hasta la normalización de procesos atmosféricos y ciclos bioquímicos (La Convención sobre los Humedales, 2012), siendo considerados los más vulnerables al cambio climático. En el siglo XX tuvieron un 71% con una caída

anual de servicios ecosistémicos de más de 20 billones de dólares (Quintana, 2018).

Las aplicaciones potenciales de UAVs para el monitoreo ambiental ha revolucionado la ecología y conservación, en especial países en desarrollo con urgencia de planes de investigación con costos accesibles (Ewald et al., 2020). En los páramos andinos debido condiciones ambientales desfavorables y zonas de difícil acceso se ha optado por vuelos con drones (Jones et al., 2010). La trayectoria de esta tecnología comenzó en mediados del siglo veinte, con drones que derivaban de los aeromodelos, demostrando una vez más cómo los avances tecnológicos pueden ser aprovechados y adaptados para el beneficio de la investigación científica y la conservación ambiental (Tomlins & Lee, 2014). En Europa pionera de la tecnología ambiental se ha usado especialmente en zonas bajas con sensores espectrales y RGB acoplados en aeronaves no tripuladas, pero últimamente ha existido mayor atención a zonas montañosas, en pastizales alpinos (Marcinkowska et al., 2018).

En la región andina se ha extendido el monitoreo con UAVs durante años, los registros presentados para el uso en evaluaciones de biodiversidad, cartográficas y uso en agricultura (M. Aguilar et al., 2021; Espinel, 2019; Palma, 2020; Sani et al., 2015). En la costa ecuatoriana mediante 58 parcelas se hizo un estudio de bosques secos con imágenes RGB e índices espectrales para determinar zonas de deforestación, densidad vegetativa y coberturas de suelo (F. Aguilar et al., 2019).

Para la restauración de los ecosistemas se establece acciones a corto, medio y largo plazo con una base de datos establecida y con escenarios dinámicos para el monitoreo periódico. Este proceso busca reestablecer la organización y funcionamiento normal de un ecosistema degradado (Junta de Andalucía, 2005). El presente proyecto busca esquematizar y proveer de información confiable y objetiva de las condiciones dinámicas del humedal Puglllohuma. Esta información se podrá utilizar para instaurar en el futuro el uso metodologías acertadas para la restauración de ecosistemas con condiciones similares.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. SISTEMAS AÉREO NO TRIPULADO (UAS)

Los Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) se describen en una serie de subsistemas que conforman un sistema completo de aeronaves no tripuladas. Estos subsistemas incluyen la propia aeronave no tripulada (UAV), las cargas útiles que se transportan, las estaciones de control, los sistemas de lanzamiento y recuperación cuando sean necesarios, los sistemas de apoyo, los sistemas de comunicación y los sistemas de transporte, entre otros. Igualmente, es importante tener en cuenta las normas, reglamentos y directrices tanto a nivel global como local que sean relevantes para el uso de los UAS (Austin, 2010).

En comparación con los sistemas basados en aeronaves tripuladas, los UAS intervienen muchos elementos, pero se diferencian por su capacidad de operar sin tripulación a bordo desde su concepción. En lugar de contar con una tripulación aérea y sus correspondientes interfaces de control en la aeronave y la cabina, los UAS se basan en subsistemas de control y tecnología electrónica para su operación (Federal Aviation Administration, 2023).

Los UAS desempeñarán un papel primordial en el monitoreo del humedal Pugllahoma. Estos sistemas brindan ventajas significativas, como la capacidad de acceder a áreas de difícil acceso y obtener datos aéreos de alta resolución y en tiempo real. Al utilizar UAS equipados con sensores multispectrales, será posible alcanzar información detallada sobre la vegetación y la variabilidad de la saturación del humedal, lo cual contribuirá a la comprensión y conservación de este ecosistema altoandino (F. Aguilar et al., 2019; Jones et al., 2010).

2.2.2. VEHÍCULO NO TRIPULADO (UAV)

El Vehículo No Tripulado (UAV) o aeronave no tripulada es una tecnología en desarrollo que ha abierto nuevos retos en la investigación y se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en diversos campos. Sin embargo, inicialmente se emplearon en aplicaciones militares, su versatilidad ha llevado a su amplia disponibilidad en el mercado (Itkin et al., 2016).

Actualmente, los UAV desempeñan un papel fundamental en la gestión y monitoreo de diversos entornos, como océanos, volcanes, biodiversidad y recursos hídricos, gracias a su capacidad para obtener grandes volúmenes de datos sobre vida silvestre, contaminación y otros aspectos relevantes (Barrientos et al., 2009)

2.2.3. ESTACIÓN DE CONTROL A TIERRA

La Estación de Control a Tierra, también conocida como Ground Control Station (GCS), es un conjunto de dispositivos que se utilizan para supervisar y controlar la plataforma de vuelo de un UAV (Figura 1). Esta estación permite a los operadores monitorear en tiempo real el vuelo del UAV, recibir y analizar los datos recopilados, y enviar comandos y órdenes de control al vehículo aéreo no tripulado (Velasco et al., 2012).

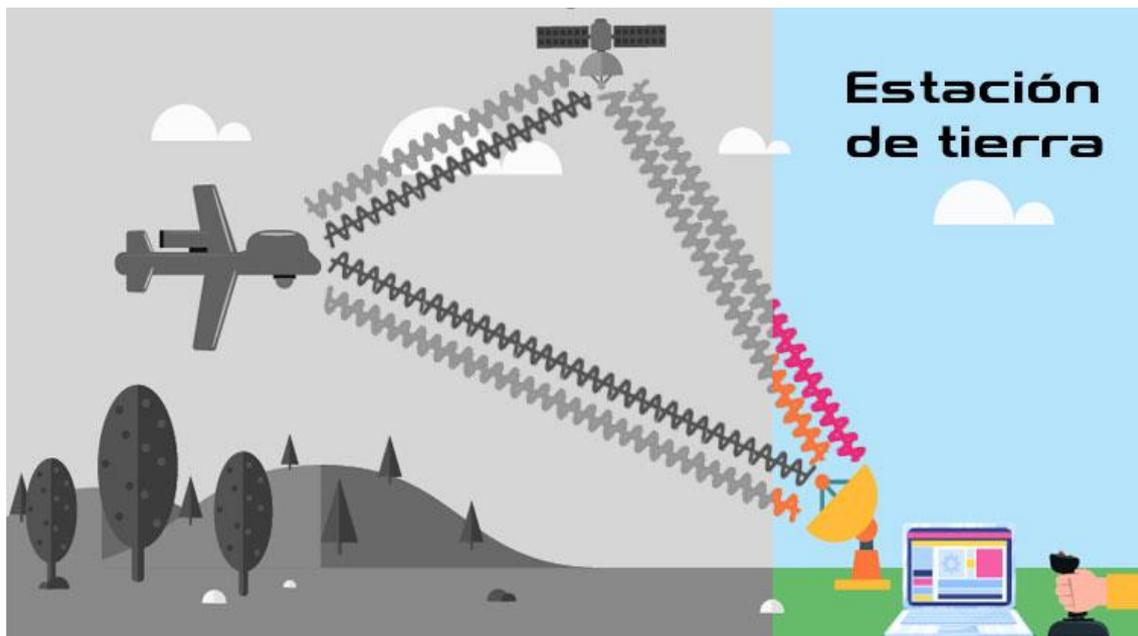


Figura 1. Diagrama de estación de control a tierra.

Modificado de (Hispa Drones, 2019)

La Estación de Control a Tierra suele estar compuesta por varios elementos, que pueden incluir pantallas de visualización, sistemas de comunicación, joysticks o dispositivos de control, computadoras y software especializado. Estos dispositivos permiten a los operadores tener una visión completa de la información del UAV, como su posición, altitud, velocidad, estado de la batería y otros parámetros relevantes (Ríos, 2021).

Además, la Estación de Control a Tierra puede contar con sistemas visuales que permiten analizar e interpretar las condiciones climáticas en relación con el vuelo del UAV. Esto es especialmente importante para certificar la seguridad de la operación y tomar decisiones informadas sobre el momento y las condiciones adecuadas para realizar los vuelos (Tibocha et al., 2023).

2.2.4. TELEDETECCIÓN

La teledetección es un conjunto de procedimientos que se utiliza para obtener información sobre la superficie de la Tierra sin necesidad de estar en relación directa con ella. Esta técnica utiliza sensores instalados en diferentes plataformas, como satélites, UAV (vehículos aéreos no tripulados) y aeronaves tripuladas, para capturar imágenes y mediciones de diversas propiedades de la superficie terrestre (Corrales & Ochoa, 2014).

La teledetección se basa en el principio de que los objetos y materiales presentes en la superficie terrestre interactúan de manera diferente con la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Cada objeto o material tiene una firma espectral única, que es su respuesta característica a la radiación electromagnética en diferentes bandas espectrales. Al medir y analizar estas firmas espectrales, se puede inferir información sobre la composición, la estructura y las características de la superficie terrestre (Aponte & Ospina, 2019).

2.2.5. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética es crucial en la teledetección, ya que los sensores utilizados en los UAVs capturan la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Estos sensores registran el rigor de la radiación en diferentes bandas del espectro, lo que permite obtener información valiosa sobre las características de los humedales, como la vegetación, la humedad del suelo, la calidad del agua, entre otros aspectos relevantes (Pérez & Miranda, 2010).

2.2.6. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético se refiere al rango completo de todas las ondas electromagnéticas (Figura 2). Estas ondas son manifestaciones de energía que se

propaga en el espacio y el tiempo y varían en función de su frecuencia (Luque Ordóñez, 2012). El límite inferior de este espectro es cero, ya que no existen frecuencias negativas, mientras que teóricamente su límite superior se extiende hasta el infinito (Herrera et al., 2019). Debido a las diferencias en la frecuencia de las ondas electromagnéticas, estas se agrupan y clasifican en distintas bandas, como se muestra en la Figura 3.

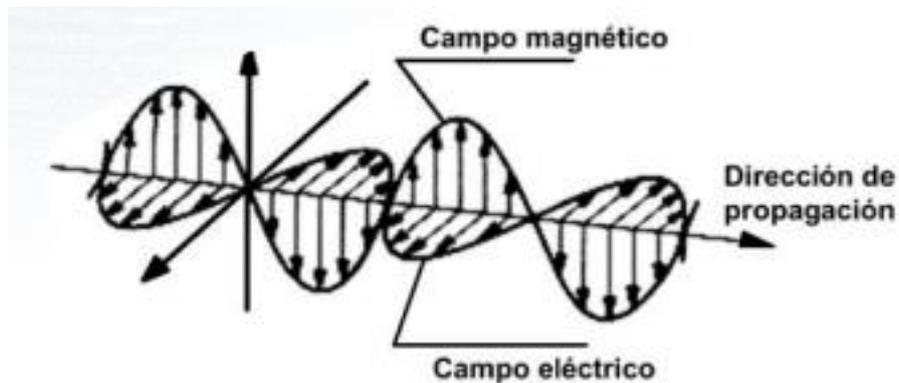


Figura 2. Onda electromagnética.

Modificado de (Luque Ordóñez, 2012).

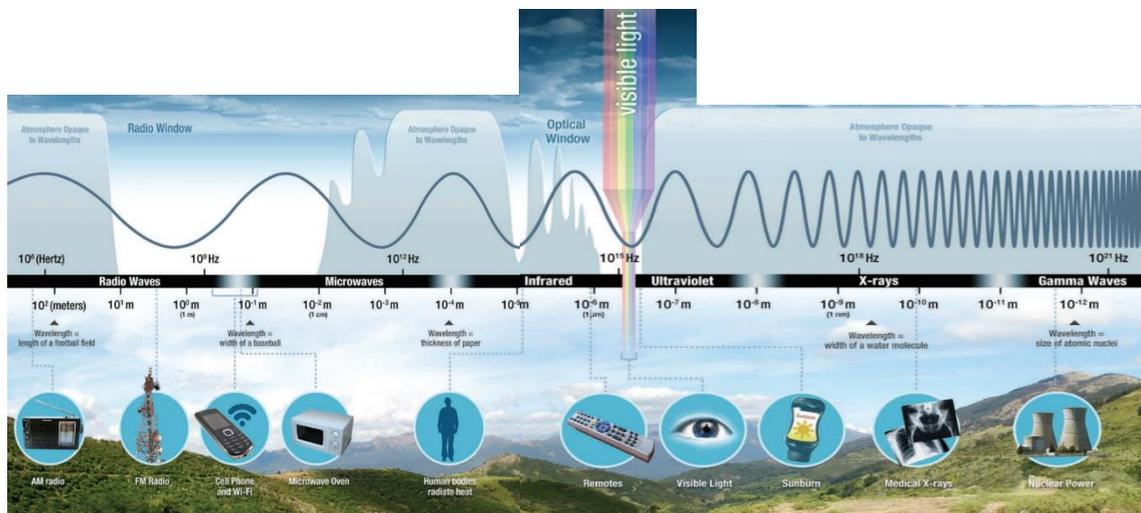


Figura 3. Clasificación del espectro electromagnético por frecuencias y sus aplicaciones según la longitud de onda.

Modificado de (Kuhn, 2016)

2.2.7. FIRMAS ESPECTRALES

El análisis de firmas espectrales es una técnica vital en el campo de la teledetección con numerosas aplicaciones, incluyendo el monitoreo de vegetación y agua. Este proceso implica medir y registrar las radiaciones electromagnéticas reflejadas o emitidas por un objeto o superficie en diferentes longitudes de onda. El comportamiento único de esta energía electromagnética en diversas longitudes de onda da lugar a las llamadas firmas espectrales, que pueden usarse para identificar y diferenciar entre distintos tipos de materiales y condiciones de la superficie terrestre (Castilla, 2016).

Para un análisis multitemporal efectivo de las firmas espectrales, hay varios aspectos que deben ser considerados. En primer lugar, es esencial elegir el sensor adecuado para la tarea, ya que los diferentes sensores tienen variadas resoluciones espectrales y rangos de longitud de onda que pueden capturar. Además, es crucial realizar un preprocesamiento cuidadoso de los datos, que puede incluir correcciones atmosféricas y geométricas para garantizar la comparabilidad de los datos a lo largo del tiempo. Finalmente, la interpretación precisa de los resultados del análisis multitemporal de firmas espectrales requiere un sólido entendimiento de la zona de estudio y de cómo ciertos cambios ambientales pueden afectar las firmas espectrales.

2.2.8. ÍNDICES ESPECTRALES

2.2.8.1. NDVI- Índice normalizado de diferencia de vegetación

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se calcula utilizando la relación entre la diferencia entre la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED), dividida por la suma banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED). La Ecuación 1.1 representa correctamente el cálculo del NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1.1)$$

El algoritmo del NDVI se basa en la capacidad de la vegetación para reflejar menos luz visible y más luz del infrarrojo cercano. Las plantas verdes y saludables reflejan una mayor proporción de luz del infrarrojo cercano y menos luz visible, mientras que la vegetación escasa o menos saludable refleja una mayor cantidad de luz visible y menos luz del infrarrojo cercano.

Los valores del NDVI varían en un rango de -1 a +1, donde los valores próximos a -1 indican áreas sin vegetación, los valores próximos a 0 indican áreas con poca vegetación o suelo sin vegetación, y los valores próximos a +1 indican áreas con vegetación espesa y saludable (Yengoh et al., 2016).

2.2.8.2. SAVI- Índice de vegetación ajustado al suelo

SAVI se utiliza para corregir el efecto de brillo del suelo del índice de vegetación normalizado (NDVI) en áreas con poca cobertura vegetal. El SAVI derivado de la reflectancia de la superficie de Landsat se calcula como la relación entre los valores R y NIR, con un factor de corrección de brillo terrestre (L) establecido en 0,5 para que sea adecuado para la mayoría de los tipos de cobertura terrestre (Castellanos et al., 2016). Se calcula dividiendo la diferencia de banda del infrarrojo cercano (NIR) y banda roja (RED) con respecto a la suma de banda del infrarrojo cercano (NIR), banda roja (RED) y factor (L) multiplicado todo por la suma de uno y factor (L) como muestra la siguiente Ecuación 1.2:

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} * (1 + L) \quad (1.2)$$

2.2.8.3. NDWI- Índice normalizado de diferencia de agua

El índice normalizado de diferencia de agua (NDWI) se emplea para identificar el contenido de agua. El NDWI utiliza datos reflejados en la radiación infrarroja cercana (NIR) y la banda verde (GREEN) para mejorar la presencia de características propias del agua, eliminando la presencia de características del suelo y la vegetación terrestre. Se sugiere que el NDWI también puede proporcionar a los investigadores turbidez de masas de agua utilizando los datos obtenidos en la teledetección (McFeeters, 1996). Se presenta la fórmula desarrollada tomando en cuenta las bandas presentadas anteriormente (Ecuación 1.3):

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

Es importante señalar que, dependiendo del sensor satelital específico y del objetivo del estudio, existen otras versiones del NDWI que utilizan diferentes combinaciones de bandas. Por ejemplo, una variante emplea la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) en lugar del infrarrojo de onda cercana (NIR). La elección de

qué versión utilizar depende del propósito del análisis y de las bandas disponibles en la imagen satelital. Los valores NDWI oscilan entre cero y uno. Los valores positivos suelen indicar la presencia de agua, mientras que los valores negativos suelen indicar que no hay agua en absoluto o que hay una cantidad mínima de agua (Gu et al., 2007).

2.2.9. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN (CREACIÓN DE SUPERFICIES)

Los métodos de interpolación son cruciales en la geografía y las ciencias de la tierra para estimar los valores de una variable en lugares no muestreados, basándose en un conjunto conocido de valores muestreados. Estos métodos se utilizan con frecuencia para crear mapas con superficies continuas con datos puntuales. Los métodos de interpolación, que utilizan puntos de datos, permiten calcular valores para las celdas o píxeles de un ráster. El método de ponderación inversa a la distancia (IDW), Kriging, Topo a raster, tendencia y el método de mínima curvatura, también conocido como "Spline", son algunos de los métodos más importantes (Lam, 2013).

2.2.9.1. IDW

El método de interpolación IDW asigna una ponderación a los puntos de muestreo con un coeficiente que regula cómo disminuye esta ponderación con la distancia al nuevo punto. A medida que aumenta el coeficiente, el valor interpolado tiende a aproximarse al punto de observación más cercano. Sin embargo, hay problemas con este método, como que la calidad puede disminuir si la distribución de los puntos de datos es desigual y que los valores extremos solo pueden aparecer en puntos de datos de muestra. En pocas palabras, este algoritmo utiliza una combinación ponderada de datos de muestra para estimar valores en celdas. Las celdas más cercanas a los puntos de datos tienen una mayor influencia en la predicción (Diaconu et al., 2017; Minea et al., 2015).

2.2.9.2. Kriging

Kriging es uno de los métodos de interpolación más complejos y precisos en el campo de la geoestadística, se utiliza con frecuencia en investigaciones que se enfocan en aguas subterráneas para predecir las variaciones espaciales de su profundidad. El método Kriging se diferencia de otras técnicas de interpolación al

tomar en cuenta tanto la separación espacial como la cantidad de variación presente entre los puntos de datos ya conocidos. Esta característica lo hace particularmente útil porque al calcular valores para una superficie raster, depende de una comprensión más profunda de las relaciones y la distribución de los datos, lo que garantiza resultados más coherentes y precisos (Castillo, 2022).

2.2.9.3. Topo to raster

El método Topo to Raster es un método que utiliza datos de varias fuentes, como curvas de nivel y puntos de observación, para crear superficies continuas que representan características topográficas, como la elevación del terreno. Garantizar la coherencia en las características hidrográficas como arroyos es especialmente beneficioso cuando se trata del nivel freático. Esta herramienta puede representar el nivel freático de manera precisa y detallada, integrando y combinando datos en una variedad de formatos (Montealegre et al., 2014).

2.2.9.4. Tendencia

La capacidad de crear una superficie suave utilizando una función matemática polinómica basada en los puntos de datos de la muestra es lo que define el método de interpolación polinómica global. Esta superficie, que cambia gradualmente, se ajusta a los puntos de datos a través de una superficie matemática que puede ser lineal, cuadrática o incluso superior (Coaguila et al., 2013).

2.2.9.5. Spline

El método de curvatura mínima, también conocido como Spline, utiliza una función matemática para reducir la curvatura de la superficie. Esto produce una superficie suavizada que pasa directamente a través de los puntos de datos de entrada. Esta técnica es particularmente adecuada para calcular superficies que presentan variaciones leves, como la altura de los niveles freáticos o las concentraciones de contaminación. El Spline puede ser global, utilizando todos los puntos disponibles, o local, utilizando solo los puntos cercanos, dependiendo de la aplicación (Cárdenas, 2019).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En la metodología empleada en el análisis de imágenes, se realizó un estudio multitemporal del humedal Puglllohuma utilizando vuelos de drones en tres meses diferentes: 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021. La Figura 4 muestra un diagrama que sirvió de base para el análisis de los vuelos y la evaluación del humedal en distintos momentos temporales.

Este enfoque multitemporal permite obtener una visión más completa de las dinámicas y cambios en el humedal a lo largo del tiempo. Se capturaron imágenes aéreas en cada uno de los meses seleccionados, utilizando un dron equipado con un sensor multiespectral.

La metodología incluyó los siguientes pasos:

1. Planificación de los vuelos: Se determinaron las fechas de vuelo en febrero, julio y agosto, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y los momentos clave en la fenología del humedal.
2. Adquisición de imágenes: Se llevaron a cabo los vuelos con el dron, capturando imágenes aéreas del humedal en cada uno de los meses seleccionados.
3. Procesamiento de las imágenes: Las imágenes capturadas fueron procesadas utilizando software especializado, como Pix4D, para generar ortomosaicos y modelos digitales de elevación (DSM).
4. Generación de mapas multitemporales: Utilizando los ortomosaicos y los DSM, se generaron mapas temáticos que representaban diferentes aspectos del humedal, como la vegetación, el sistema de drenaje y las características topográficas.
5. Análisis de los índices espectrales: Se calcularon y analizaron los índices espectrales relevantes, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), NDWI (Índice Normalizado de diferencia de agua) y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), para evaluar la salud y la fenología de la vegetación en el humedal.

6. Verificación en campo: Se realizaron mediciones y recopilación de datos en campo para verificar los resultados obtenidos a partir de las imágenes y los índices espectrales.

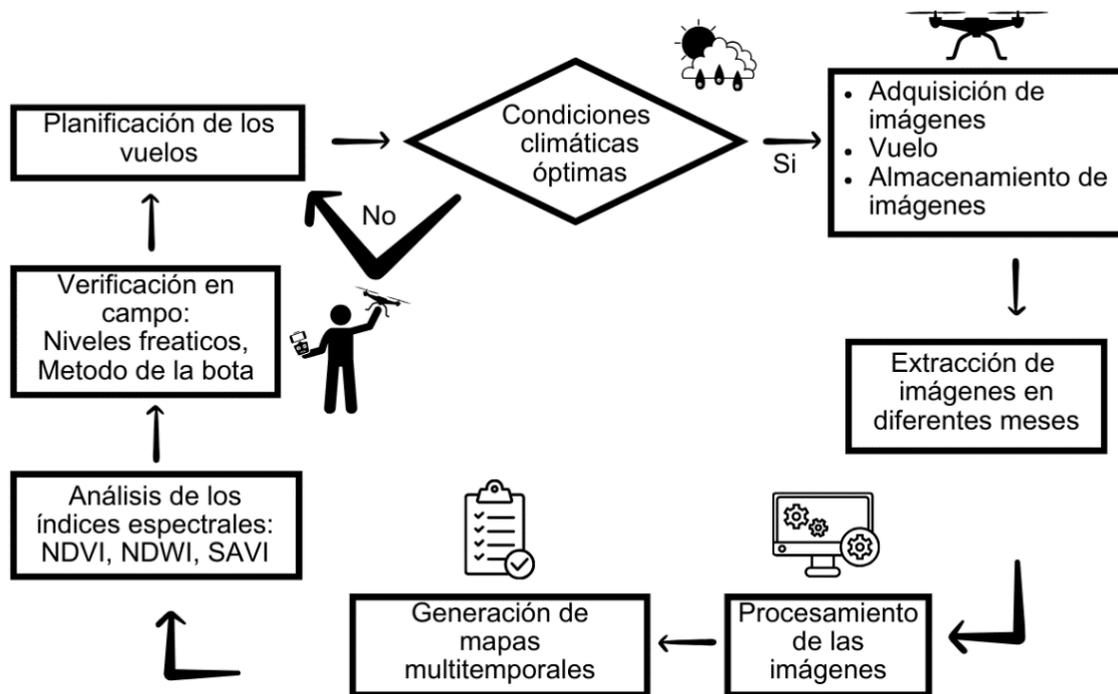


Figura 4. Metodología de toma de imágenes en el humedal Pugllohuma.

Elaboración: propia

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El humedal Pugllohuma es la zona de estudio seleccionada para este proyecto. Se encuentra ubicado a 43 km al sureste de Quito, en el Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA) de 8457 ha. El humedal está situado a una altitud superior a los 4000 metros sobre el nivel del mar, tal y como se ilustra en la Figura 5 y tiene una extensión de 23.68 hectáreas.

La elección de este humedal como zona de estudio se debe a su relevancia en investigaciones anteriores relacionadas con su restauración y al monitoreo continuo que lleva a cabo el FONAG (Fondo para la Protección del Agua). Este humedal se encuentra en un área protegida que desempeña un papel estratégico en la conservación de la biodiversidad y en la contribución al abastecimiento de agua a través del sistema de captación de agua potable La Mica.

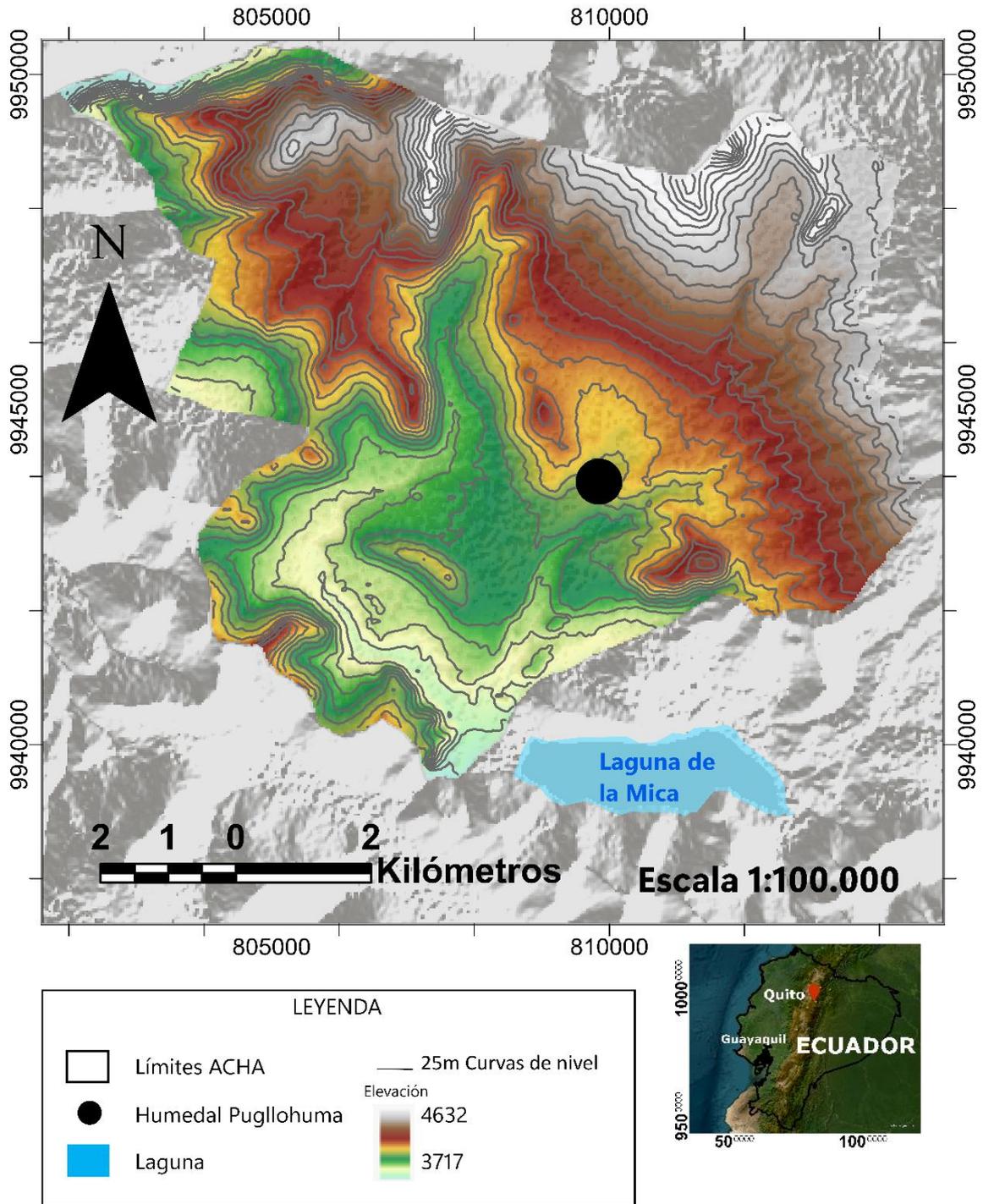


Figura 5. Ubicación del Humedal Puglllohuma en el Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA).

Modificado de (Shuttle Radar Topography Mission [SRTM], 2000; Tellkamp et al., 2019)

3.2. PREPARACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

Los principales materiales utilizados para la preparación de materiales y equipos se muestran en la Figura 6 los cuales son dron comercial de ala fija Event386 (UAV), cámara multiespectral (Micasense RedEdge-MX), estación de tierra y calibración de equipos.



Figura 6. Equipos y materiales utilizados en la metodología.

Elaboración: propia

3.2.1. DRON COMERCIAL DE ALA FIJA EVENT386 (UAV)

El dron comercial de ala fija Event386 (UAV) desempeñó un papel fundamental en el estudio realizado sobre el humedal Pugllahoma. Esta plataforma no tripulada permitió la captura de imágenes aéreas de alta resolución en la zona de estudio. La Figura 6 muestra una imagen del dron utilizado en la investigación.

El humedal Pugllohuma se encuentra a una altitud superior a los 4,000 metros sobre el nivel del mar, mientras que el dron de ala fija Event386 tiene una altura máxima de vuelo verificada por el fabricante de 3,960 metros sobre el nivel del mar, como se indica en la Tabla 2. Aunque existe una pequeña discrepancia en los valores de altitud, se consideró que el dron Event386 era adecuado para este estudio debido a su capacidad para operar en condiciones de vuelo cercanas a las establecidas en el sector del monitoreo. Se realizaron vuelos previos para verificar la operatividad del dron en las condiciones específicas de un páramo altoandino (Valencia et al., 2021).

Tabla 2. Características del dron de ala fija EVENT386.

Características	Valor
Dimensiones	190 cm envergadura, 130 cm largo
Peso	2.5 kg
Velocidad de crucero	12 m/s
Rango	60km, mapeo a una altura de 120 m en un área de 344 ha
Máxima carga útil	500g
Velocidad máxima del viento sostenido	10 m/s (operación autónoma)
Rango de telemetría	5 km
Condiciones máximas de vuelo probadas	3960 msnm
Opciones de cámara	Sony R10C, Sony R10C Plus, Sony RX1R II, Canon Power shot S110, Micasense RedEdge, Parrot Sequoia, FLIR Vue Pro

Modificado de (Event 38 Unmanned Systems, 2022)

Estas características describen las dimensiones, peso, velocidad de vuelo, rango de operación, carga útil máxima y opciones de cámara aprovechables en el dron Event386. Las especificaciones demuestran su capacidad para realizar misiones de mapeo aéreo en el área de estudio del humedal Pugllohuma.

3.2.2. CAMARA MULTIESPECTRAL MICASENSE REDEDGE-MX

La Tabla 3 muestra las características de la cámara multiespectral Micasense RedEdge-MX utilizada en el monitoreo. La cámara Micasense RedEdge-MX es una herramienta poderosa para el monitoreo multitemporal de humedales, ya que

combina la capacidad de capturar información espectral en múltiples bandas, una resolución conveniente para el análisis de la vegetación y los cambios en la topografía, y una velocidad de disparo rápida para obtener imágenes. Su versatilidad en términos de interfaces y opciones de disparo facilita la integración con otros dispositivos y sistemas, lo que la convierte en una opción confiable y eficiente para el estudio y seguimiento de los humedales a lo largo del tiempo.

Tabla 3. Características de cámara multispectral Micasense RedEdge-MX

Características	Valor
Dimensiones	8.7 cm x 5.9 cm x 4.54 cm
Peso	231.9 g
Energía externa	4 W nominal, 8 W pico
Bandas espectrales	Azul, verde, rojo, borde rojo, IR cercano (obturador global, banda estrecha)
Resolución	8 cm por píxel
Velocidad de disparo	1 captura por segundo (todas las bandas)
Interfaces	Serial, 10/100/1000 ethernet, Wifi extraíble, disparador externo, GPS, SDHC
Opciones de disparo	Modo temporizador, modo superposición, modo disparo externo (PWM, GPIO, serial y opciones de Ethernet), modo de captura manual

Modificado de (MicaSense, 2022)

La cámara Micasense RedEdge-MX es una herramienta poderosa para el monitoreo multitemporal de humedales, ya que combina la capacidad de capturar información espectral en múltiples bandas, una resolución conveniente para el análisis de la vegetación y los cambios en la topografía, y una velocidad de disparo rápida para obtener imágenes. Su versatilidad en términos de interfaces y opciones de disparo facilita la integración con otros dispositivos y sistemas, lo que la convierte en una opción confiable y eficiente para el estudio y seguimiento de los humedales a lo largo del tiempo.

3.2.3. ESTACION DE TIERRA Y SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

La estación de tierra utilizada en el estudio está equipada con un computador portátil estándar que actúa como asistente de vuelo. El computador portátil tiene un procesador Intel® Core™ i7-44770 de 64 bits y 8 GB de memoria RAM. Estas

especificaciones aseguran un rendimiento adecuado para el procesamiento y control de la información durante los vuelos del dron.

Para establecer una comunicación efectiva entre la estación de tierra y el dron, se utilizan antenas omnidireccionales. Estas antenas tienen la capacidad de proporcionar una cobertura de señal en 360 grados, lo que significa que son capaces de captar y transmitir señales desde cualquier dirección. Esto es especialmente beneficioso en el monitoreo digital con UAVs, ya que los cambios de dirección que se establecen en la misión de vuelo no afectarán la calidad de la señal de comunicación.

3.2.4. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

La calibración de los equipos es un proceso esencial para garantizar mediciones precisas y confiables. En el caso del dron, se realiza una calibración previa antes de los vuelos para asegurar su correcto funcionamiento y orientación adecuada. Esto implica realizar movimientos horizontales y verticales de rotación para verificar el correcto funcionamiento de los sensores. Esta calibración previa es importante para establecer las condiciones óptimas de vuelo y asegurar que los datos recopilados sean precisos y confiables. La Figura 7 muestra el proceso de calibración del dron.

En cuanto a la calibración de la cámara multiespectral, se ajustan los parámetros de radiación para asegurar mediciones precisas de las bandas espectrales. Esto implica establecer los valores adecuados para compensar posibles variaciones en la sensibilidad de los sensores y garantizar que los valores obtenidos sean consistentes y comparables en diferentes tomas de imágenes. La calibración de la

cámara espectral es fundamental para obtener datos confiables sobre las características del humedal y su entorno.



Figura 7. Calibración del dron de ala fija EVENT386.

Elaboración: propia

3.3. TOMA DE IMÁGENES

En la etapa de toma de imágenes, se utiliza el software Mission Planner para planificar el vuelo del dron de ala fija EVENT386, que está equipado con la cámara Micasense RedEdge-MX. El plan de vuelo se configura con la estación de tierra, utilizando el software mencionado.

El proceso de vuelo comienza con el despegue del dron, donde el operario lanza el dron de manera horizontal desde una zona elevada, como se muestra en la Figura 8. Una vez en el aire, el dron asciende a la altura deseada y luego el piloto cambia

del modo manual al modo automático. A partir de este momento, el dron sigue la ruta preestablecida en el plan de vuelo.



Figura 8. Lanzamiento de dron EVENT386 en posición de despegue.

Elaboración: propia

El software Mission Planner proporciona parámetros de vuelo, como velocidad, distancia, orientación y ruta realizada, lo que permite un control preciso del vuelo, como se muestra en la Figura 9. Esto garantiza una cobertura sistemática y eficiente

del humedal Puglllohuma, asegurando la captura de imágenes en los puntos específicos de interés de acuerdo con el plan de vuelo establecido.



Figura 9. Captura de pantalla del software Mission Planner en el sobrevuelo del dron.

Elaboración: propia

3.4. MEDICIÓN DE NIVEL FREÁTICO

Desde noviembre de 2016, el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) ha instalado 18 piezómetros de 1 metro de profundidad, utilizando tubería perforada de PVC de 3 pulgadas, cubierta con tela tipo visillo para filtrar el agua entrante, como parte de su programa de monitoreo. El objetivo de esta iniciativa es evaluar tanto la cantidad como la calidad del agua (FONAG., 2016). La Tabla 5 ilustra las ubicaciones corregidas de estos piezómetros, capturadas en una sesión de medición. Utilizando estos piezómetros, se midió la profundidad del agua en el humedal. La Figura 10 proporciona una representación visual de los pozos de control, mostrando la estructura principal y sus componentes.

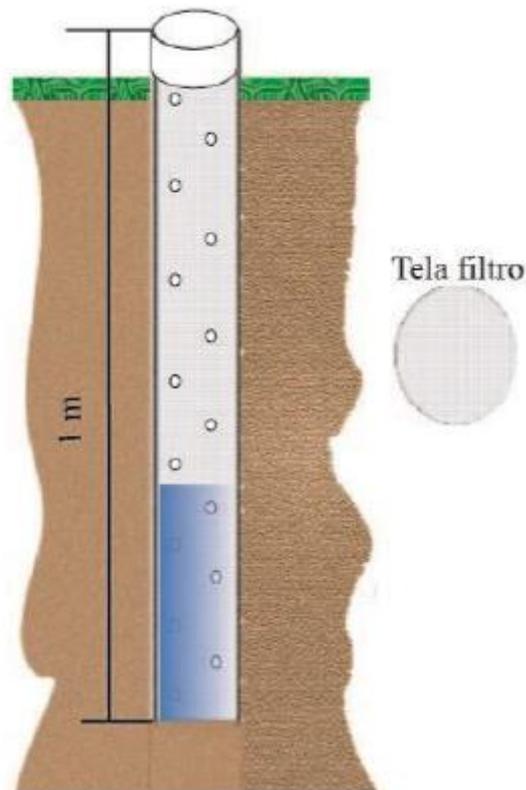


Figura 10. Pozo de control de medición freático.

Fuente: (Fondo para la Protección del Agua [FONAG], 2016)

3.5. INFORMACIÓN DE CAMPO MEDIANTE EL METODO DE LA BOTA

Antes de tomar las fotografías, realizamos múltiples visitas al humedal para comprender su naturaleza variable en el tiempo. Se realizó pruebas de vuelo el dron de ala fija y evaluamos su respuesta a las duras condiciones de vuelo, como las que se encuentran en el Páramo Andino. Durante estas visitas, se tomó fotografías del territorio, su vegetación y se evaluó su estado. También se identificó la formación de zanjas de drenaje tanto naturales como artificiales.

La primera inspección de la zona de estudio se llevó a cabo el 28 de octubre de 2020 como parte del proceso de verificación del área. Durante esta época, los desagües artificiales se encuentran sin agua, al igual que las áreas que se cree que son charcos.

Para evaluar las condiciones del terreno en el lugar de estudio, se utilizó el método de la bota. Este método implica verificar el tacto y el sonido al pisar el suelo, lo que proporciona información sobre la humedad del terreno (Evans & Love, 1957). Como se muestra en la Figura 11, se realizaron mediciones cualitativas al caminar por el área de estudio y se evaluaron las sensaciones táctiles y sonoras al pisar el suelo. Para garantizar la precisión en las mediciones, se utilizó una piola. Esta herramienta, aunque simple, es efectiva para obtener distancias precisas en terrenos irregulares.



Figura 11. Evaluación en sitio del método de la bota en el humedal Pugllhuma.

Elaboración: propia

El estudio detallado del humedal se llevó a cabo mediante dos transectos específicos que se trazaron entre los pozos 1 al 4 y del 10 al 13, lo cual está representado gráficamente en la Figura 12. A lo largo de estos transectos, se realizó una meticulosa recolección de datos con el objetivo de categorizar el terreno según distintas características observadas. Esta clasificación permitió dividir el área de estudio en tres zonas distintas:

Zona con agua: Esta categoría engloba aquellos lugares en los que el agua se encuentra a simple vista, indicando una presencia superficial de la misma.

Zona saturada o blanda: Estas áreas, aunque no muestran agua superficial de manera directa, son indicativas de una humedad subyacente. Esto se determinó a partir de características como el sonido peculiar que se produce al pisar el suelo y la evidencia de escurrimiento de agua, sugiriendo un nivel de saturación considerable.

Zona seca: A diferencia de las anteriores, en estas regiones el terreno se caracteriza por su firmeza y la ausencia de signos de humedad o saturación, indicando zonas menos propensas a la acumulación de agua.

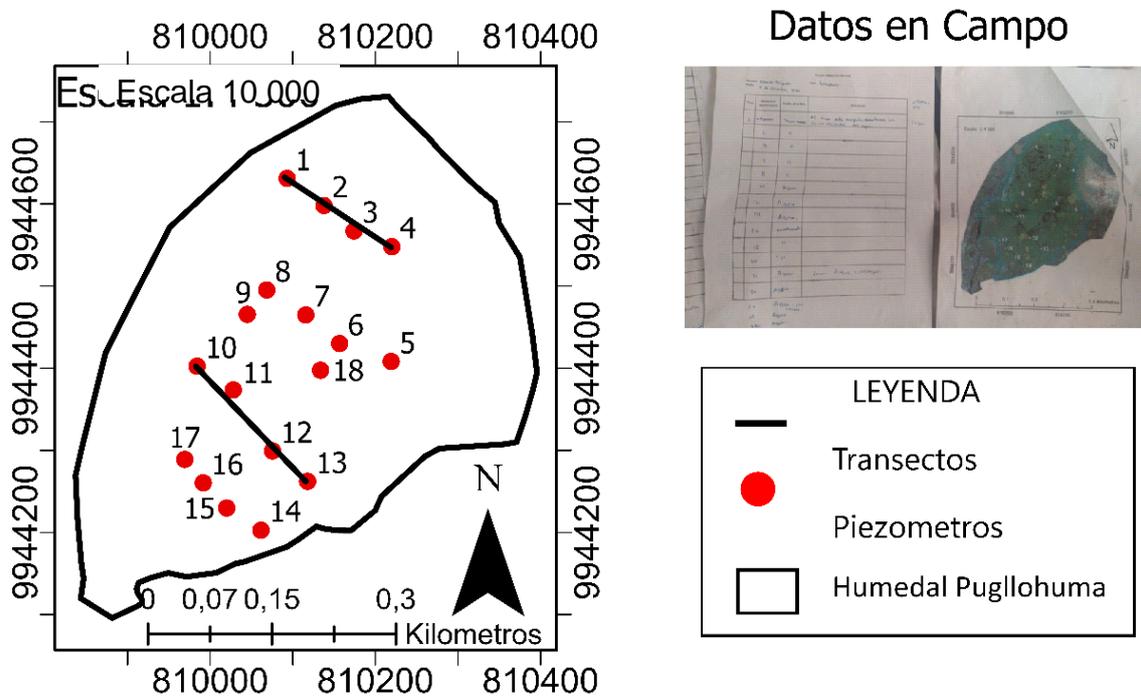


Figura 12. Transectos utilizados para la medición en campo del método de la bota.

Elaboración: propia

3.6. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN SOFTWARE PIX4D

El software seleccionado para este estudio, Pix4D, se utilizó para ajustar y procesar las imágenes capturadas; ello permitió establecer las características de la cámara utilizada y el sistema de referencia geográfico de la zona de estudio. Pix4D es una

herramienta ampliamente reconocida en el campo de procesamiento de imágenes aéreas y terrestres, la cual facilita la generación de modelos tridimensionales, ortomosaicos y productos derivados a partir de imágenes capturadas desde diferentes ángulos y perspectivas.

La Figura 13 exhibe la configuración de las características de la cámara utilizada, considerando parámetros como la distancia focal y el tamaño del sensor, entre otros elementos relevantes. Adicionalmente, se estableció el sistema de referencia geográfico; este es un componente fundamental para la correcta georreferenciación y ubicación de las imágenes en su correspondiente localización geográfica. La precisión y rigurosidad de estos pasos son vitales para garantizar la validez y aplicabilidad de los resultados obtenidos a partir del análisis de las imágenes.

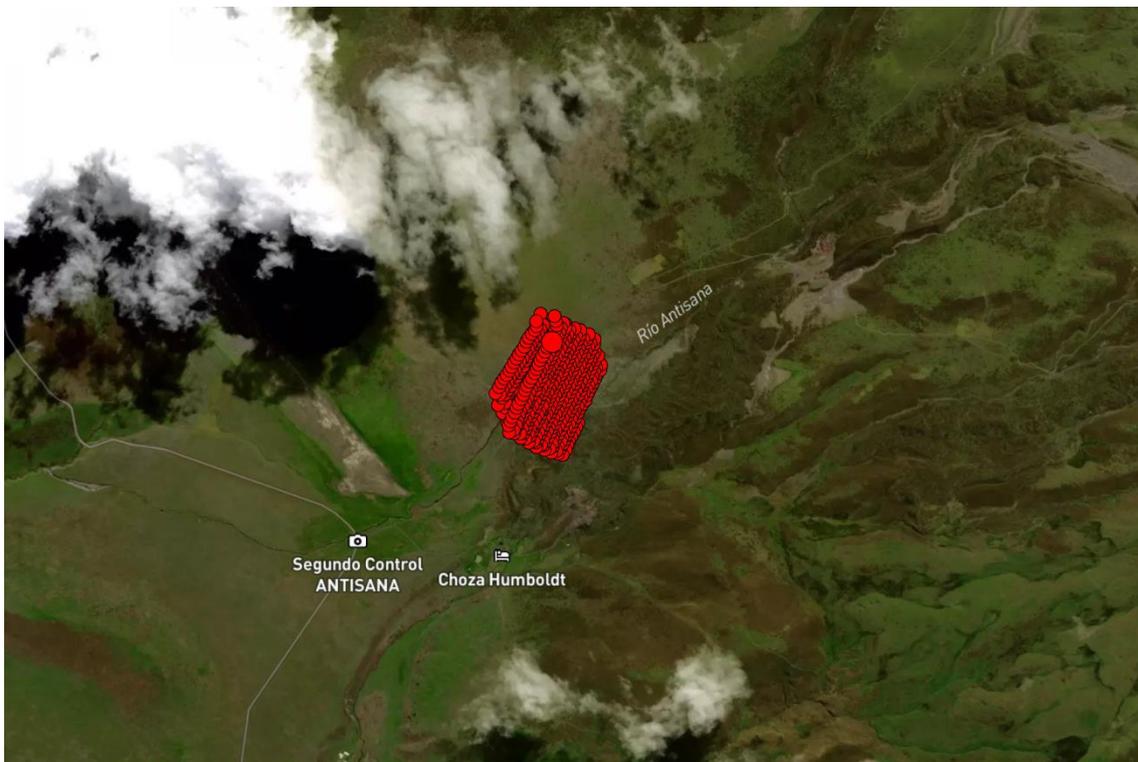


Figura 13. Mapa de ubicación del lugar de estudio.

Elaboración: propia

El procesamiento de imágenes realizado con Pix4D fue fundamental para obtener resultados precisos y de calidad en el estudio del humedal Puglllohuma, permitiendo generar productos como modelos de superficie, ortomosaicos y otros productos derivados que fueron utilizados en el análisis y la caracterización del humedal. El uso de software especializado como Pix4D facilita el procesamiento de grandes

volúmenes de datos de imágenes y permite obtener resultados detallados y precisos para su posterior análisis y evaluación del humedal. El proceso de procesamiento de imágenes en Pix4D consta de tres componentes principales (Figura 14):

- Alineación y calibración de imágenes: En esta etapa, las imágenes capturadas por el dron se alinearon y calibraron para corregir posibles distorsiones y asegurar una alineación precisa.
- Generación de puntos: Utilizando las imágenes procesadas, se generaron puntos tridimensionales en el espacio, lo que permitió obtener una representación precisa del terreno y los objetos presentes en la escena.
- Obtención de DSM, ortomosaicos e índices: A partir de los puntos generados, se creó un Modelo Digital de Superficie (DSM) que representa la elevación del terreno. Además, se generaron ortomosaicos, que son imágenes rectificadas y corregidas geoméricamente. También se calcularon diversos índices, como el índice de vegetación NDVI, que proporciona información sobre la salud y la densidad de la vegetación.

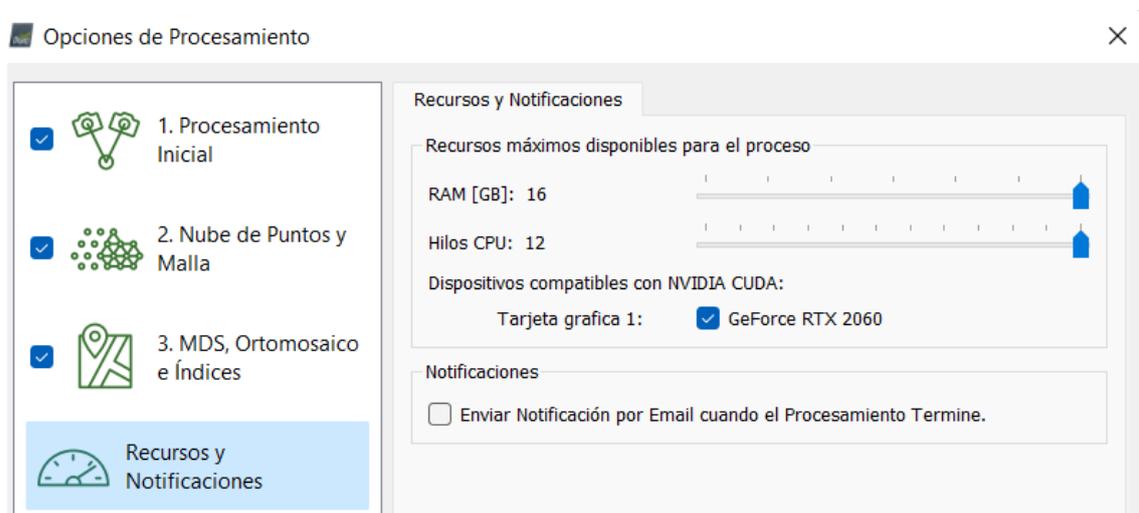


Figura 14. Opciones de procesamiento de la plataforma Pix4d.

Elaboración: propia

La Figura 15 muestra cómo este programa estima la profundidad necesaria para integrar cada imagen utilizando la información geográfica de cada imagen. Esto crea una densa nube de puntos. Para garantizar resultados óptimos, se aplican parámetros cruciales durante el proceso. Uno de ellos es el filtrado fino, que es una

combinación de técnicas de procesamiento avanzadas que se utilizan para eliminar el ruido y las imperfecciones en la nube de puntos. Para lograr un modelo de elevación limpio y detallado, esto es esencial. La agresividad en la estimación de profundidad, por otro lado, es otro parámetro que determina con qué grado de detalle y precisión se establece la información de profundidad durante la integración de imágenes. Aproximaciones más agresivas pueden producir un modelo más detallado, pero también pueden requerir una mayor cantidad de tiempo de procesamiento y una mayor capacidad de computación. Al finalizar este proceso, se obtiene el Modelo Digital de Superficie (DSM), que muestra la topografía y altitud del área en estudio. Este DSM es fundamental para el análisis y comprensión de los datos recopilados en el estudio del humedal Pugllahoma.

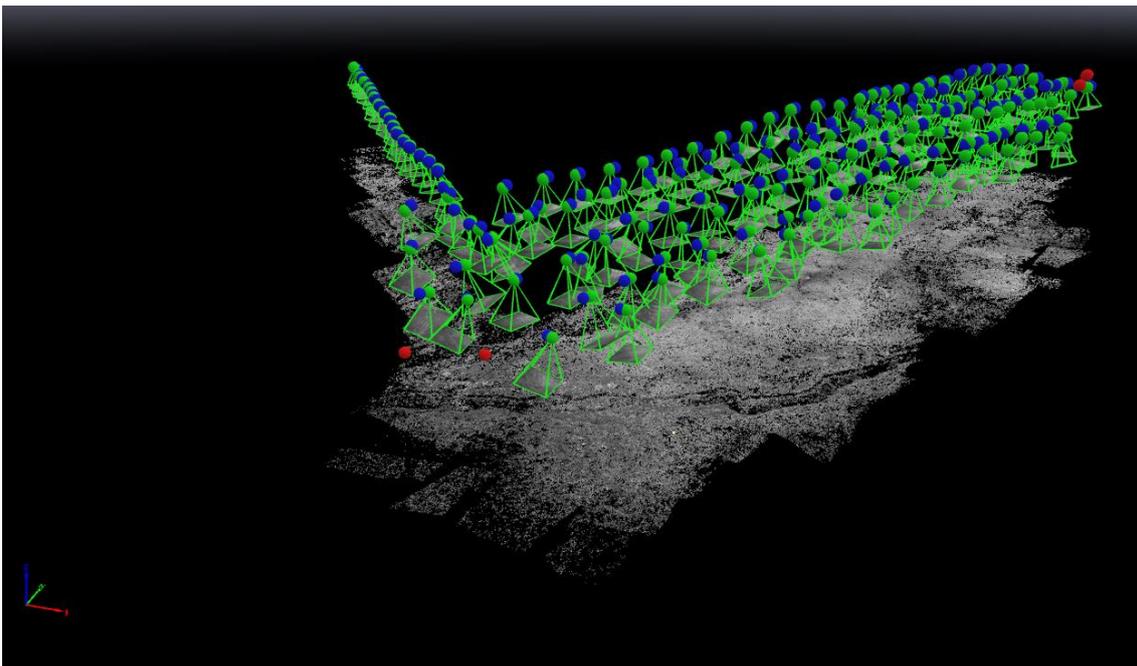


Figura 15. Nube de puntos del procesamiento de imágenes.

Modificado: propia

3.7. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES

En el proceso de cálculo de índices espectrales, se utilizó el programa ArcGIS Pro. En este programa se generaron ortomosaicos a partir de los cálculos de índices, el modelo digital de elevaciones (DSM) y los datos obtenidos en campo. Los

ortomosaicos son imágenes compuestas que representan la combinación de diferentes bandas espectrales, como se muestra en la Figura 16.

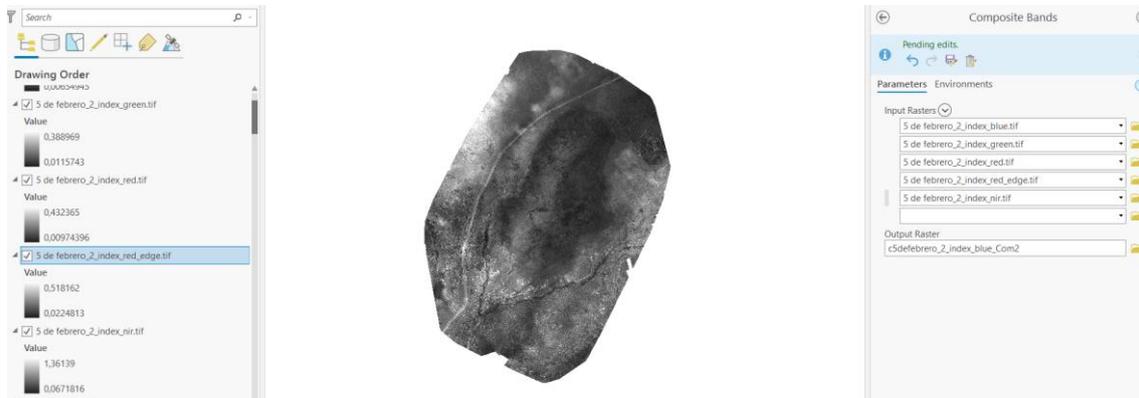


Figura 16. Composición de bandas en el mes de 04 de febrero de 2021.

Modificado: propia

El cálculo de los índices espectrales se basa en la combinación y análisis de las diferentes bandas espectrales capturadas por la cámara multiespectral utilizada en el estudio. Estos índices proporcionan información sobre características específicas del terreno y de la vegetación, como la salud de las plantas, la presencia de agua, el estrés vegetal, entre otros.

El proceso de cálculo de los índices espectrales implica aplicar fórmulas matemáticas a las imágenes capturadas para extraer la información deseada. Estos índices pueden utilizarse posteriormente para realizar análisis y evaluaciones más detalladas del humedal Pugllahoma. Al realizar los cortes de mapas de reflectancia y calcular los índices multiespectrales, es importante utilizar la herramienta adecuada en el programa, como se muestra en la Figura 17. Esta herramienta permite seleccionar las bandas espectrales necesarias y establecer el orden correcto para realizar el cálculo del índice deseado. El orden de las bandas espectrales es crucial, ya que cada índice multiespectral tiene una fórmula específica que requiere la combinación adecuada de bandas. Por ejemplo, el índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) utiliza la información de las bandas roja e infrarroja cercana, mientras que el índice NDWI (Normalized Difference Water Index) utiliza las bandas verdes y de infrarrojo cercano.

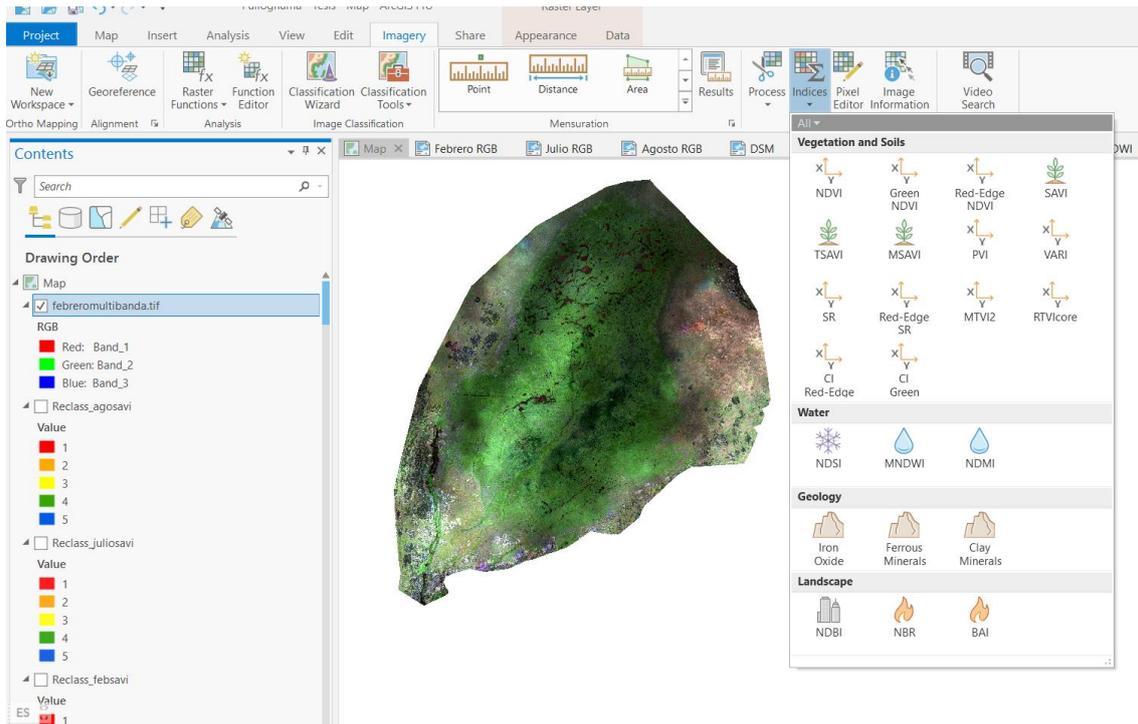


Figura 17. Calculo de índices multispectrales en el mes de 04 de febrero de 2021.

Modificado: propia

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) se ha convertido en una herramienta esencial para monitorear la biodiversidad. En este estudio, se utilizó para evaluar la distribución espacial de la vegetación, identificar áreas con alta biomasa vegetal y monitorear los cambios a lo largo del tiempo en el humedal Pugllohuma. Un valor alto de NDVI generalmente indica buena salud vegetal, basado en la capacidad de las plantas saludables para absorber más clorofila y reflejar más luz en la banda roja (Martínez & Solís, 2018).

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) se emplea en este estudio como una herramienta complementaria al NDVI para evaluar la cobertura vegetal en el humedal. La principal ventaja de utilizar SAVI sobre NDVI es que el primero minimiza el impacto de la reflectividad del suelo en las mediciones. Para el SAVI, el factor de ajuste L juega un papel clave. Este factor se calibra específicamente para ajustar la sensibilidad del índice a la reflectividad del suelo. Aunque generalmente los valores del SAVI varían entre 0 y 1, la calibración de L puede variar y no hay un estándar universalmente aceptado. Dada la importancia de L , su selección y calibración se convierten en un paso crítico.

Observamos que la multiplicación del factor L por 0.5 en la ecuación del SAVI podría alterar significativamente los valores obtenidos. Este fenómeno podría dificultar las comparaciones multitemporales (Jara, 2022).

Los valores del NDWI fluctúan entre -1 y 1. Valores bajos (aproximándose a -1) señalan condiciones de vegetación acuática, sugiriendo una fuerte presencia de vegetación y no necesariamente denotan ausencia de agua. Esta condición indica un alto estrés hídrico para la vegetación, haciéndolo un indicador de sequía que responde con mayor sensibilidad y rapidez que el NDVI. En el ámbito de humedales, valores cercanos a 1 revelan una vegetación densa, como juncos o totoras y otras plantas típicas de humedales, y una menor presencia de agua libre. En realidad, un valor negativo del NDWI en humedales denota zonas dominadas por vegetación acuática y con escasa o nula presencia de agua libre. (Aponte & Ospina, 2019; Estrada & Navas, 2013).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se presentan y analizan los productos derivados del procesamiento de imágenes. Se comparan y contrastan los índices espectrales obtenidos tanto de vegetación como de agua, con datos medidos directamente en campo, particularmente en lo que refiere al nivel freático y un análisis cualitativo con el método de la bota. Al considerar todos estos resultados, se determina que hay cuatro aspectos fundamentales para la evaluación completa del humedal: las variables topográficas, los datos recopilados en campo, los índices de vegetación y el índice de agua.

Las variables topográficas son importantes para comprender la estructura del terreno y su influencia en el humedal. Estas variables pueden incluir el modelo digital de elevación (DSM), que proporciona información sobre la altura y la pendiente del terreno. Además, otros parámetros topográficos, como la rugosidad o la orientación del terreno, pueden ser de utilidad para comprender la dinámica espacial del humedal.

Los datos de campo son fundamentales para validar y calibrar los resultados obtenidos a partir del procesamiento de imágenes. Estos datos pueden incluir mediciones directas del nivel freático, características del suelo, inventarios de especies vegetales y otros parámetros relevantes para la evaluación del humedal. La comparación entre los datos de campo y los productos generados a partir de las imágenes permite validar los resultados y mejorar la interpretación de estos.

Los índices de vegetación son indicadores clave para evaluar la salud y la cobertura vegetal en el humedal. Estos índices se calculan a partir de la respuesta espectral de las plantas en diferentes bandas del espectro electromagnético. Los índices más comunes incluyen el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI), entre otros. Estos índices proporcionan información sobre la densidad y la vitalidad de la vegetación, lo cual es relevante para comprender la función ecológica del humedal.

El índice de agua, que puede basarse en el índice NDWI mencionado anteriormente, es esencial para evaluar la presencia y la distribución de agua en el humedal. Este índice puede indicar la presencia de cuerpos de agua, como lagos, ríos o zonas húmedas, y su variabilidad a lo largo del tiempo. Esta información es valiosa para comprender los procesos hidrológicos y la dinámica del humedal.

En conjunto, estos cuatro análisis fundamentales proporcionan una visión integral y completa del humedal, permitiendo comprender su topografía, la salud de su vegetación, la presencia de agua y otros factores relevantes. Esto aporta información crucial para la gestión y conservación de los humedales, así como para la comprensión de sus funciones ecológicas.

4.1. GEORREFERENCIACIÓN DE LOS MAPAS

La georreferenciación de los mapas es un paso crucial para asegurar la precisión y la correcta ubicación espacial de los datos obtenidos. En este estudio, se utilizó información georreferenciada proporcionada por el FONAG para los 18 piezómetros, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Puntos Georreferenciados de los piezómetros instalados por el FONAG.
Sistema UTM 17S. Datum 1984

Pozo	x	y
1	810093,29	9944631,07
2	810137,67	9944598,18
3	810174,27	9944567,18
4	810219,92	9944548,03
5	810219,24	9944408,11
6	810156,75	9944430,01
7	810115,66	9944464,85
8	810068,43	9944495,29
9	810045,02	9944465,57
10	809984,13	9944402,45
11	810027,95	9944373,5
12	810075,49	9944299,2
13	810117,9	9944262,3
14	810061,62	9944202,67
15	810020,13	9944229,7

16	809991,77	9944260,38
17	809969,27	9944288,87
18	810133,62	9944397,45

Elaboración: propia

Cada pozo de monitoreo tiene asignadas coordenadas geográficas en los ejes x e y, lo que permite su localización precisa en el terreno. Estas coordenadas de micro topografía proporcionadas por el FONAG se utilizaron como puntos de referencia para georreferenciar las imágenes obtenidas durante el estudio (Anexo 2). Se estableció un criterio de diferencia máxima de aproximadamente en donde se corrigió 1.70 m aproximadamente en la posición X (Longitud) y 0.90 m aproximadamente en la posición Y (Latitud) entre los valores de georreferenciación de los piezómetros y las imágenes, para asegurar una buena semejanza y alineación espacial.

La resolución de las imágenes utilizadas en el estudio, con una escala de 7.76 cm/píxel, permitió la visualización y ubicación precisa de los piezómetros en relación con los mapas utilizados. Esto facilitó su utilización como puntos de referencia para la georreferenciación.

En la Figura 18 se presenta la diferencia en similitud entre la imagen corregida y la geolocalización inicial. Este análisis visual permite evaluar la precisión de la georreferenciación y verificar si existe alguna discrepancia significativa entre los puntos georreferenciados y la ubicación real de los piezómetros.

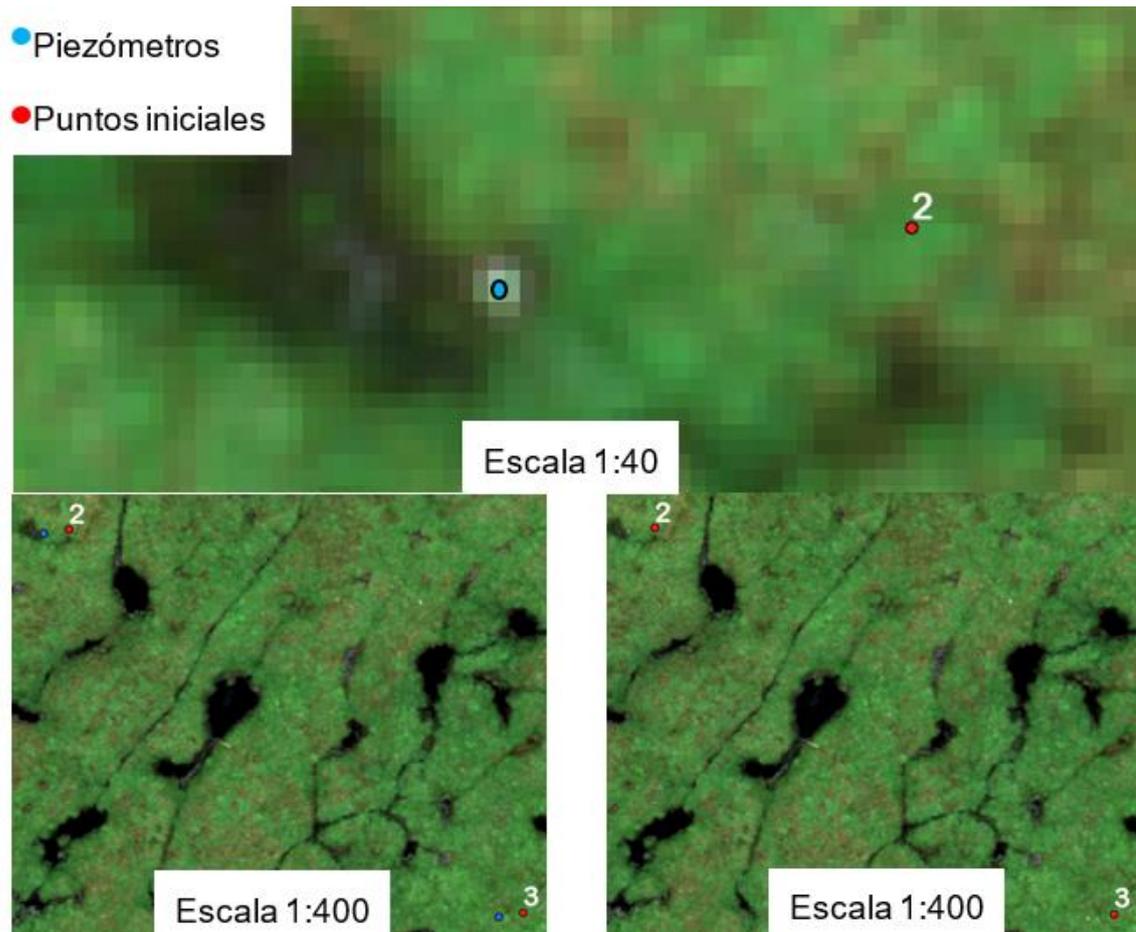


Figura 18. Corrección de mapas con respecto a piezómetros.

Elaboración: propia

La georreferenciación precisa de los mapas es esencial para garantizar la exactitud de cualquier análisis espacial realizado en el estudio. Al utilizar puntos georreferenciados confiables, como los proporcionados por el FONAG, se asegura una correcta alineación de los datos espaciales y se evita cualquier sesgo o error asociado con la ubicación incorrecta de los elementos de interés.

4.2. MAPA A COLOR VERDADERO

4.2.1. ORTOMOSAICOS RGB

Se generaron ortomosaicos RGB que abarcan un área promedio de 596,481 m². La extensión varía debido a las condiciones de vuelo y ambientales en cada caso, lo cual afecta la cobertura del área de estudio. La resolución promedio de estos ortomosaicos es de 7.76 cm/píxel. Para alcanzar esta resolución, en el Mission

Planner se configuró una altura de vuelo de 100 metros. Estos datos se presentan en la Tabla 5.

Las variaciones en la extensión se deben a factores como la estabilidad del dron, la altitud de vuelo, la velocidad del viento y las condiciones de iluminación durante cada sesión de vuelo. Estos factores pueden influir en la precisión y la cobertura de las imágenes capturadas, resultando en diferentes áreas de cobertura en cada ortomosaico generado.

Tabla 5. Datos físicos de procesamiento de imágenes de 2021.

Fecha de toma de la imagen	Extensión (m²)	Resolución (cm/píxel)
04 de Febrero	484 664	7.61
07 de Julio	660 906	7.83
04 de Agosto	643 875	7.84
Promedio	596 481	7.76

Elaboración: propia

La disposición de bandas de colores utilizada en los ortomosaicos RGB es la combinación de rojo, verde y azul. Esta configuración permite la visualización detallada del terreno, así como la identificación de características importantes de la vegetación y el drenaje superficial. La resolución de los ortomosaicos indica la precisión y el nivel de detalle con el que se han capturado las imágenes y generado los mosaicos. En este caso, la resolución promedio de 7.76 cm/píxel indica que se ha logrado una representación detallada del área de estudio.

En la Figura 19, se muestra un ejemplo visual de un ortomosaicos RGB. Esta imagen ilustra cómo la combinación de las bandas de colores rojo, verde y azul permite la visualización de diferentes elementos del terreno, así como detalles importantes de la vegetación y el drenaje superficial. Es importante destacar que los ortomosaicos RGB son una herramienta útil en el análisis de datos geoespaciales, ya que proporcionan una representación visual clara y detallada del área de estudio. Estos mosaicos permiten la identificación de patrones, la evaluación de la vegetación y el análisis del drenaje superficial, entre otros usos en la investigación de humedales.

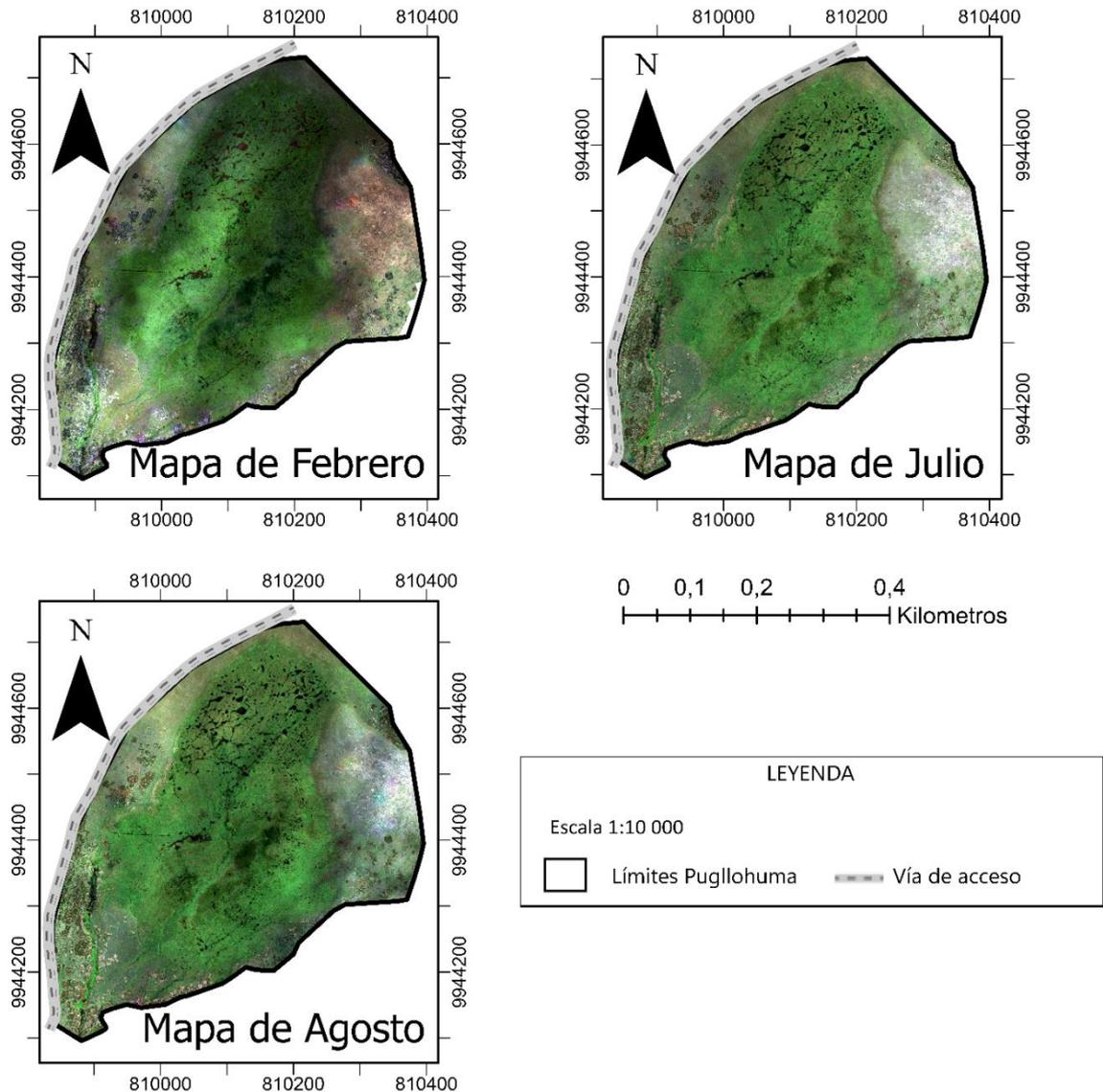


Figura 19. Imágenes RGB de los distintos meses: 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021 en el humedal Pugllahoma.

Elaboración: propia

El uso de colores en las imágenes facilita la identificación de características específicas del terreno. En el humedal estudiado, por ejemplo, es posible distinguir sitio con agua superficial en la región central mediante ciertos tonos oscuros, mientras que, especialmente en la zona nororiental, otros colores claros indican un suelo con escasa vegetación. Es particularmente notorio que en la representación RGB correspondiente al mes de febrero, hay una menor presencia de tonalidades verdes. Esta disminución del verdor en el mapa sugiere áreas donde la vegetación

es menos densa, permitiendo una interpretación visual más clara de las condiciones del humedal en ese período.

4.3. MAPAS DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS

4.3.1. MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE (DSM)

En el contexto del presente trabajo de investigación, se ha generado un Modelo Digital de Superficie (DSM) a partir de los ortomosaicos obtenidos. Esta representación se caracteriza por tener una resolución de 7.61 cm/píxel, la cual fue obtenida en el mes de febrero. El DSM, como herramienta geoespacial, es esencial para representar las alturas de la superficie terrestre y, por ende, ofrece información descriptiva acerca de la topografía del área en estudio. Mediante el análisis de este modelo, se ha detectado una diferencia altimétrica significativa de 36.56 m entre el punto de mayor elevación, que registra 4133.37 m sobre el nivel del mar, y el punto más bajo, con una altura de 4096.81 m.

En la Figura 20, se hace uso de las elevaciones contenidas en el DSM con el objetivo de analizar y comprender el sistema de drenaje predominante en el humedal. Esta figura, rica en detalles altimétricos, es instrumental para identificar patrones de flujo de agua y determinar las principales arterias de drenaje que atraviesan y definen el área investigada.

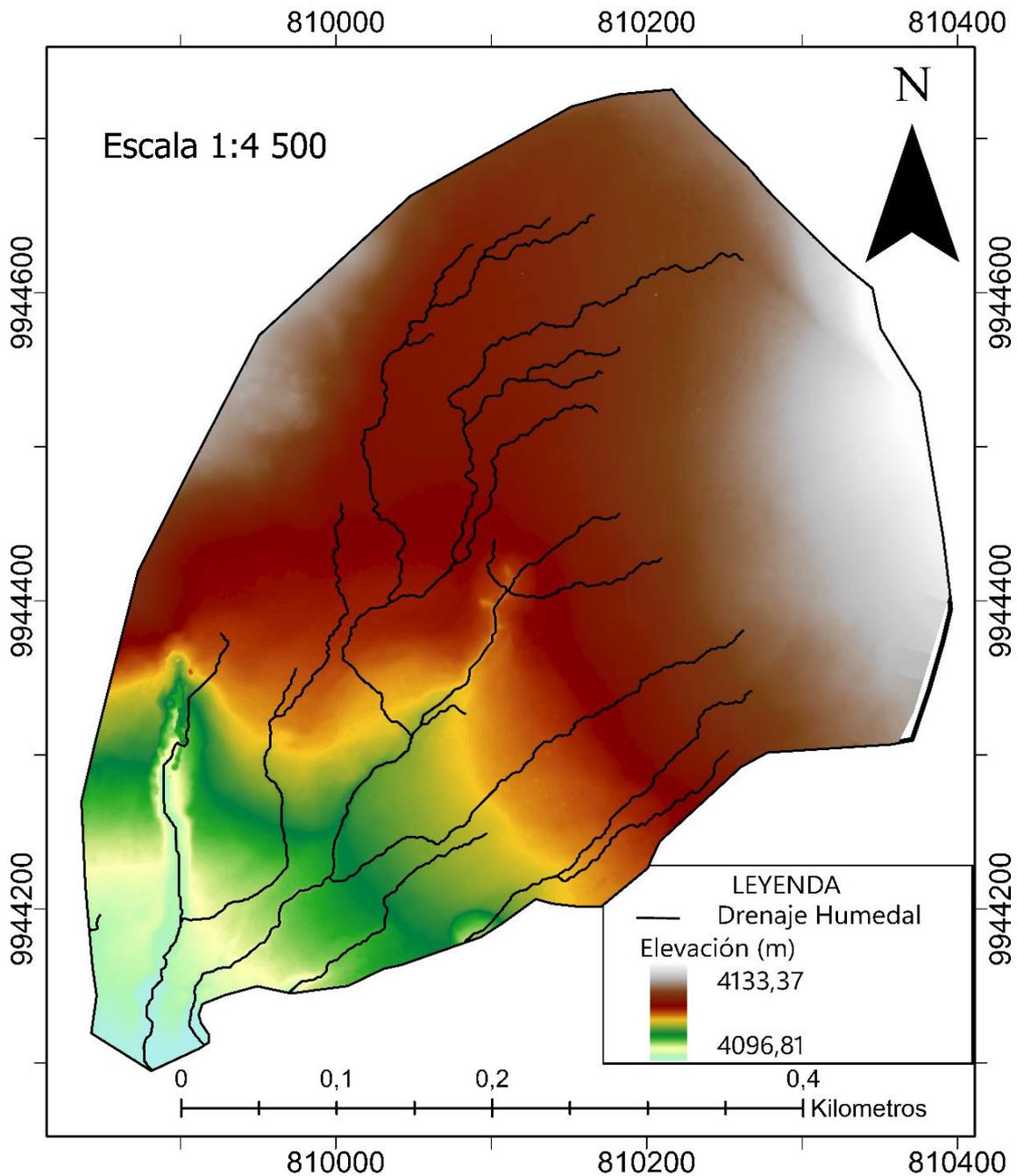


Figura 20. Mapa DSM del humedal Pugllohuma.

Elaboración: propia

El Modelo Digital de Superficie (DSM) se constituye como una herramienta esencial en el ámbito del análisis geoespacial. Este modelo ofrece detalles acerca de la topografía y las variaciones altimétricas de un territorio específico. A través del DSM, es posible identificar distintos patrones de drenaje que se dirigen hacia la zona sur occidental del humedal. Este análisis destaca una región superior con una elevación más pronunciada que gradualmente desciende hacia el sur.

4.3.2. MAPA DE PENDIENTES

La Figura 21 despliega las pendientes del terreno del área bajo estudio. En esta representación, lo que salta inmediatamente a la vista es una pendiente máxima de $87,45^\circ$. Esta pendiente se encuentra concentrada en los drenajes del humedal, que están representados en un color morado. Estos drenajes tienen una disposición que parte desde la zona central y se extiende hacia el sur. Además, hacia el suroeste, se puede observar una quebrada, distintivamente demarcada con una línea de mayor grosor. Es importante subrayar que estas zonas con inclinaciones tan pronunciadas se categorizan dentro de lo que se conoce como áreas de denudación, aunque, al observar el mapa en su conjunto, se puede concluir que su presencia es relativamente mínima en términos de extensión. En un análisis más global del terreno, se detecta que la pendiente media es de $4,05^\circ$, una cifra que se traduce en una inclinación que se puede describir como "suavemente inclinada".

Esta característica topográfica sugiere que estas áreas son propensas a presentar altas concentraciones de agua, especialmente tras eventos de precipitación. Esta suposición se ve reforzada al observar la zona central del mapa, que resalta por su color verde oscuro, lo que indica pendientes cercanas a los 2° , típicas de áreas de terreno fundamentalmente plano. Sin embargo, para ofrecer un contrapunto, las pendientes que oscilan entre 4° a 16° están predominantemente en las áreas que rodean el humedal. Esta variación en la pendiente se hace especialmente notoria en la zona oeste del mapa, donde la configuración del terreno sugiere una inclinación más marcada que conduce hacia las extensas planicies ubicadas en la parte central del área estudiada (Segura et al., 2011; Van Zuidam, 1987).

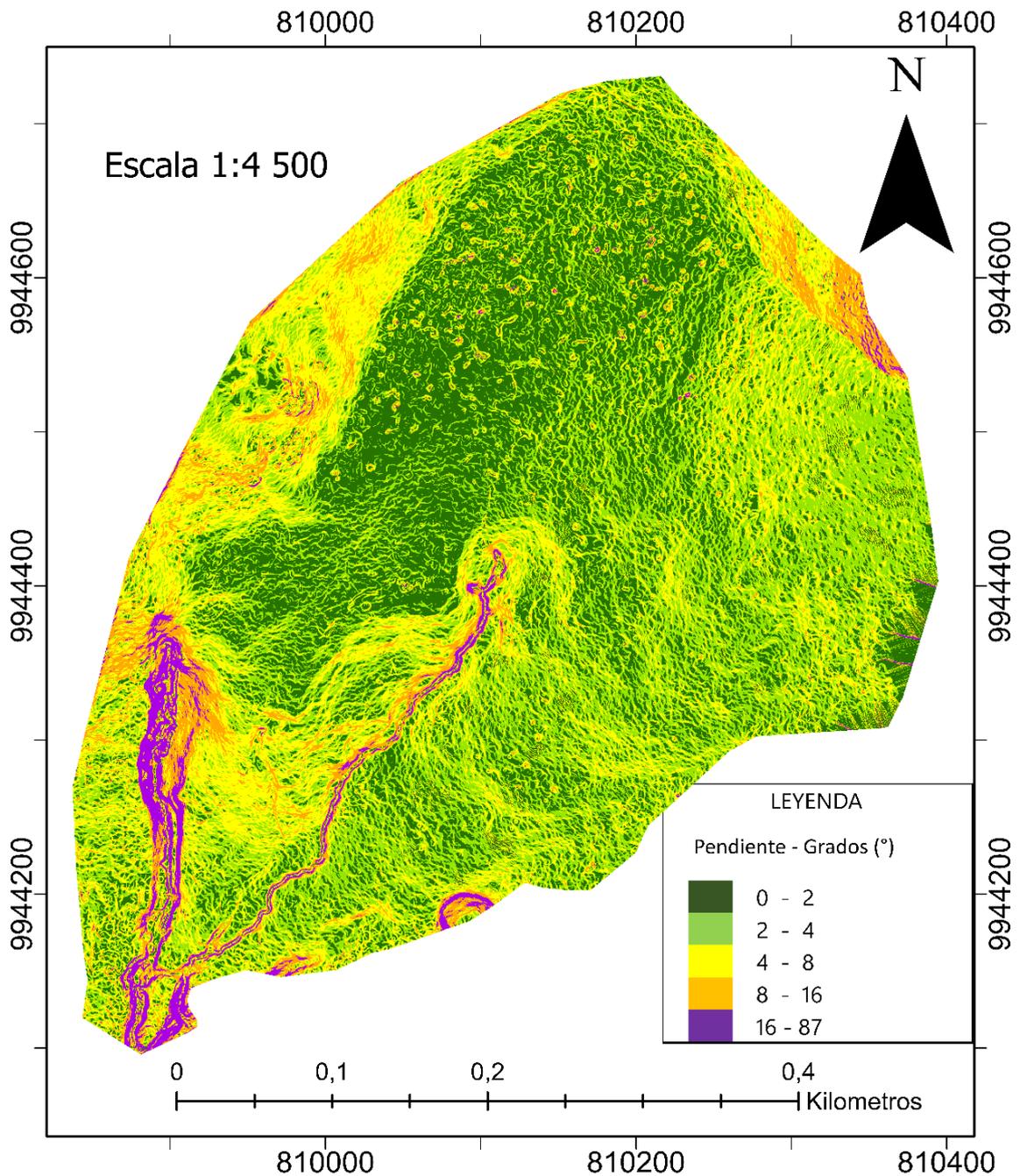


Figura 21. Mapa de pendientes del humedal Pugllohuma.

Elaboración: propia

4.3.3. CURVATURA

El análisis de curvatura es una herramienta esencial en geomorfología y hidrología, proporcionando perspectivas sobre la tasa de cambio de la pendiente y, por ende, el comportamiento del agua en la superficie. Un valor positivo en la curvatura sugiere áreas cóncavas, que son zonas propensas a la acumulación de agua, como

depresiones o pequeñas cuencas. En contraposición, valores negativos representan áreas convexas, que son características de lomas o crestas, lugares donde el agua tiende a escurrirse. Los valores extremos obtenidos, 42,44% para el positivo y 57.56% para el negativo, destacan la heterogeneidad topográfica del área de estudio.

Por otro lado, es evidente que mientras que la mayor parte del terreno presenta una distribución uniforme de curvatura, las quebradas se distinguen claramente. Estos cursos de agua naturales suelen ser puntos clave para el escurrimiento y, por ende, susceptibles a procesos erosivos. La Figura 22 ilustra esto, donde las zonas con tonalidad café identifican áreas con curvaturas negativas pronunciadas, asociadas a laderas empinadas y escurrimientos acelerados. En contraposición, las regiones con un tono verde claro, especialmente en el núcleo del humedal, indican áreas de mayor retención de agua. Esta característica, sumada a la falta de variaciones abruptas en la altitud y la escasez de quebradas, permite que el agua se acumule de manera temporal, escurriendo de forma subsuperficial hacia zonas de drenaje superficial sin causar erosión significativa en el humedal.

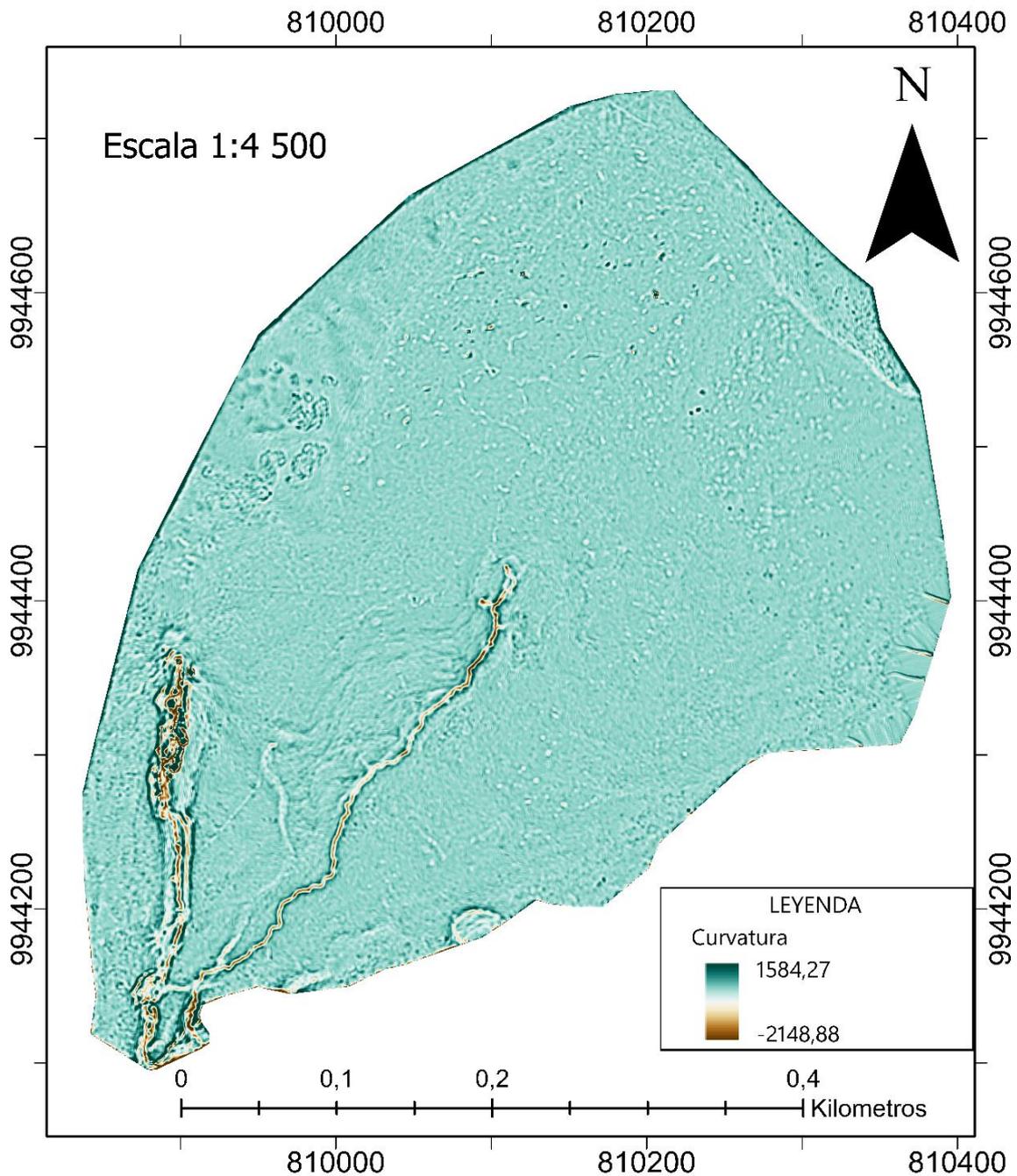


Figura 22. Mapa de curvatura del humedal Pugllohuma.

Elaboración: propia

4.3.4. CURVAS DE NIVEL Y PERFILES DE ELEVACIÓN

La Figura 23 ofrece una representación de las curvas de nivel del humedal Pugllohuma. Estas curvas han sido delineadas con intervalos de 1.5 metros, permitiendo una identificación detallada y precisa de las particularidades topográficas de la región. Gracias a esta estrategia, podemos apreciar de manera

clara las oscilaciones de altitud presentes en el área estudiada, evidenciando notoriamente las elevaciones que se sitúan en la periferia del humedal. Esas prominencias orográficas circundantes son de suma importancia ya que, muy probablemente, influyen las rutas del flujo del agua, conduciendo a la concentración de esta en el núcleo central del humedal. En cuanto al centro del humedal, las curvas de nivel nos descubren la presencia de drenes superficiales y nos facilitan la delineación de perfiles de elevación, apoyándose en los piezómetros existentes en la zona. Estos sistemas de drenaje son fundamentales para la dinámica hídrica del humedal. Actúan como vasos comunicantes que recogen el agua de las áreas elevadas circundantes y la canalizan, principalmente, hacia la región sur del humedal.

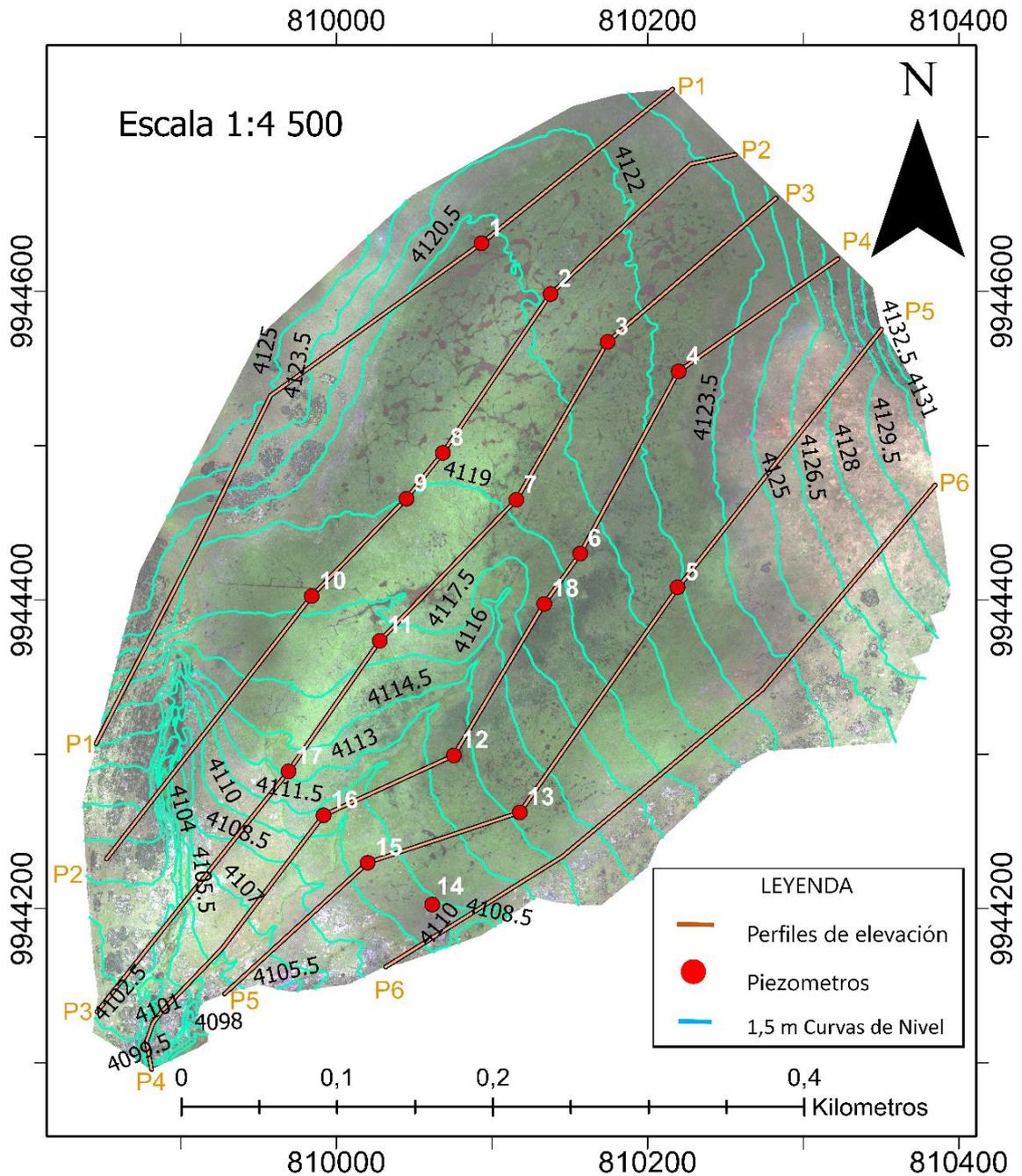
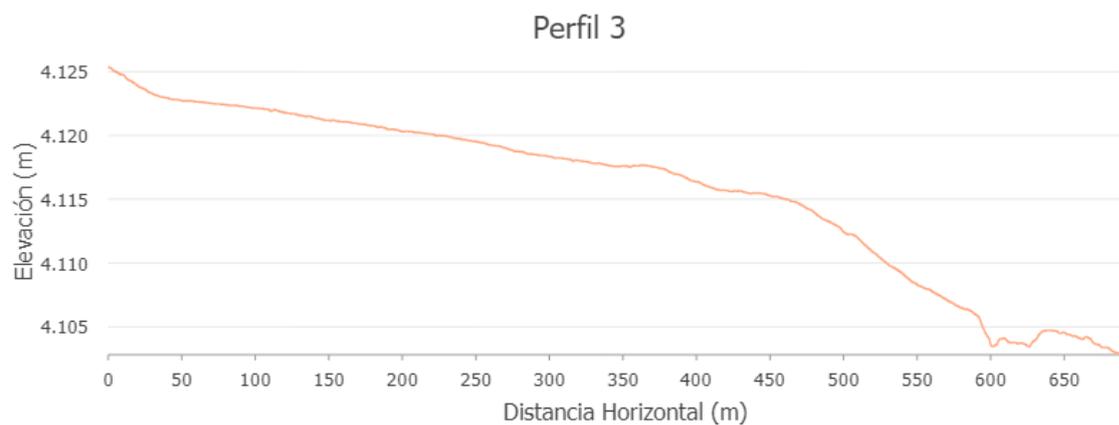
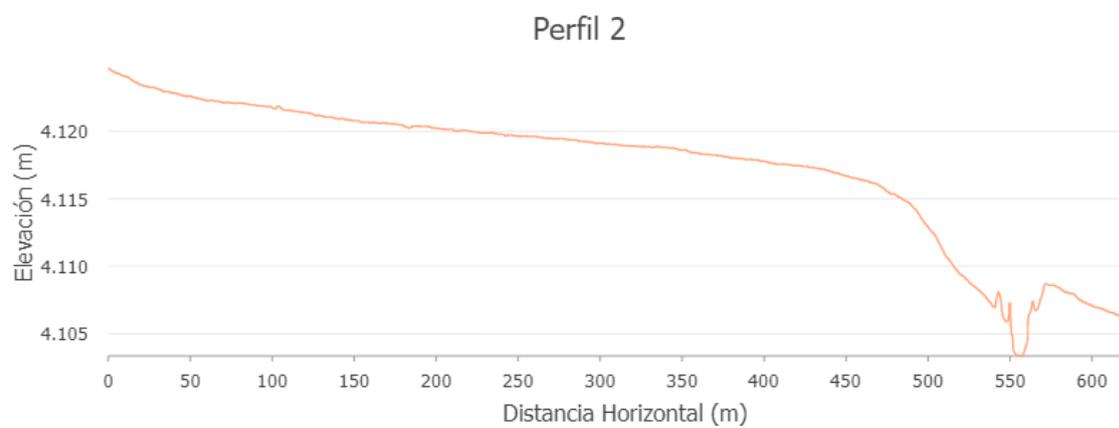
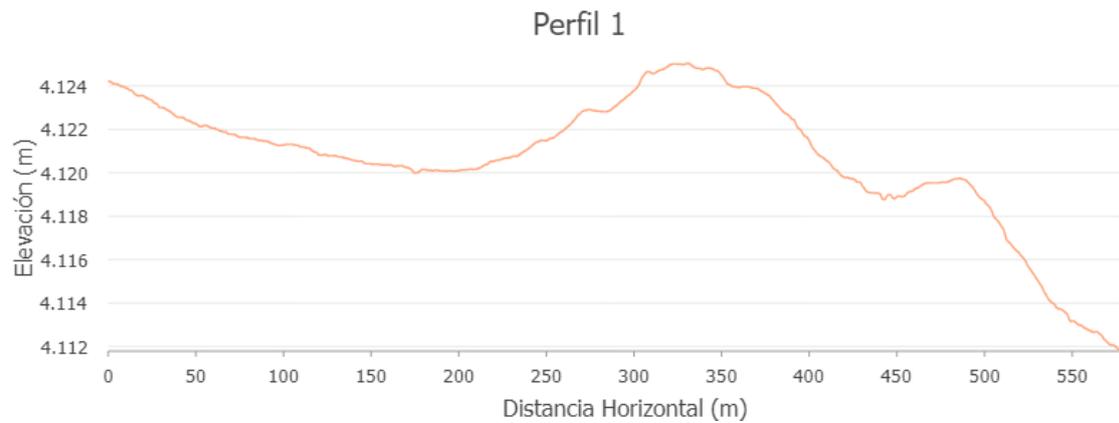


Figura 23. Mapa de curvas de nivel y delimitación de los perfiles de elevación del humedal Pugllahoma.

Elaboración: propia

Referente a las elevaciones, se observa que el humedal se extiende desde una altura máxima de 4132,5 m hasta una mínima de 4098 m, lo que da como resultado una variación de elevación de 34,5 m. Las áreas de mayor altitud se encuentran en la parte nororiental del humedal, mientras que las de menor altitud se ubican en la zona central de la cuenca, extendiéndose hasta el punto de cierre del humedal.

Aquí se observa una depresión que simboliza una quebrada dentro del humedal, lugar donde se evidencia los principales transectos de mediciones piezométricas.



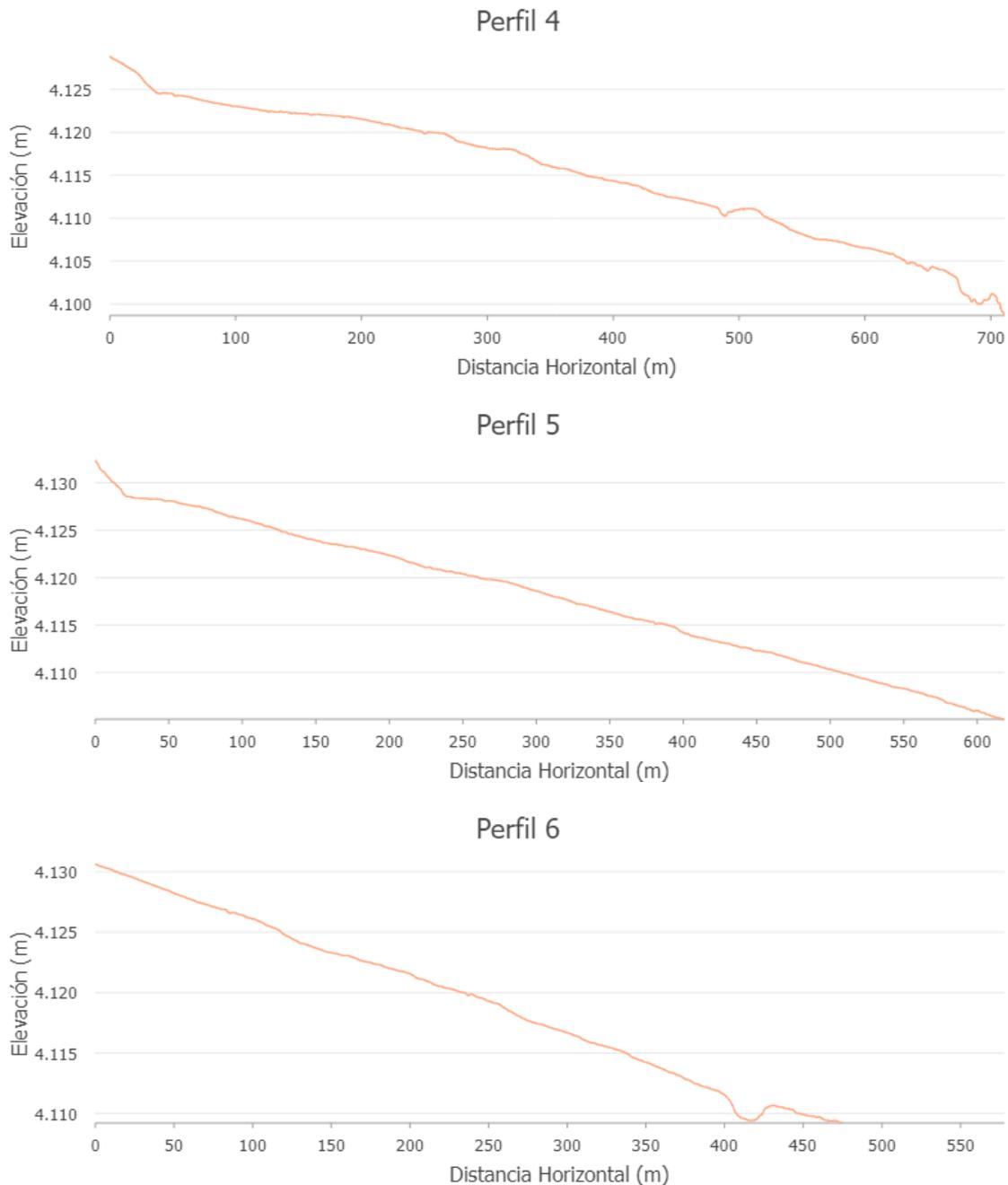


Figura 24. Perfiles de elevaciones a lo largo de los mayores ejes.

Elaboración: propia

La complejidad geomorfológica del humedal Pugllohuma tiene un impacto significativo en su dinámica hídrica. La región experimenta variaciones altitudinales sutiles, como se muestra en la Figura 24, que muestra los perfiles de elevación de los ejes identificados anteriormente en la Figura 23. La distribución uniforme de los perfiles y su efecto de confinamiento en el terreno son favorecidos por estas pequeñas variaciones de elevación. Sin embargo, la presencia de quebradas,

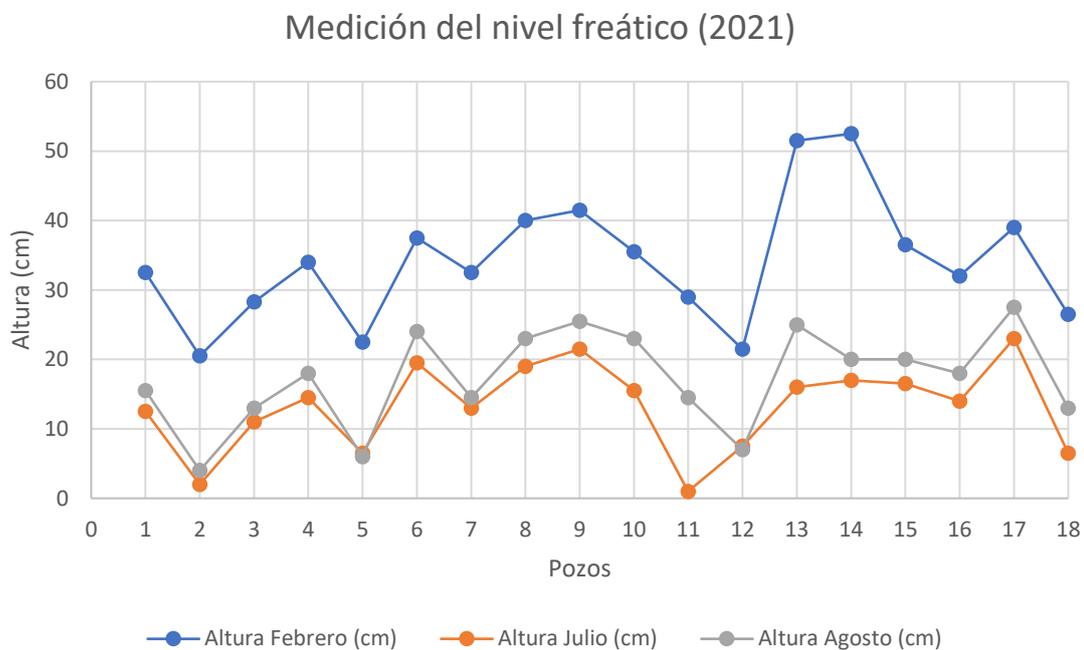
particularmente notables en los perfiles 2 al 4 y 6, interrumpe esta uniformidad altitudinal. La altitud de estas quebradas cambia abruptamente, lo que provoca un flujo de drenaje superficial de agua. En el perfil 2, más precisamente se encuentra una distancia de 550 metros, se encuentra el punto más deprimido. Una quebrada transversal en el sistema de drenaje del humedal coincide con esta depresión. Sin embargo, el perfil 5 muestra una topografía mucho más uniforme con pocas variaciones altitudinales, lo que indica un suelo más plano. En resumen, la complejidad geomorfológica de la región se ve reforzada por la diversidad del relieve y las características del flujo de agua, lo que tiene implicaciones directas en la dinámica hídrica del humedal Pugllahoma (Walton et al., 2014).

4.4. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL NIVEL FREÁTICO

4.4.1. VARIACIONES ESTACIONALES DEL NIVEL FREÁTICO

La Tabla 6 muestra los registros de las mediciones del nivel freático realizadas en 18 pozos en el humedal. Estas mediciones se llevaron a cabo de forma periódica en tres momentos diferentes: en febrero, julio y agosto de 2021. Se puede observar que existen variaciones en los niveles freáticos a lo largo de los meses, lo que indica cambios en la cantidad de agua presente en el humedal en diferentes momentos.

Figura 25. Medición de nivel freático en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.



Elaboración: propia

El análisis de los datos obtenidos de los niveles piezométricos evidencia fluctuaciones en los niveles de agua subterránea a lo largo de tres meses distintos: 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto. Esta variabilidad puede interpretarse a través de la relación inversa entre la profundidad de los pozos y el nivel de humedad: cuanto menor es la profundidad, mayor es el nivel de humedad en esa localidad. Por ejemplo, el primer pozo muestra una disminución de su profundidad desde los 32,5 cm en febrero a 12,5 cm en julio, para posteriormente experimentar un ligero incremento a 15,5 cm en agosto. Estas fluctuaciones son indicativas de un período de recarga hídrica o, posiblemente, de la influencia de un ciclo estacional con un incremento de precipitaciones o cambios en el flujo subterráneo durante estos meses.

Sin embargo, no todos los pozos exhiben el mismo comportamiento como se ve en la Figura 25. Mientras que algunos pozos, como el quinto, mantienen una profundidad casi constante, indicando niveles de humedad estables, otros, como el sexto pozo, muestran una tendencia de aumento del nivel de agua conforme avanzan los meses. Estas diferencias en los patrones de profundidad entre los

pozos sugieren una heterogeneidad en las condiciones subterráneas o en las fuentes de recarga de agua en diferentes localidades.

4.4.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN PARA EL DEM FREÁTICO

A partir de los datos de la medición de nivel freático de la Figura 25. ArcGIS Pro ofrece diversas herramientas de interpolación para la elaboración del Modelo Digital de Elevación (DEM) del nivel freático, tales como Inverse Distance Weight (IDW), Kriging, Tendency, Spline y Topo to raster. Cada método tiene características distintas en cuanto al análisis y aplicación de los valores de entrada. A partir de un análisis detallado, se buscó determinar cuál de ellos proporcionaría los resultados más precisos y adecuados para la generación del DEM del nivel freático, como se ilustra en la Figura 26.

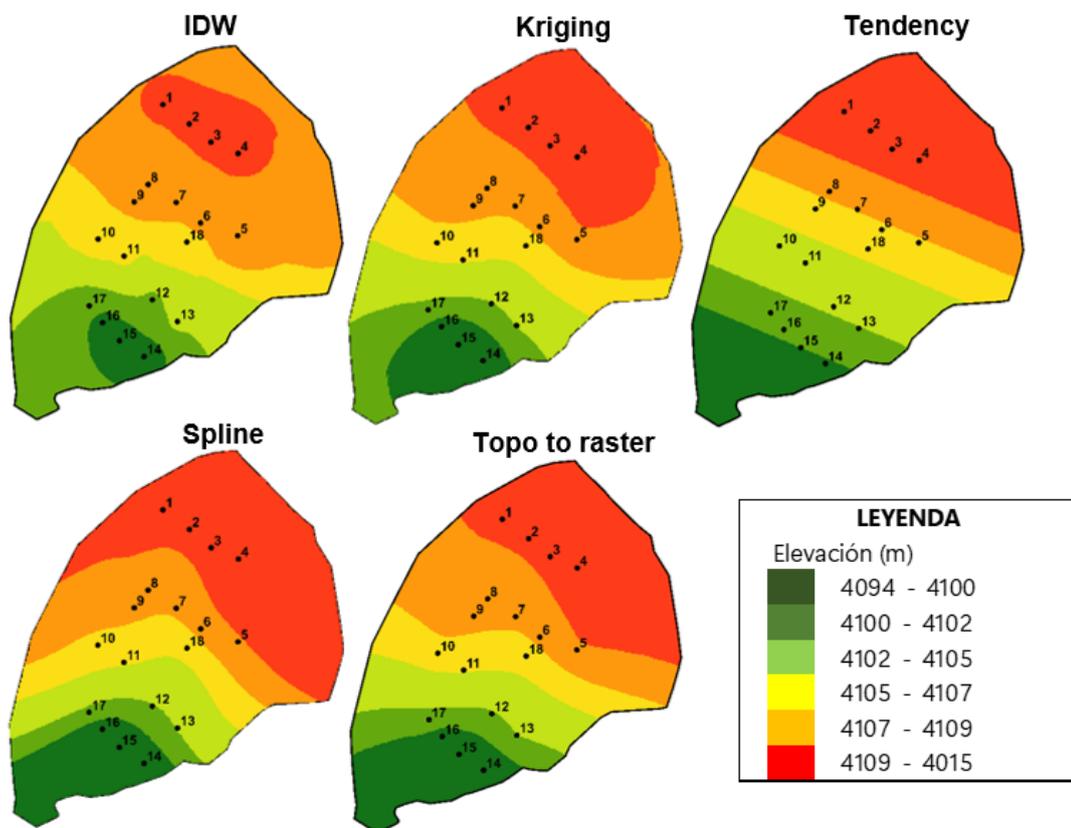


Figura 26. Comparación de métodos de interpolación para generación de nivel freático.

Elaboración: propia

El método IDW, a pesar de priorizar los puntos de entrada, crea una representación que podría describirse como una "capa montañosa", exagerando los valores medidos. Por otro lado, tanto Kriging con un semi-variograma que describe la variabilidad espacial de los datos en función de la distancia entre ellos como Topo to raster generan resultados comparables; sin embargo, no coinciden con el Modelo Digital de Superficie (DSM) del terreno. Tendencia, a pesar de ser exacto en términos de los puntos de entrada, genera resultados lineales que no reflejan la topografía real del terreno (Hernández, 2020).

Dada la evaluación anterior, el método Spline destaca por su precisión y similitud con el DSM del terreno. Este método ajusta una superficie matemática basada en los puntos de entrada y evita curvas cerradas, resultando en una representación más uniforme. Con base en estas características, el método Spline se eligió como el más adecuado para construir el DEM del nivel freático utilizando los datos de los 18 piezómetros del humedal.

4.4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

En la Figura 27 se muestra la diferencia entre el Modelo Digital de Elevación (DEM) del nivel freático obtenido mediante el método de interpolación Spline (Figura 26) y el Modelo Digital del Terreno (DSM) del humedal (Figura 20). La diferenciación cromática permite visualizar la variación en la acumulación de agua conforme a los distintos niveles freáticos, con detalles cuantitativos proporcionados en la Tabla 6. Se observa una acumulación notable de agua en las áreas de drenaje, lo que confirma las indicaciones previas del DSM en la Figura 20.

Al analizar la tendencia de los datos, se evidencia una semejanza entre los cambios en los niveles freáticos y el tiempo. Por ejemplo, se observa que en el mes de julio las zonas muestran una altura superior del nivel freático en comparación con el mes de febrero, período en el que los valores disminuyen. Esta variación temporal sugiere una relación entre los cambios estacionales u otros factores que afectan la acumulación y distribución del agua subterránea.

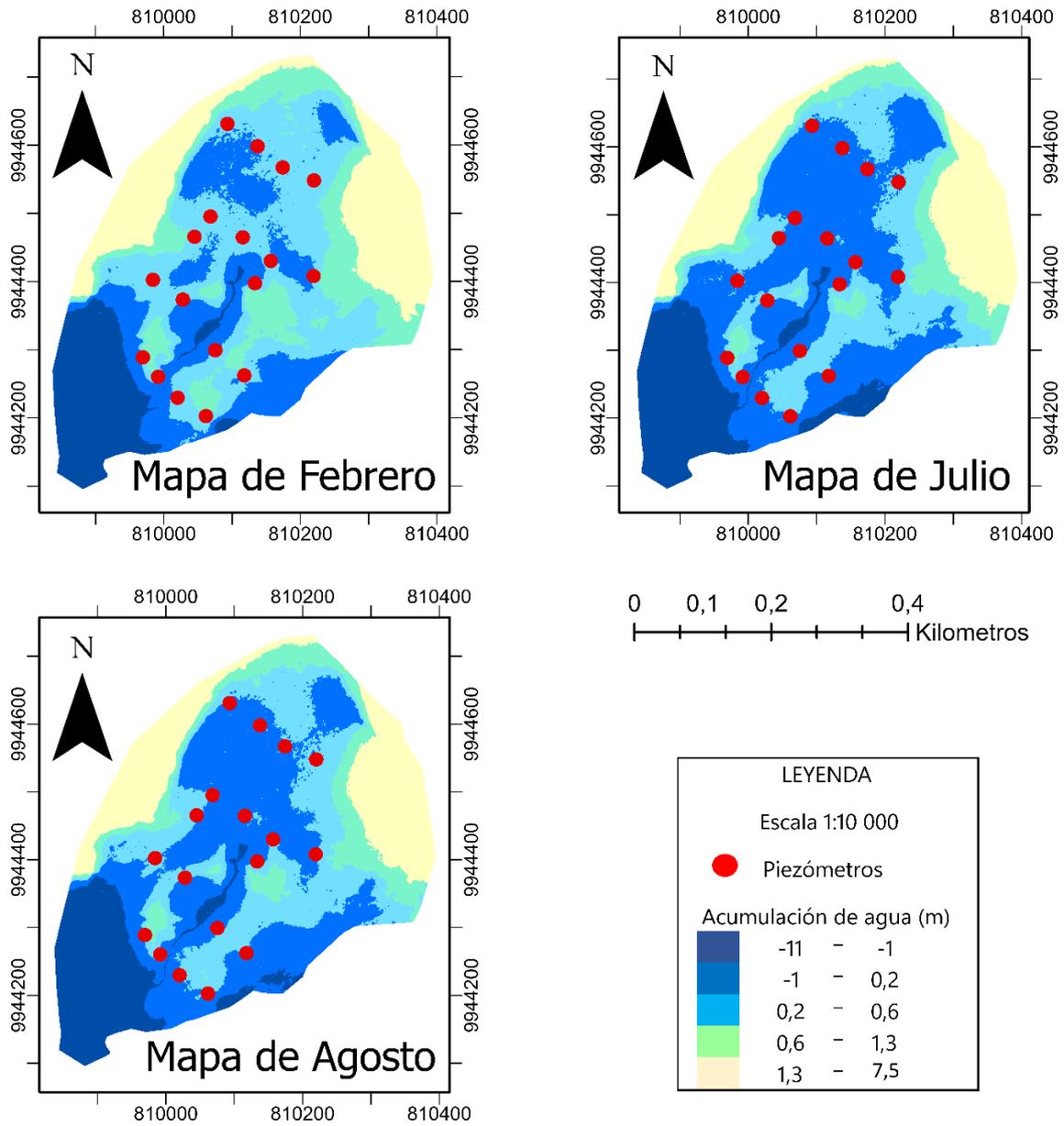


Figura 27. Elevaciones de nivel freático en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Elaboración: propia

Tabla 6. Distribución de rangos y porcentajes de cobertura mapa de niveles freáticos en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Símbolo	Rangos	Porcentaje de Febrero (%)	Porcentaje de Julio (%)	Porcentaje de Agosto (%)	Clase
	-11 – -1,0	13,02	15,02	14,10	1
	-1,0 – 0,2	20,78	36,98	34,33	2
	0,2 – 0,6	30,63	21,04	23,76	3
	0,6 – 1,3	16,19	9,47	10,20	4
	1,3 – 7,5	19,38	17,49	17,61	5
Total		100	100	100	

Elaboración: propia

En febrero, las áreas de la clase 1, que representan quebradas y drenajes principales con un rango de valores entre -11 y -1.0, representaron el 13,02% del total. Los valores negativos indican que el nivel freático está por debajo del terreno circundante. Es decir, estas áreas muestran que el agua subterránea se encuentra a una profundidad mayor que la superficie del suelo. Sin embargo, hubo un pequeño aumento en julio y agosto, con un porcentaje del 15,02% y un 14,10%, respectivamente. Esta variación puede indicar que durante los meses de julio y agosto hay menos cambios en el flujo de agua hacia las quebradas y los drenajes, mientras que durante el mes de febrero hay menos flujo de agua hacia las quebradas.

La clase 2, identificada como zonas de mayor acumulación de agua y sistemas de drenaje con valores entre -1.0 y 0.2, mostró una variación significativa a lo largo de los meses. Los valores negativos aún indican que el nivel freático está por debajo del terreno circundante, pero más cerca de la superficie que en la clase 1. Mientras en febrero tenían un 20,78%, en julio aumentaron significativamente al 36,98%. Aunque hubo una ligera disminución en agosto al 34,33%, todavía es un porcentaje significativo, lo que indica que julio podría ser un mes de alta acumulación de agua en estas áreas. Al igual que en la clase 1, se puede ver una disminución en el flujo de agua y, por lo tanto, una disminución en el flujo de agua en los drenajes.

En febrero, la clase 3, que se refiere a áreas con moderada capacidad de almacenamiento y valores entre 0.2 y 0.6, representó el 30,63%. Estos valores

positivos indican que el nivel freático está por encima del terreno circundante, lo que sugiere una acumulación de agua en estas áreas. Sin embargo, en julio disminuye al 21,04%, pero luego aumenta ligeramente al 23,76% en agosto. Este comportamiento sugiere que su capacidad de almacenamiento cambia debido a una zona de menor acumulación de agua en las arterias alejadas del drenaje y no llega a las zonas de mayor depósito que están en los meses de julio y agosto.

La clase 4, que se refiere a áreas con capacidad de almacenamiento baja y un rango de 0,6 a 1,3, experimentó cambios similares. Estos valores positivos indican que el nivel freático está por encima del terreno circundante, pero con una capacidad de almacenamiento más limitada que la clase 3. En febrero, representaron el 16,19%, pero disminuyeron a 9,47% en julio, lo que sugiere que las menores precipitaciones afectan más estas áreas con menor capacidad de almacenamiento.

Finalmente, la clase 5, que tiene una baja capacidad de almacenamiento y valores entre 1.3 y 7.5, muestra una variación mínima a lo largo de los meses. Estas áreas alcanzaron el 19,38% en febrero, mientras que en julio y agosto alcanzaron el 17,49% y el 17,61%, respectivamente. Los valores positivos indican que el nivel freático está por encima del terreno circundante, pero con una capacidad de almacenamiento muy limitada. Esta estabilidad muestra que, durante los meses analizados, las áreas con la menor capacidad de almacenamiento tenían un comportamiento bastante constante.

4.4.4. ANÁLISIS MULTITEMPORAL MEDIANTE EL MÉTODO DE LA BOTA

El proceso de verificación de datos se llevó a cabo mediante el método de la bota, cuyos detalles específicos están consignados en el Anexo 3. Esta metodología implicó el registro de observaciones a lo largo de diferentes transectos, los cuales están claramente ilustrados en la Figura 12. Para una comparación cualitativa y visual de los datos, se empleó un modelo de interpolación. El objetivo era encontrar el modelo que mejor representara la realidad observada y que, por ende, tuviera la mayor congruencia con los datos previamente entregados sobre el nivel freático. Tras una revisión detallada, se determinó que el método "Topo to Raster" resulta ser el más adecuado, ya que ofrece un ajuste superior a los datos en comparación con otras técnicas de interpolación y el modelo DEM de la zona de estudio, una de

las características más fuertes del método ANUDEM es su capacidad para producir modelos que son hidrológicamente correctos. Esto es crucial para aplicaciones como el modelado de cuencas hidrográficas. Este ajuste es particularmente notable en zonas específicas, lo que refuerza la confiabilidad del método en nuestro estudio.

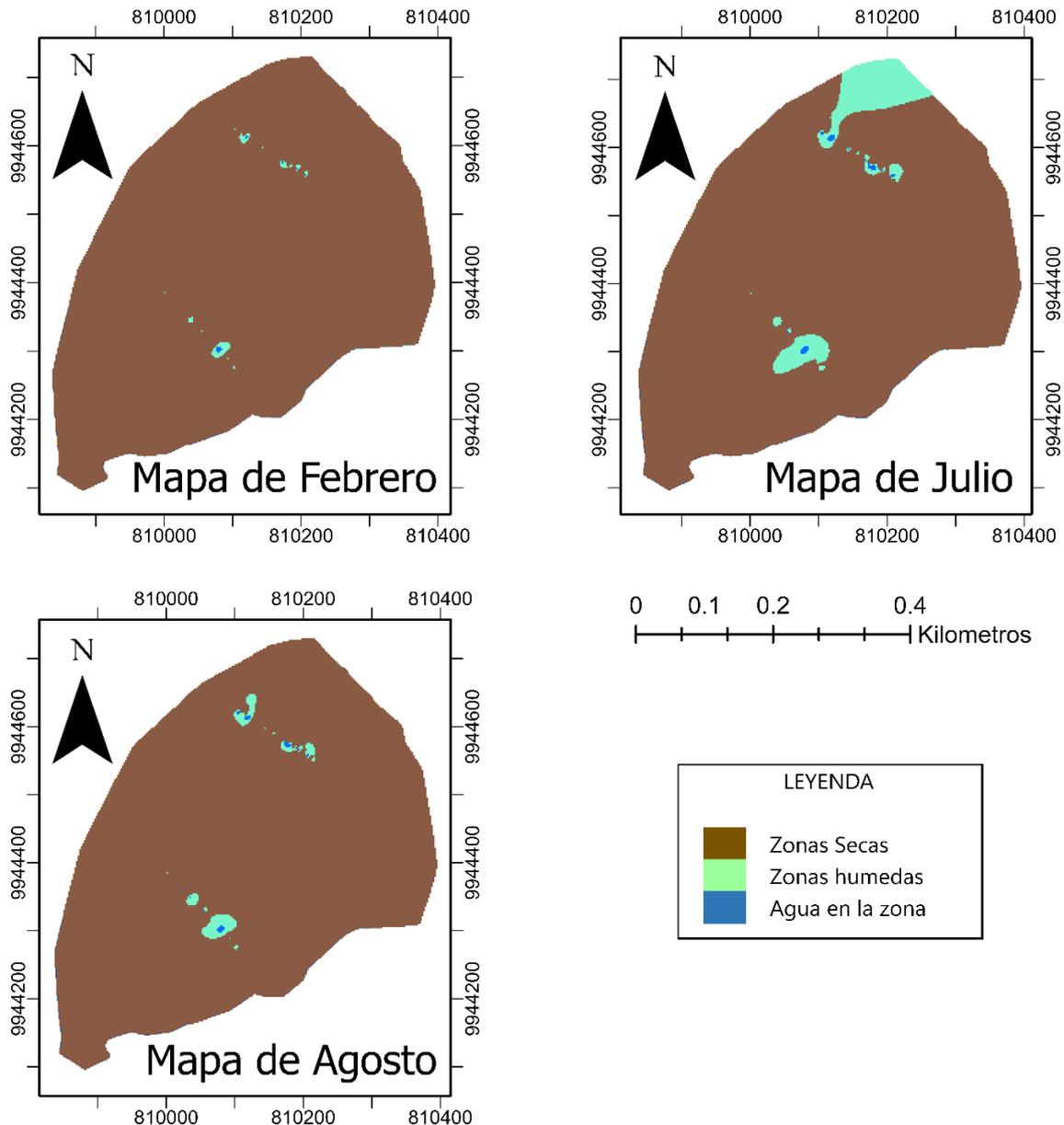


Figura 28. Interpolación del método de la Bota en el mes de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Elaboración: propia

La Figura 28 ilustra las zonas diferenciadas por acumulación y saturación de agua en el área investigada. Las regiones con notable acumulación de agua se destacan en azul, mientras que las zonas saturadas aparecen en magenta y aquellas con datos insuficientes o suelo seco están representadas en marrón. Es esencial entender que este análisis no abarca la totalidad del humedal, sino que se enfoca en transectos específicos, sirviendo la información como un indicativo más que como una representación exhaustiva. Para una interpretación detallada y precisa, es crucial un posterior análisis mediante índices específicos. Además, la predominancia de áreas azules, especialmente en julio, y las anotaciones cualitativas sugieren una notable semejanza entre los datos interpolados y las observaciones directas en el campo, reforzando la validez del método de interpolación utilizado para representar la distribución hídrica en la zona de estudio.

4.5. MAPAS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

El estado de salud y vitalidad de la vegetación en un área geográfica específica puede ser eficientemente evaluado mediante el uso de índices de vegetación. Estos índices utilizan datos espectrales, específicamente la radiación emitida o reflejada por las plantas, para extraer información crucial sobre aspectos como su estado fisiológico, contenido de clorofila y densidad de biomasa (Piedad et al., 2020). Esta información es especialmente relevante para los humedales, que desempeñan roles ecológicos vitales y están en constante interacción con factores ambientales. Dentro de los múltiples índices disponibles, el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) destacan por su eficacia y amplio uso en el monitoreo de humedales. A continuación, se detallará el análisis y resultados obtenidos a partir de estos dos índices en el área de estudio.

4.6.1. MAPAS NDVI

La Figura 29, derivada de las fotografías tomadas en febrero, julio y agosto de 2021, muestra variaciones en la densidad vegetal representadas en diferentes escalas de colores. En agosto y julio, las áreas con alta densidad vegetal y abundante clorofila son notables, así como la presencia de cuerpos de agua. En febrero, por otro lado, hay una mayor presencia de áreas con valores NDVI cercanos a cero.

Adicionalmente, las áreas periféricas al humedal muestran menor densidad vegetal pero mayor humedad y biomasa en el centro del humedal. Esta distribución sugiere una similitud entre la humedad del suelo y la salud de la vegetación, validando la utilidad del NDVI como una herramienta para monitorear las condiciones ecológicas del humedal.

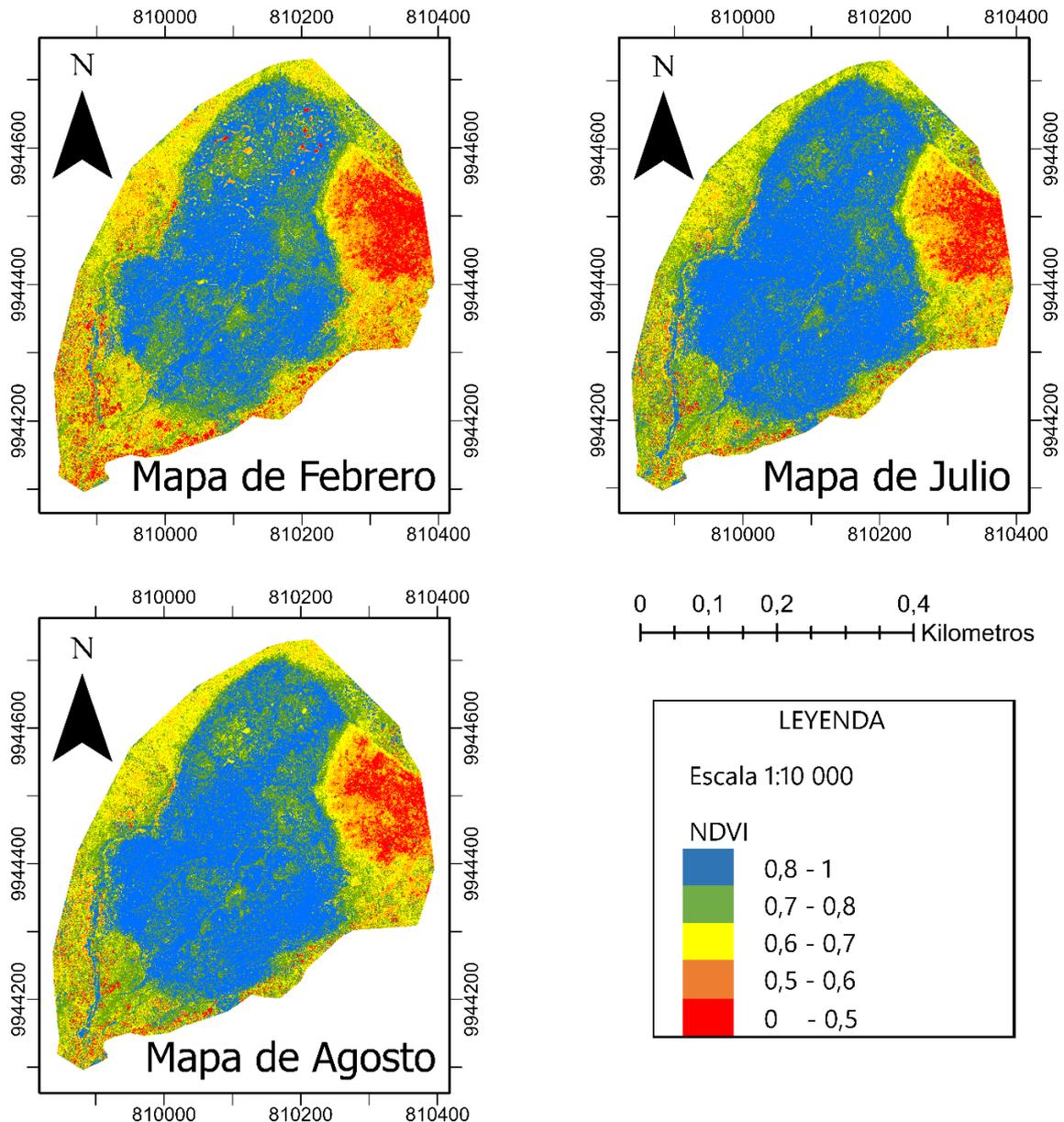


Figura 29. Mapa NDVI derivado de fotografías tomadas en los meses de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Elaboración: propia

La Tabla 7 muestra la distribución de rangos y porcentajes de cobertura del mapa NDVI obtenido en el mes de febrero, julio y agosto de 2021. Los rangos representan los intervalos de valores de NDVI, y se han asignado símbolos a cada rango para facilitar su identificación. Además, se incluye el número de píxeles, el área en metros cuadrados y el porcentaje de cobertura correspondiente a cada rango en el anexo 3 para un mejor estándar de la obtención de valores.

Tabla 7. Distribución de rangos y porcentajes de cobertura del mapa NDVI en 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Símbolo	Rangos	Porcentaje de Febrero (%)	Porcentaje de Julio (%)	Porcentaje de Agosto (%)	Clase
	0,80 – 1,00	32,99	44,97	39,93	1
	0,70 – 0,80	27,13	26,36	29,21	2
	0,60 – 0,70	19,29	15,34	17,05	3
	0,50 – 0,60	11,80	7,91	8,34	4
	0,00 – 0,50	8,79	5,42	5,47	5
	Total	100	100	100	

Elaboración: propia

Ahora, centrándose en las distintas clases del NDVI, la clase 1, que se encuentra en el rango 0,80-1,00, ocupa un promedio del 44.97% del área total en julio, reflejando una alta densidad de vegetación y salud vegetal. Esta densidad se reduce ligeramente en febrero al 32,99% y aumenta en agosto al 39,93%. En contraste, la clase 2, con un rango de 0,70-0,80, registra un valor promedio de 27,57% y también sugiere una densidad vegetal alta. Los valores mensuales para esta clase son 29,21% en agosto, 27,13% en febrero y 26,36% en julio. Las clases 3 y 4, en los rangos de 0,60-0,70 y 0,50-0,60 respectivamente, representan una vegetación de densidad moderada, con la clase 3 alcanzando su valor máximo en febrero con un 19,29% y la clase 4 en el mismo mes con 11,80%. La clase 5, que abarca el rango 0,00-0,50, sugiere una vegetación más escasa con un promedio de 6.56%, siendo febrero el mes de mayor densidad con 8,79% y julio el más bajo con 5.42%. Es importante considerar que existen afluentes o charcos en el humedal que se reflejan en la clase 5, pero no necesariamente indican zonas sin vegetación real. Las bandas espectrales utilizadas para el cálculo del NDVI, cuando interactúan

con sólidos en los charcos, pueden resultar en una clasificación errónea. Finalmente, uniendo las clases 1 y 2, que presentan las mayores densidades de masa vegetal concentradas en el centro del humedal, destaca una tendencia en julio con un valor del 71,33%, influenciada por la mayor altura piezométrica y los datos del método de la bota, como se detalla en las Figuras 26 y 27. Por el contrario, febrero registra el valor más bajo con un 60,12%.

4.6.2. MAPAS SAVI

La Figura 30 muestra las imágenes capturadas en febrero, julio y agosto de 2021, evidenciando las variaciones en la cobertura vegetal medida con SAVI. En nuestra investigación, encontramos que la aplicación del factor L en la fórmula del SAVI causó variaciones significativas en la distribución de los valores del índice. Debido a las limitaciones en la aplicación de L, resultó complicado establecer una referencia comparativa multitemporal coherente. No obstante, el índice SAVI demostró ser eficaz para determinar la cobertura vegetal en humedales altoandinos, superando incluso el desempeño del NDVI, según lo señalado en estudios anteriores (Aponte & Ospina, 2019).

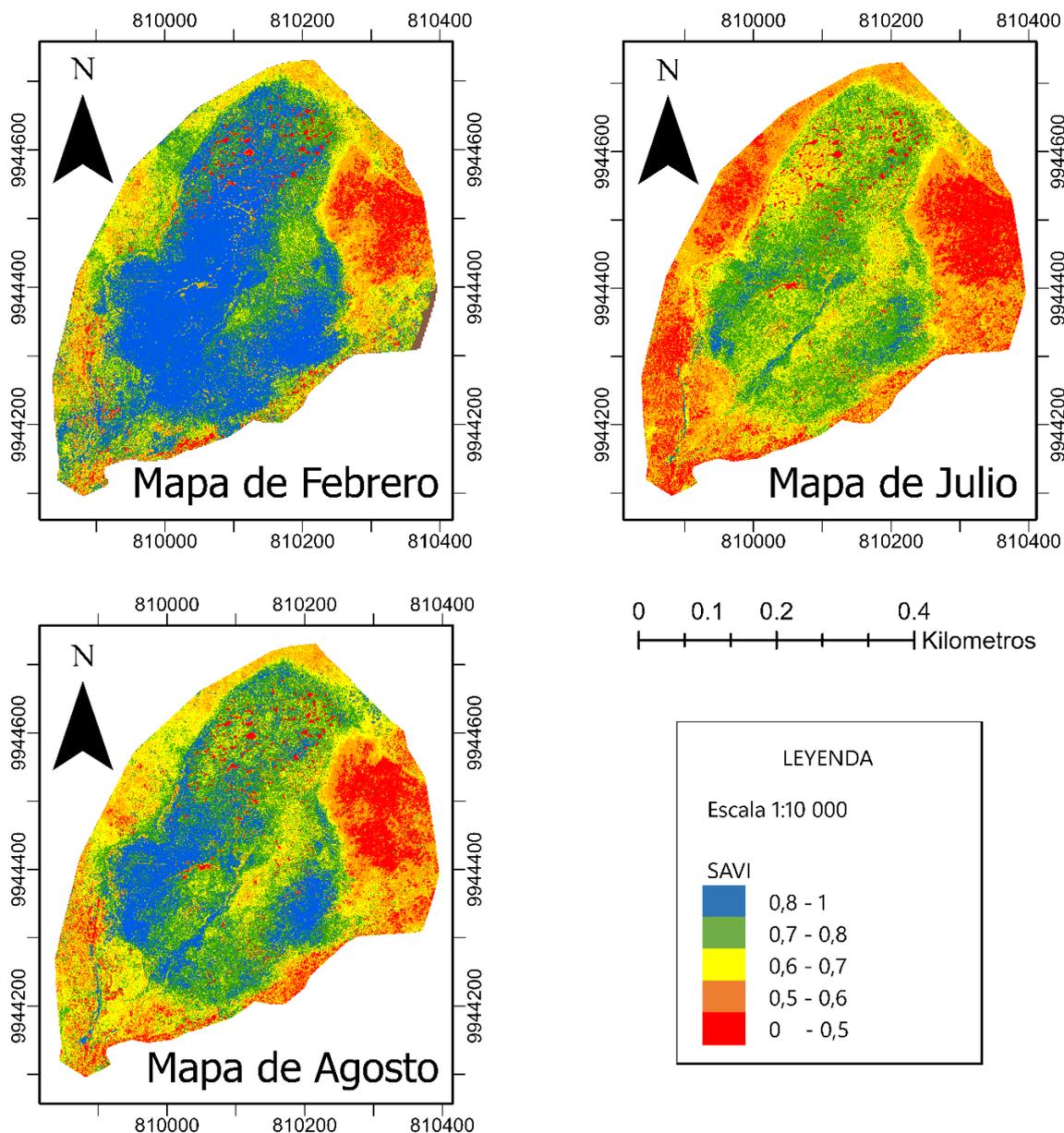


Figura 30. Mapa SAVI derivado de fotografías tomadas en los meses de febrero sin corrección, julio y agosto de 2021.

Elaboración: propia

A pesar de estas limitaciones, se identificó un método correctivo mediante el uso del algoritmo de cortes naturales Jenks. Este método agrupa datos con valores similares y maximiza las diferencias Inter clase, lo que facilita la identificación de tendencias más precisas en la distribución de datos (Chen et al., 2020). La Figura 31 muestra estos índices con diversos rangos de valores. Debido a la variabilidad de agrupación en los rangos en áreas de vegetación dispersa SAVI es menos

sensible a las variaciones de reflectividad del suelo que el NDVI, es esencial adoptar un enfoque individualizado para el análisis de cada mes, en lugar de una comparativa directa.

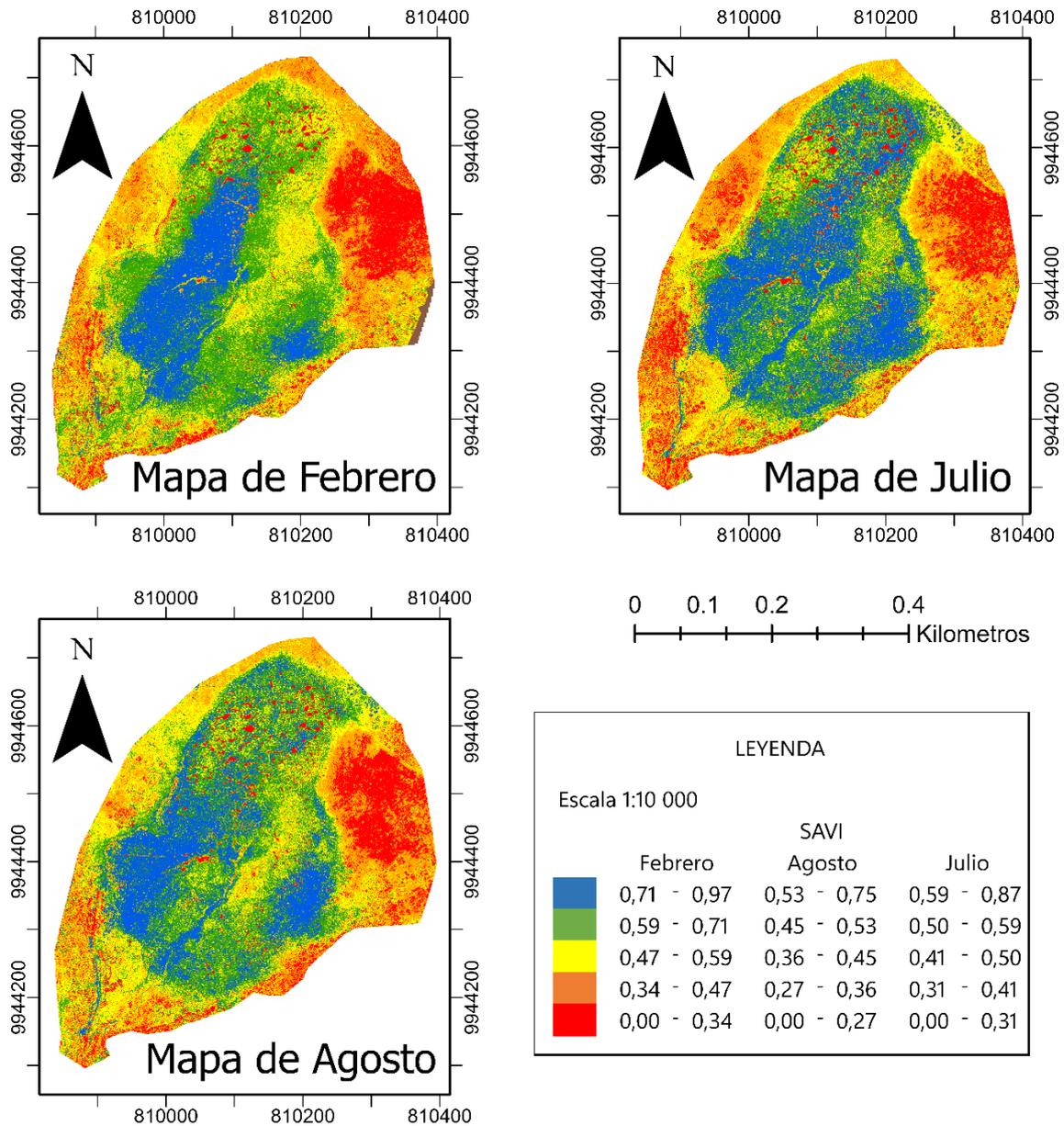


Figura 31. Mapa SAVI con distintos rangos derivado sin corrección de fotografías tomadas en los meses de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Elaboración: propia

La densidad de vegetación del humedal se puede identificar y distinguir utilizando la representación gráfica de los datos mostrados en la Figura 31. Un indicador de la salud ecológica de un ecosistema es la densidad de la vegetación. La cobertura

vegetal alta puede indicar un ecosistema en buen estado, mientras que la cobertura vegetal baja puede indicar un ecosistema perturbado o degradado. La restauración de áreas degradadas, el seguimiento constante de la densidad vegetal y los niveles de agua y la implementación de medidas preventivas contra factores de degradación son elementos que se toman en cuenta al crear estrategias de conservación y manejo. Es importante señalar que, aunque hay similitudes en las variaciones observadas en las tablas NDVI, los niveles piezométricos y el método de la bota, es prudente no realizar comparaciones directas. La razón es que el factor de calibración (L) crea una heterogeneidad entre los datos mensuales, lo que da como resultado un rango indeterminado. La existencia de esta variabilidad impide el uso de un enfoque coherente que garantice una interpretación precisa de los valores.

4.6. MAPAS DE ÍNDICES DE AGUA

4.7.1. MAPAS NDWI

En la Figura 32 se representa el NDWI derivado de fotografías tomadas en febrero, julio y agosto de 2021. En julio, el mapa resalta una mayor concentración de agua (color azul) en comparación con otros meses, especialmente febrero, donde la concentración de agua es notablemente menor, localizándose principalmente en el centro del humedal.

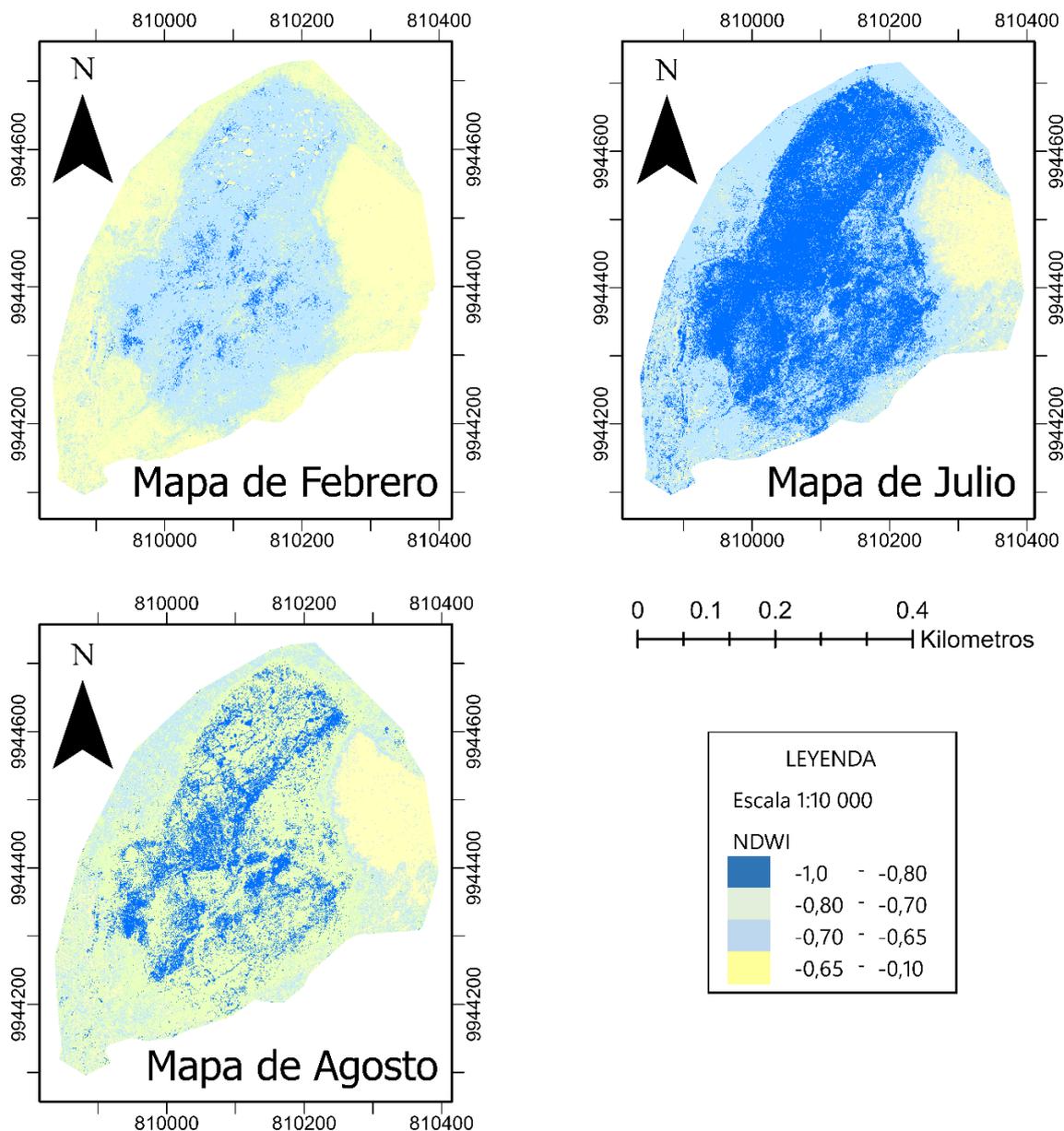


Figura 32. Mapa NDWI derivado de fotografías tomadas en los meses de 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Elaboración: propia

La Tabla 8 detalla los rangos de valores del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y los porcentajes de cobertura correspondientes en el humedal Pugllahoma durante febrero, julio y agosto de 2021. Se dividió en 4 clases que se establece en base a su superficie humedal de plantas en una superficie acuática con altos niveles de humedad a superficies con poca humedad en el suelo.

Tabla 8. Distribución de rangos y porcentajes de cobertura del mapa NDWI en 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Símbolo	Rangos	Porcentaje de Febrero (%)	Porcentaje de Julio (%)	Porcentaje de Agosto (%)	Clase
	-1,0 – -0,80	2,73	42,48	15,79	1
	-0,80 – -0,70	49,17	41,84	57,00	2
	-0,70 – -0,65	17,30	6,77	12,55	3
	-0,65 – -0,10	30,80	8,90	14,67	5
Total		100	100	100	

Elaboración: propia

La Clase 1 y 2, con valores de NDWI entre -1,0 y -0,70, cubre el 69,67% del área total en promedio que significa una alta capacidad de humedad en el suelo. Estas clases señalan zonas con alta capacidad de retención de humedad. Julio presenta el porcentaje más alto con un 84,33%, mientras que febrero muestra el porcentaje más bajo con 51,90%. En agosto, el porcentaje se sitúa en 72,78%. Por otro lado, las Clases 3 y 4, con valores de NDWI entre -0,70 y -0,10, representan áreas con menor contenido de humedad, abarcando el 30,33% en promedio de los tres meses evaluados. Julio tiene el menor porcentaje con 15,67%, contrastando con febrero que presenta un 48,10%. Este análisis evidencia la utilidad y eficacia del NDWI, corroborando la información con métodos de campo como es el método de la bota y la medición de alturas piezométricas con el análisis de índices espectrales.

4.7. COMPARACIÓN MULTITEMPORAL DE ÍNDICES ESPECTRALES

El Humedal Puglllohuma tiene variaciones notables en los índices de vegetación y agua, como se muestra en la Tabla 9. El índice de vegetación tiene valores entre 1,00 y 0,70. Un alto NDVI, por ejemplo, cercano a 1,00, suele indicar una vegetación abundante. Sin embargo, los valores NDWI específicos del contenido de agua oscilan entre -1,00 y -0,70. Un valor NDWI cercano a -1 indica condiciones más secas, mientras que un valor NDWI cercano a -1,00 indica una saturación del suelo mayor. Esta interpretación es crucial porque una de las principales preguntas de

esta investigación es determinar si las imágenes tomadas por dron pueden indicar efectivamente la saturación del suelo. Para aclarar, valores de NDVI inferiores a 0,7 podrían indicar un suelo más seco, mientras que valores de NDWI inferiores a -0.7 podrían indicar un suelo saturado. Los niveles freáticos en porcentaje se obtienen utilizando parámetros similares de comparación, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 9. Comparación de índices de vegetación y de agua en el Humedal Pugllohuma.

Meses	Clases	Índices de vegetación NDVI (%)	Índices de agua NDWI (%)	Clases	Niveles freáticos (%)
Febrero	1 y 2	60,12	69,67	1 al 3	64,43
Julio	1 y 2	71,33	84,33	1 al 3	73,04
Agosto	1 y 2	69,14	72,78	1 al 3	72,19
Promedio		66,86	75,59		69,89

Elaboración: propia

En febrero y julio, notamos diferencias en la densidad de vegetación y la saturación del suelo. En febrero, un NDVI del 60,12%, NDWI del 69,67% y un nivel freático de 64.43% sugieren que el suelo no está completamente saturado y menor abundancia vegetal. En cambio, durante julio, los datos reflejan una densidad vegetal más alta (NDVI del 71,33%) y una saturación del suelo más alta (NDWI del 84,33% y Nivel Freático 73,04%). Estos datos se ordenan con niveles piezométricos e índices espectrales, lo que indica que la vegetación, la saturación del suelo y el agua subterránea están interactuando entre sí con variaciones directamente proporcionales a la abundancia vegetal con el nivel freático y la saturación del suelo. Asimismo, el análisis realizado con los transectos del método de la bota permitió validar la información derivada con los valores de NDVI y NDWI, consolidándose como herramientas valiosas para monitorear y evaluar las condiciones del humedal durante el año. La combinación de estos índices, las mediciones piezométricas y el método de la bota proporciona una visión detallada de cómo la vegetación y la disponibilidad de agua interactúan en el ecosistema del humedal, sentando las bases para futuras estrategias de conservación y manejo.

4.8.1. ANÁLISIS MULTIVARIANTE DE NIVELES FREÁTICOS E ÍNDICES ESPECTRALES

El enfoque multivariante adoptado en este estudio analiza tanto los niveles freáticos como los índices espectrales (NDVI y SAVI), representados en las Figuras 26, 28, 29 y 31. Este análisis genera ecuaciones lineales que ofrecen una doble vía de interpretación: primero, nos brindan datos sobre la morfología del terreno, en especial en relación con la variación de la altura; segundo, estas ecuaciones caracterizan la altura piezométrica en función de variables temporales y espectrales (ver Figura 32).

Las imágenes de NDVI y SAVI revelan una particularidad clave del humedal estudiado: una reciprocidad negativa entre la altura y la abundancia vegetal. Este patrón sugiere que las zonas de menor altitud, típicamente áreas de acumulación de agua presentan una mayor densidad de vegetación. Además, la relación inversa con la pendiente indica que terrenos con pendientes más suaves son más propicios para el crecimiento vegetal en este ecosistema (Figura 32).

Gráfico de NDVI los meses de Febrero, Julio y Agosto de 2021

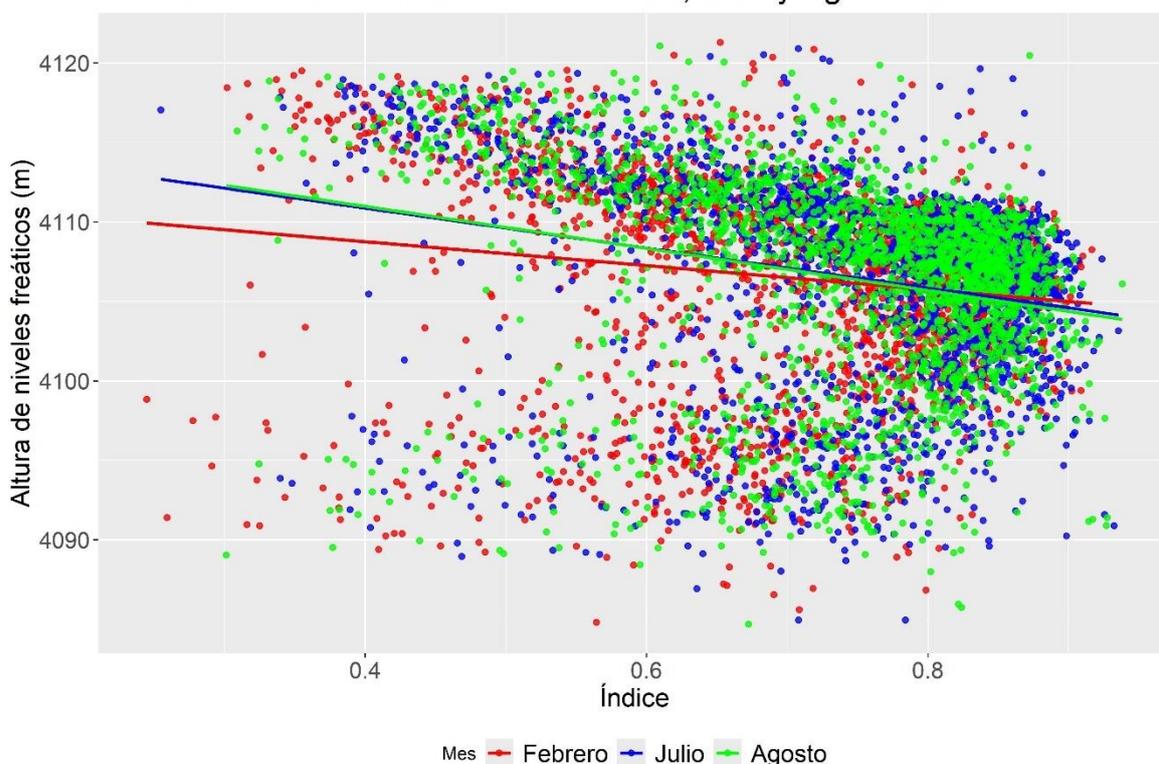


Gráfico de NDVI los meses de Febrero, Julio y Agosto de 2021

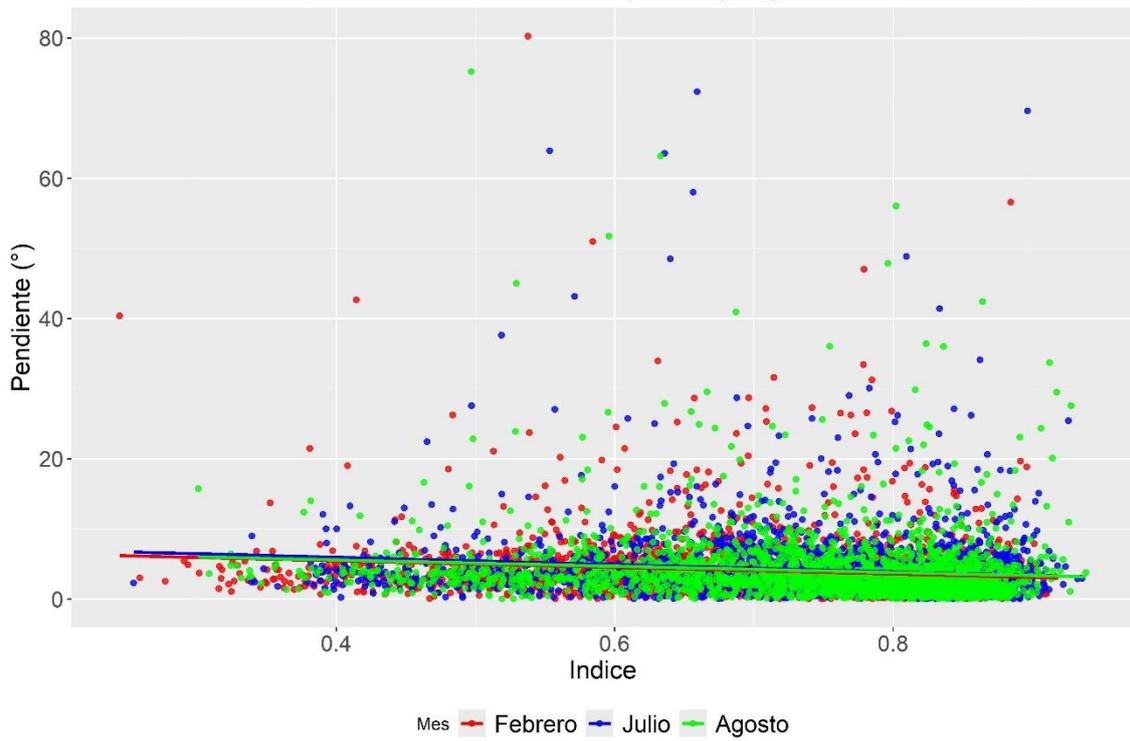


Gráfico de SAVI los meses de Febrero, Julio y Agosto de 2021

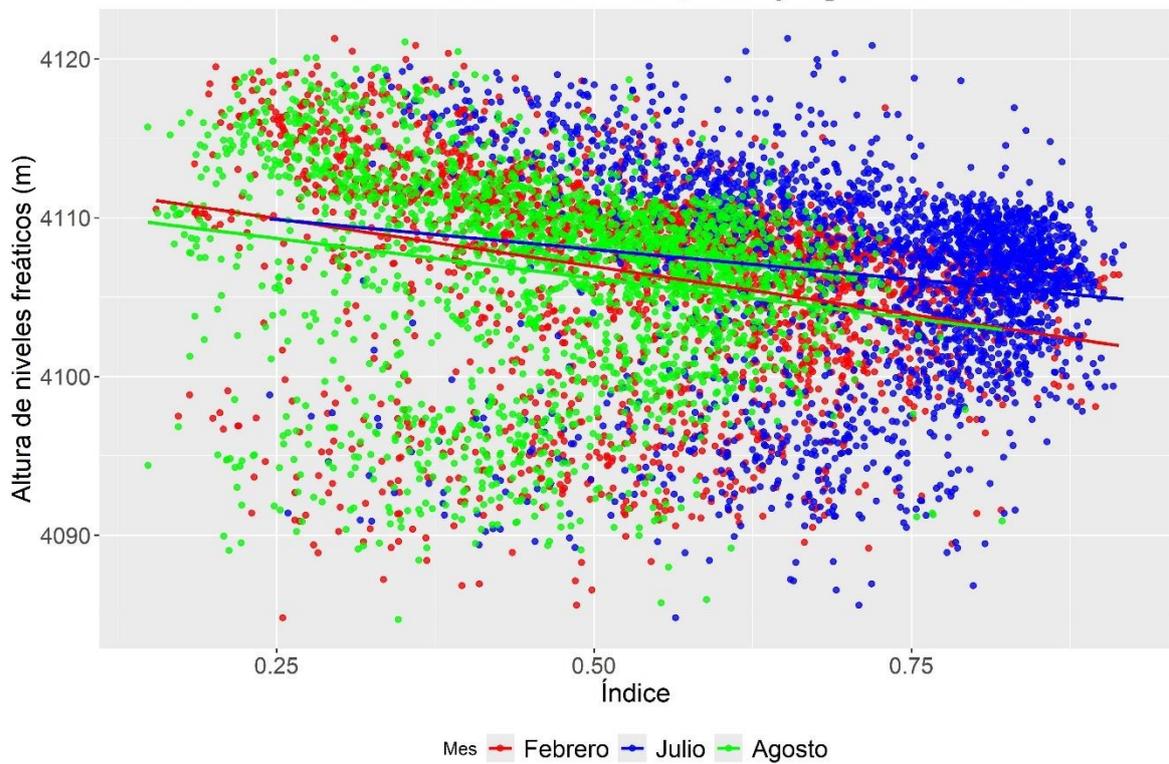


Gráfico de SAVI los meses de Febrero, Julio y Agosto de 2021

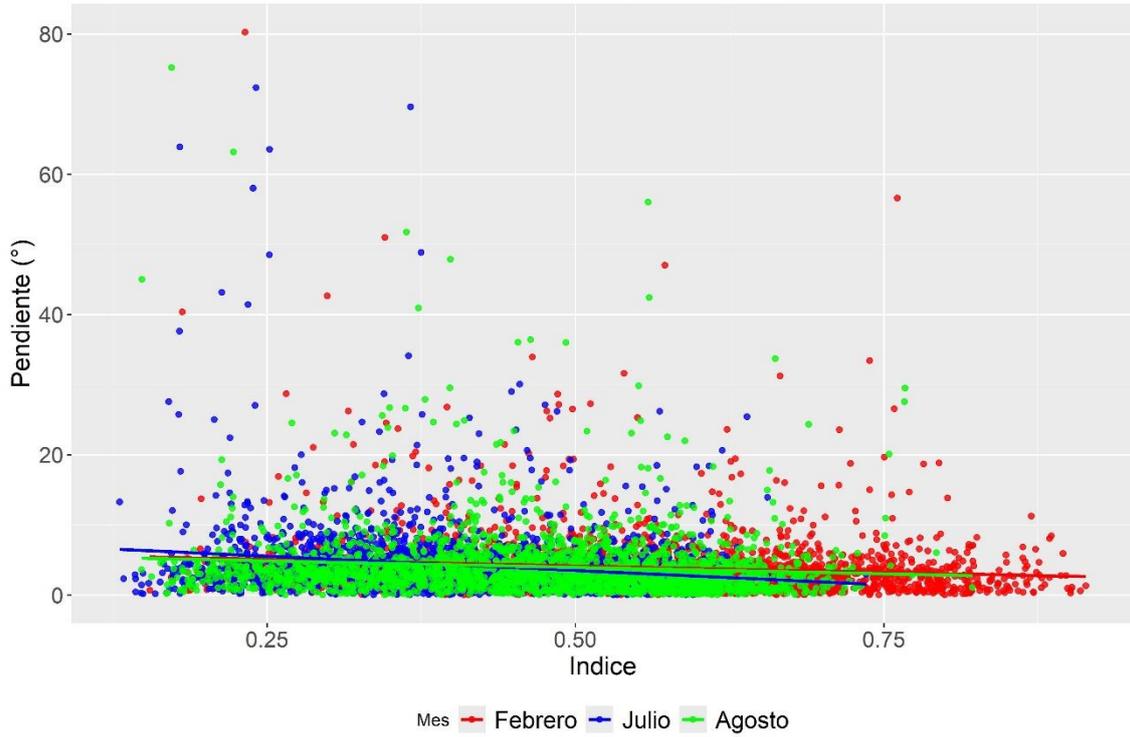
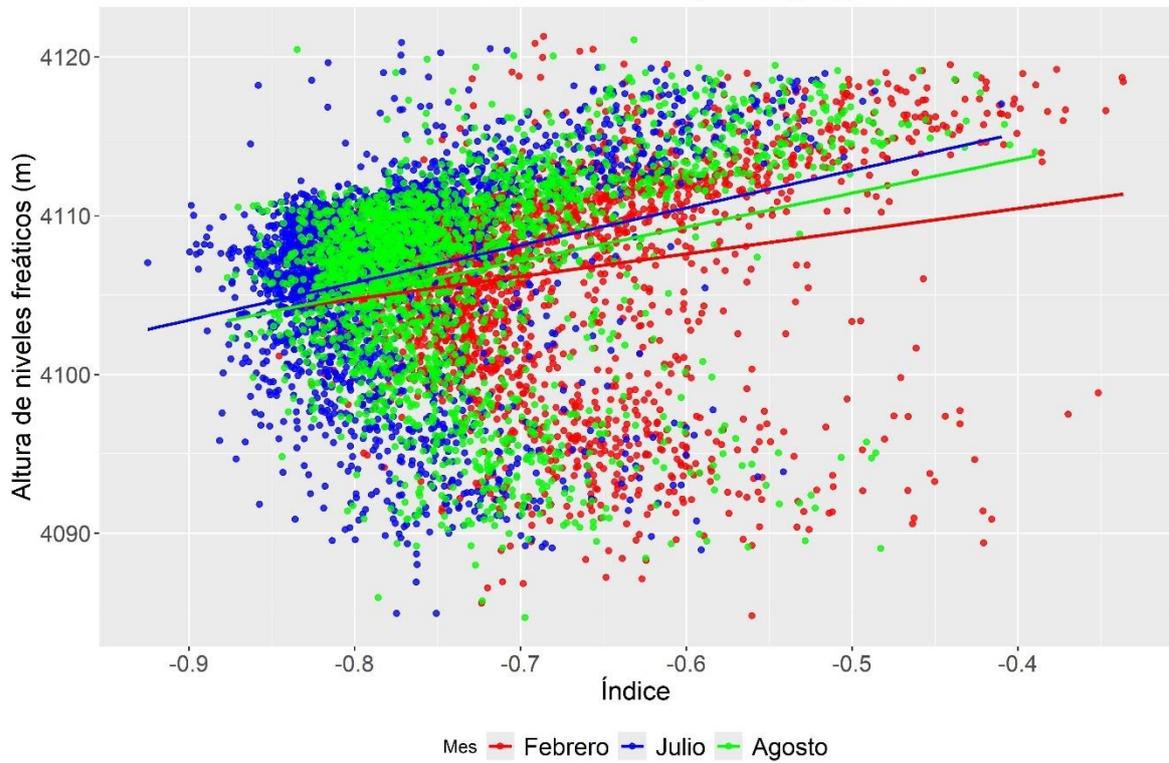


Gráfico de NDWI los meses de Febrero, Julio y Agosto de 2021



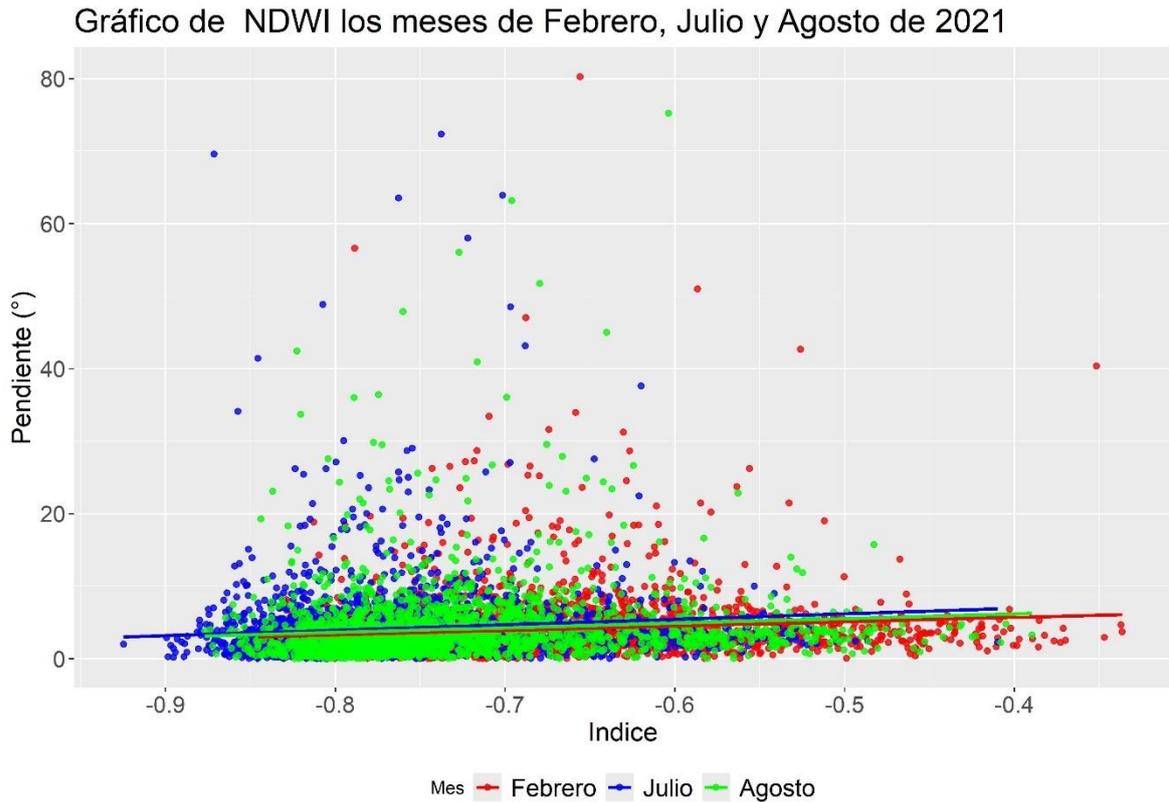


Figura 33. Gráficos de dispersión de índices de índices de vegetación vs altura de agua con nivel freáticos respecto al nivel del mar y pendientes del terreno de 04 de Febrero, 07 de Julio y 04 de Agosto de 2021.

Elaboración: propia

En el estudio del humedal, la Tabla 10 y las ecuaciones lineales de la Figura 33 ofrecen datos cruciales sobre las interacciones entre los niveles freáticos y varios índices espectrales (NDVI, SAVI, NDWI). El NDVI muestra una relación inversa con la "Altura", lo que sugiere una asociación entre un aumento en la vegetación y una disminución en los niveles freáticos. Esta relación parece ser temporalmente estable, como lo indica la desviación estándar constante (σ). Por otro lado, aunque el SAVI también muestra una relación negativa con la "Altura de niveles freáticos", la variabilidad en su desviación estándar sugiere la influencia de otros factores, como el tipo de suelo. En contraste, el NDWI muestra una relación positiva con la "Altura", lo que implica que un aumento en el contenido de agua se traduce en un aumento en los niveles freáticos. La desviación estándar (σ) para el NDWI también se mantiene estable, lo que fortalece la confiabilidad del modelo.

Tabla 10. Ecuaciones lineales obtenidas de los datos de dispersión en los meses de 04 de Febrero, 07 de Julio y 04 de Agosto de 2021.

Índice	Mes	Ecuación	Desviación Estándar (σ)	Coefficiente de determinación (R^2)
NDVI	Febrero	$y=-7,52x+4111,76$	$\sigma=6,21$	$R^2=0.019$
NDVI	Julio	$y=-12,54x+4115,88$	$\sigma=6,18$	$R^2=0.015$
NDVI	Agosto	$y=-13,21x+4116,26$	$\sigma=6,18$	$R^2=0.012$
NDVI	Promedio	$y=-11,09x+4114,63$	$\sigma=6,19$	$R^2=0.015$
SAVI	Febrero	$y=-12,06x+4112,96$	$\sigma=5,99$	$R^2=0.016$
SAVI	Julio	$y=-6,06x+4109,01$	$\sigma=6,33$	$R^2=0.035$
SAVI	Agosto	$y=-10,05x+4111,21$	$\sigma=6,25$	$R^2=0.010$
SAVI	Promedio	$y=-9,39x+4111,06$	$\sigma=6,19$	$R^2=0.020$
NDWI	Febrero	$y=14,24x+4116,14$	$\sigma=6,16$	$R^2=0.014$
NDWI	Julio	$y=23,56x+4124,63$	$\sigma=6,14$	$R^2=0.011$
NDWI	Agosto	$y=21,32x+4122,08$	$\sigma=6,14$	$R^2=0.011$
NDWI	Promedio	$y=19,71x+4120,95$	$\sigma=6,15$	$R^2=0.012$
Ecuación General		$y=12346,64-7,52NDVI-9,39SAVI+19,71NDWI$		

Elaboración: propia

La Tabla 10 presenta las ecuaciones lineales obtenidas a partir de los datos de dispersión para los meses de febrero, julio y agosto de 2021, junto con sus respectivas desviaciones estándar y coeficientes de determinación (R^2). Los valores de R^2 , en general bajos, indican que las relaciones lineales entre los índices espectrales (NDVI, NDWI, SAVI) y la variable dependiente (Altura) no son fuertes. Para el NDVI, los coeficientes de determinación son 0.019 en febrero, 0.015 en julio y 0.012 en agosto, lo que sugiere una baja capacidad explicativa del modelo en todos los meses. El SAVI muestra un comportamiento similar, con R^2 de 0.016 en febrero, 0.035 en julio y 0.010 en agosto, destacándose ligeramente en julio. El NDWI presenta valores de R^2 de 0.014 en febrero, 0.011 en julio y 0.011 en agosto, confirmando la baja relación lineal con la altura en todos los casos.

Las desviaciones estándar (σ) para estos índices también ofrecen información adicional sobre la variabilidad de los datos. Para NDVI, las desviaciones estándar son 6.21 en febrero, 6.18 en julio y 6.18 en agosto, indicando una variabilidad relativamente constante. En el caso de SAVI, las desviaciones estándar son 5.99 en febrero, 6.33 en julio y 6.25 en agosto, con una ligera mayor variabilidad en julio.

Para NDWI, las desviaciones estándar son 6.16 en febrero, 6.14 en julio y 6.14 en agosto, nuevamente mostrando una variabilidad constante.

La ecuación general obtenida combina los tres índices espectrales y sugiere una relación compleja entre estos índices y la altura, con los coeficientes para NDVI, SAVI y NDWI siendo -7.52, -9.39 y 19.71, respectivamente. Estos resultados indican que, aunque se pueden observar ciertas tendencias, las relaciones no son lo suficientemente fuertes para predecir con precisión la variable dependiente únicamente mediante estos índices espectrales. La consistencia en las desviaciones estándar sugiere que la variabilidad en los datos es estable, pero la baja capacidad explicativa de los modelos lineales señala la necesidad de explorar modelos no lineales o incluir variables adicionales para mejorar la capacidad predictiva y explicativa del análisis.

Para el análisis de los diferentes pozos en referencia a las alturas piezométricas de la Tabla 6 que se describe los respectivos niveles piezométricos. En la Figura 34 se muestra los diferentes rangos en distintos periodos del año de los índices espectrales en referencia a los pozos que se presentan en la Figura 23 que muestra las diferencias de valores de cada uno de ellos muestra promedios de vegetación de mayor a menor en los siguientes meses: Julio (0,835), Agosto (0,823) y Julio (0,812). Además, se verifica la distribución desigual de datos por el método SAVI que invierte los valores de vegetación para tener Julio (0,656), Agosto (0,549) y Julio (0,656). Mientras NDWI muestra la caracterización inversa por ser un humedal como se muestra en los resultados de la Tabla 9 donde valores negativos cercanos a -1 muestran mayores concentraciones de humedad. En el mes de Julio (-0,820) existe mayor concentración mientras en el mes de Febrero (-0,737) la menor.

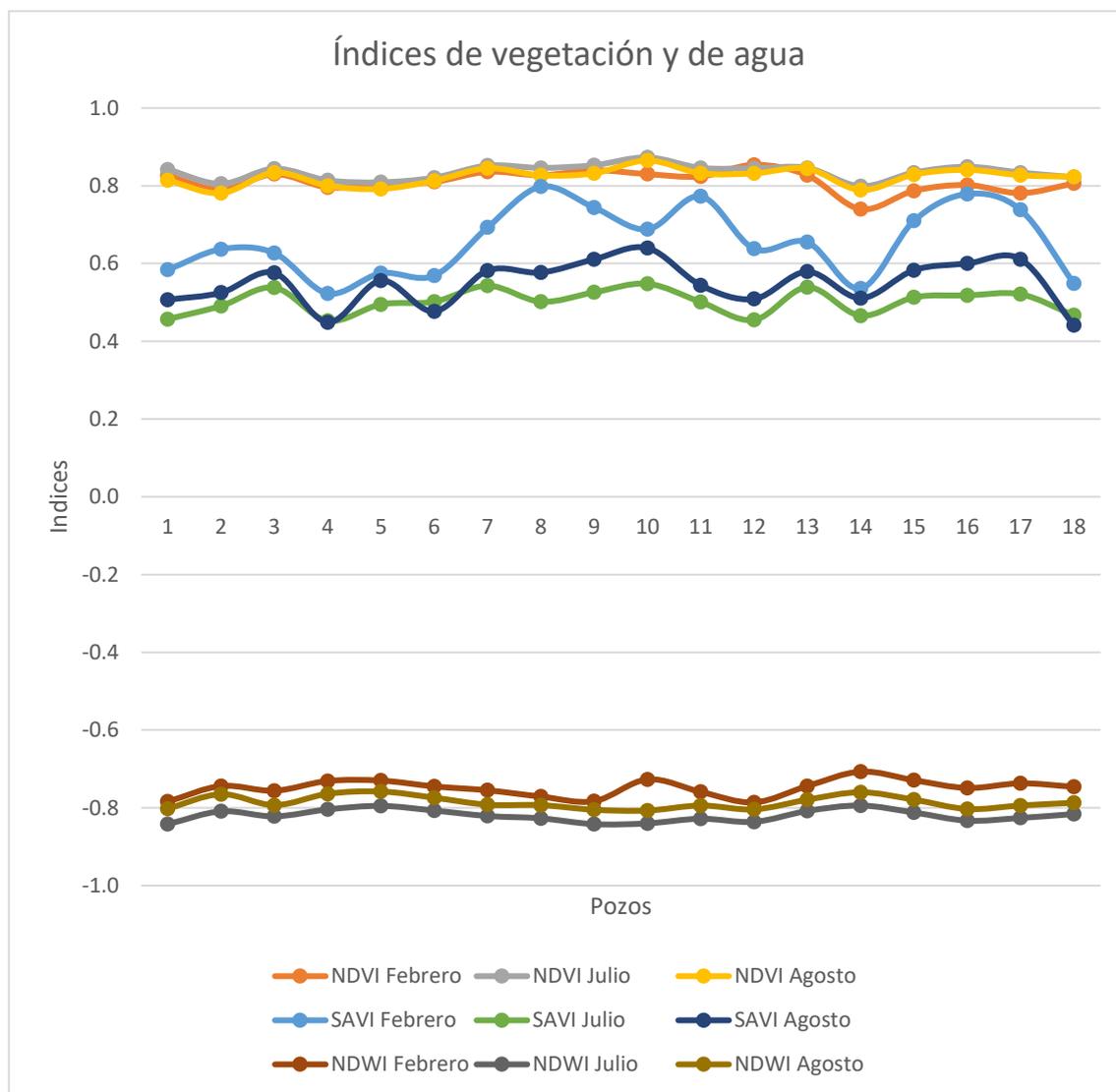


Figura 34. Comparación de índices de vegetación y de agua en referencia a los pozos del Humedal Puglllohuma en 04 de febrero, 07 de julio y 04 de agosto de 2021.

Elaboración: propia

Es un método de estudio que implica una connotación importante para la comprensión del humedal porque explica la distribución de datos y sus distintas implicaciones en el tiempo para la estimación de niveles freáticos en el monitoreo continuo.

4.8. METODOLOGÍA DE MONITOREO EN REGIONES ANDINAS

Se empleó una metodología detallada, basada en el proyecto CEPRA-XII-2018-12, que facilita la implementación de índices espectrales en el análisis de imágenes multitemporales. Esta metodología se segmenta en tres etapas esenciales y relativas: preparación y planificación, recolección de datos y procesamiento de la información.

En la etapa de preparación y planificación, se realiza una labor exhaustiva de oficina que abarca la selección de índices espectrales específicamente adecuados para la caracterización de humedales. No se trata solo de identificar rangos y porcentajes, sino de entender cómo estos índices reflejan la salud, variabilidad y características del humedal en estudio. Aquí, se valoran diferentes fuentes de datos y se integra variada información para un diagnóstico completo y holístico del humedal.

La recolección de datos engloba actividades de campo para obtener datos precisos que reflejen las condiciones reales del humedal, mientras que, en la fase de procesamiento de la información, esos datos se transforman en análisis significativos y contextualizados sobre el humedal.

En definitiva, la metodología aplicada en zonas andinas se desarrolla en fases metodológicas secuenciales, que resaltan la necesidad de considerar diversos índices espectrales para una visión integral del humedal. Estos índices no solo cuantifican, sino que describen y contextualizan la interacción de la vegetación, el agua y otros factores ecológicos del humedal. Es crucial entender que la especificidad de la metodología y las actividades de campo se detallarán más a fondo en secciones anteriores o posteriores de este trabajo.

4.9. DISCUSIÓN

La metodología de monitoreo implementada en este proyecto responde a la creciente necesidad de conservar entornos sensibles frente a las variaciones climáticas. Es esencial subrayar que los humedales, y en particular los altoandinos, actúan como reguladores hídricos, y cualquier cambio en su estado puede afectar el suministro de agua y la biodiversidad asociada (Mitsch & Gosselink, 2015). Por ello, la precisión en la monitorización es vital para anticipar y mitigar posibles

consecuencias negativas. Los hallazgos de este trabajo no solo reflejan la situación del humedal estudiado, sino que podrían ser adaptados y convertidos en guías para aplicar en otros ecosistemas que presenten condiciones similares. Esto amplía el alcance y potencial aplicación de la investigación, permitiendo que su impacto se sienta en otras regiones altoandinas (Figura 33). Estudios en humedales de otras latitudes, como los humedales boreales en Canadá y los pantanos en el sudeste de Asia, han demostrado la importancia de métodos de monitoreo precisos para la conservación de estos ecosistemas (Ramsar Convention Secretariat, 2013).

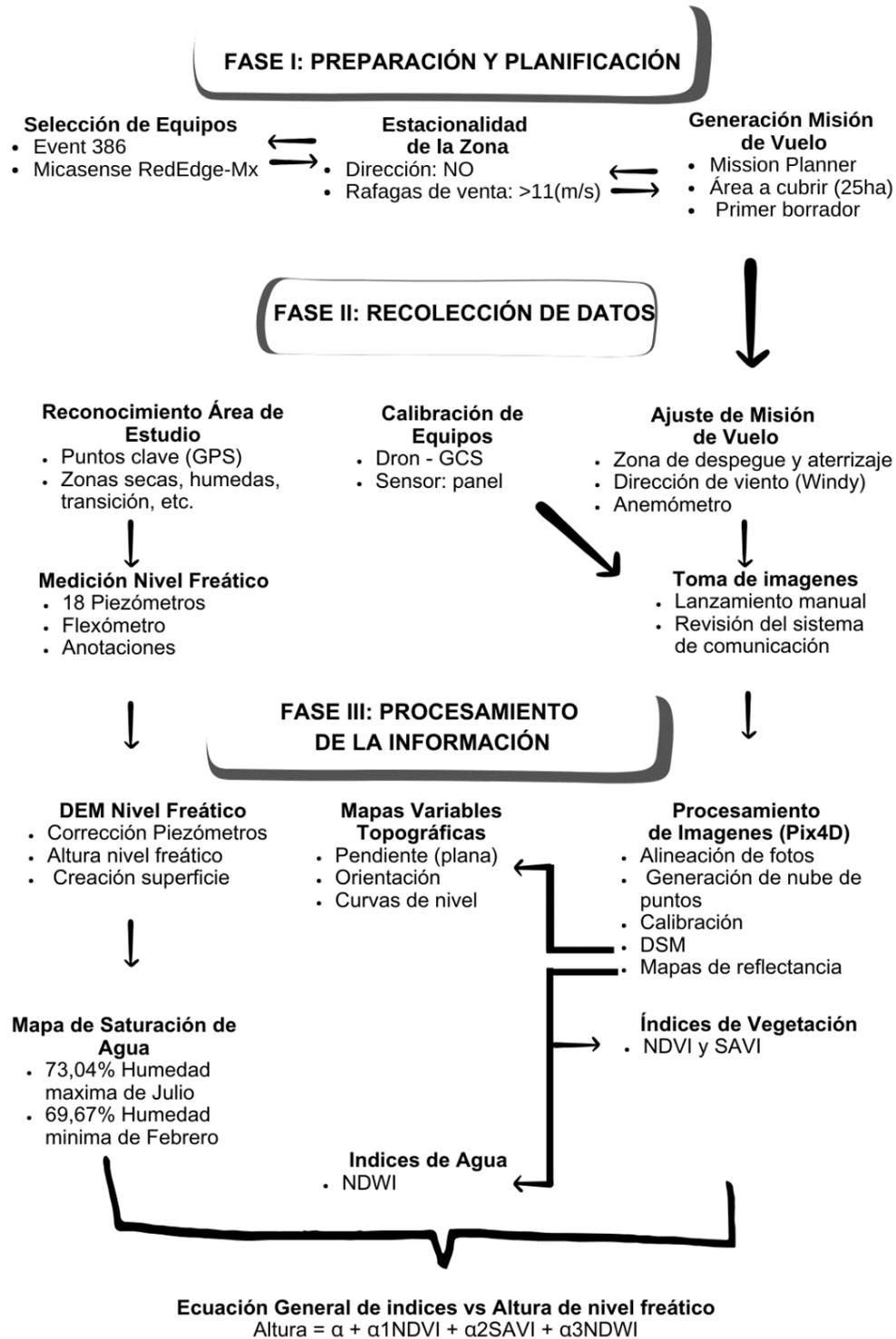


Figura 35. Metodología generalizada para humedales altoandinos.

Elaboración: propia

Es vital discutir la selección del índice SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) sobre el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) al abordar el monitoreo de

humedales. Ambos índices son herramientas poderosas en la detección y cuantificación de la vegetación desde una perspectiva satelital, pero su aplicabilidad puede variar en función de las condiciones del área de estudio. En regiones de alta humedad, como los humedales, el NDVI tiende a saturarse (Guerschman et al., 2009). Esto significa que, en zonas donde la vegetación es densa y el suelo está húmedo, el NDVI podría no ofrecer diferencias significativas en sus valores, limitando su capacidad para detectar cambios sutiles en la vegetación. Esto fue evidente en nuestros resultados, donde la capacidad del NDVI para discernir entre distintas condiciones de humedad y vegetación se vio comprometida. Por otro lado, el SAVI fue diseñado específicamente para minimizar la influencia del suelo en la detección de vegetación. Su diseño incorpora un factor de ajuste (L) que modifica la respuesta espectral del índice en función de la cantidad de vegetación detectada. Sin embargo, el factor L en el SAVI también introduce una complejidad adicional (Huete, 1988). Cuando se emplea SAVI en comparaciones multitemporales o entre diferentes regiones, es crucial entender que su respuesta no es lineal debido a este factor. De hecho, al intentar comparar valores de SAVI directamente, uno puede encontrarse con desafíos debido a la variabilidad introducida por L, lo que puede afectar la interpretación de los resultados. Por lo tanto, mientras que el SAVI ofrece una ventaja en zonas de alta humedad como los humedales, es esencial considerar sus características matemáticas.

La metodología presentada no solo permite el monitoreo del estado actual del humedal, sino que también proporciona una base sólida para el seguimiento de su evolución a largo plazo. Es de destacar que cualquier intervención en un humedal sin un monitoreo adecuado puede llevar a acciones contraproducentes. Por lo tanto, este enfoque de monitoreo se convierte en un instrumento valioso para los esfuerzos de conservación y restauración. Su aplicación puede guiar decisiones informadas, orientando intervenciones eficaces y minimizando los riesgos asociados a acciones mal informadas (Junk et al., 2013). Finalmente, sería relevante contrastar los resultados de este estudio con investigaciones similares en humedales de otras latitudes. Por ejemplo, los estudios en los Everglades en Florida, los humedales de la cuenca del río Amazonas y los humedales de la región del delta del Okavango en África han mostrado la importancia de utilizar índices ajustados y específicos para cada tipo de humedal, considerando las variaciones

climáticas y geográficas. Contrastando los resultados con estos estudios, se puede determinar si las tendencias observadas son consistentes en diferentes humedales, proporcionando una comprensión más profunda de los procesos ecológicos y climáticos en juego y reforzando la relevancia y aplicabilidad de la metodología propuesta (Finlayson et al., 2005).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

- La utilización de un modelo de superficie digital (DSM) en conjunción con el mapa de pendientes, curvatura y perfiles de elevación, proporcionó una caracterización morfológica detallada del humedal. Estas herramientas facilitaron la identificación del sistema de drenaje principal y secundario, así como zonas de alta y baja elevación esenciales para la dinámica hídrica del humedal. La Figura 23 ilustra la acumulación de agua en las periferias y un sistema de drenaje hacia el sur, marcando la dirección del flujo de agua. Se sugiere un monitoreo continuo en periodos largos de tiempo para comprender las transformaciones morfológicas en un humedal en proceso de recuperación y su relación con los niveles de altura.
- La aplicación del NDWI como herramienta de teledetección ha demostrado ser particularmente efectiva para el monitoreo y la evaluación de los niveles freáticos en el humedal Pugllohuma. La relación matemática establecida entre el NDWI y los niveles freáticos, representada por las ecuaciones lineales derivadas de los datos de dispersión para los meses de febrero, julio y agosto de 2021, refleja una relación directa y significativa entre estos dos parámetros. Específicamente, se encontró que por cada incremento unitario en el valor de NDWI, se observa un aumento correspondiente en los niveles freáticos, con coeficientes de 1424, 2356, 2132 para cada mes analizado y un promedio general de 1971. Esto subraya la capacidad del NDWI para capturar variaciones en la disponibilidad de agua superficial, que a su vez se relaciona estrechamente con los cambios en los niveles freáticos. Estos hallazgos no solo confirman la validez del NDWI como un indicador confiable para la gestión y conservación de humedales, sino que también ofrecen una base cuantitativa para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el monitoreo ambiental y la planificación de recursos hídricos en ecosistemas similares. Este estudio resalta la importancia de integrar herramientas de teledetección avanzadas en la investigación hidrológica y ambiental, facilitando así un enfoque más

dinámico y preciso para la conservación de humedales críticos como el Pugllohuma.

- A través del cálculo de índices espectrales multitemporales, en particular el NDWI, se pudo comprender la dinámica espacial y temporal del humedal. Este índice reflejó la variabilidad de la humedad del suelo a lo largo del tiempo, destacando valores promedio de humedad del 66,86%, que representa 14,94ha del humedal, y un índice de agua de 69,89%, que corresponde a 16,92ha. Se determinaron los meses con mayor abundancia vegetal y humedad, siendo julio el más destacado y febrero el de menor actividad.
- La metodología de análisis multivariante implicó el uso de relaciones y aplicaciones de modelos para establecer un modelo predictivo a través de una ecuación general que utiliza el análisis de índices espectrales y variables conocidas obtenidas mediante imágenes multiespectrales. Sin embargo, los bajos valores de R^2 indican que las relaciones lineales entre los índices espectrales (NDVI, NDWI, SAVI) y la variable dependiente (Altura) no son fuertes en los datos analizados. Esto sugiere que otros factores no considerados en el modelo podrían estar influyendo en la variabilidad de la variable dependiente o que la relación entre los índices y la variable dependiente no es lineal y requiere de modelos más complejos para ser descrita adecuadamente. Es necesario considerar la inclusión de otros factores, como variables ambientales o características específicas del terreno, así como la utilización de enfoques de modelado alternativos, como modelos no lineales o técnicas de aprendizaje automático, para mejorar la capacidad predictiva y explicativa del análisis.
- La metodología propuesta y validada en este estudio para el monitoreo de humedales altoandinos resulta aplicable a áreas con características similares a las del humedal Pugllohuma. El proyecto subrayó la posibilidad de entender la variabilidad de factores intrínsecos del ecosistema altoandino a lo largo del tiempo. Se observó una relación proporcional entre el nivel freático y los índices de vegetación y agua, como se muestra en la Tabla 9.
- El estudio resaltó la utilidad del NDVI y NDWI en la evaluación del Humedal Pugllohuma, evidenciando una relación directa entre el NDWI y los niveles freáticos, lo que subraya la importancia del NDWI como un indicador fiable de

la humedad y la disponibilidad de agua. Simultáneamente, las variaciones del NDVI reflejaron cambios en la salud y la densidad de la vegetación, proporcionando una comprensión profunda de la dinámica ecológica del humedal.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

- Generar una base de datos utilizando la metodología propuesta para evaluar el estado del humedal Puglllohuma a lo largo del tiempo, basada en el comportamiento espectral en diferentes momentos del año.
- El equipo de investigación actualmente utiliza la cámara Micasense RedEdge-MX, que se caracteriza por su habilidad para capturar datos en cinco bandas espectrales, incluyendo verde (G), rojo (R), azul (B), borde rojo y la banda de infrarrojo cercano (NIR). Sin embargo, para futuras investigaciones, podría resultar beneficioso implementar una cámara que pueda manejar un rango espectral más amplio. Este enfoque ampliado permitiría el cálculo de índices más receptivos a las variaciones de humedad en el suelo, como el Índice de Agua del Suelo (LSWI), el Índice de Humedad del Suelo (SMI) y el Índice de Humedad Normalizado (NMDI), que hacen uso de la banda del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR). Esta adaptación no sólo podría mejorar nuestra capacidad para monitorear estas variaciones, sino que también podría proporcionar un mayor grado de precisión en la detección de cambios sutiles en las condiciones del suelo.
- Establecer una metodología similar en humedales con condiciones similares o en áreas cercanas al humedal estudiado, con el fin de verificar los resultados multitemporales de una naturaleza cambiante en el análisis de índices a través del tiempo con verificaciones del monitoreo obtenidos en este proyecto y obtener una perspectiva más amplia sobre la evaluación de humedales en general.
- Para investigaciones futuras, se sugiere realizar un levantamiento completo utilizando diferentes tipos de cámaras, como cámaras térmicas, cámaras multiespectrales y sensores LiDAR. Esto permitiría obtener indicadores más variados y detallados relacionados con la vegetación, el suelo, la fauna, entre otros aspectos relevantes.

- Explorar la utilización de técnicas avanzadas de teledetección, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, para analizar y interpretar los datos del humedal.
- Establecer colaboraciones con investigadores y organismos internacionales especializados en humedales para intercambiar información, metodologías y resultados.
- A lo largo de esta investigación, se empleó ArcGIS Pro para el cálculo de índices espectrales. Sin embargo, en futuros estudios sería relevante explorar y comparar con otros softwares de teledetección, tanto comerciales como de código abierto, para determinar su eficacia y precisión. Además, la correcta verificación y establecimiento del orden de las bandas es esencial para obtener resultados precisos, por lo que el desarrollo de herramientas o protocolos automatizados podría minimizar errores. Esta automatización, junto con la validación en terreno, no solo podría mejorar la precisión en el cálculo de índices espectrales sino también enriquecer la aplicabilidad y confiabilidad de los estudios de teledetección en el futuro.

REFERENCIAS

- Addati, G. A., & Perez Lance, G. (2014). Introducción a los UAV's, Drones o VANTs de uso civil. *ECONSTOR*, 551, 1–9. <https://www.econstor.eu/handle/10419/130802>
- Aguilar, F., Rivas, J., Nemmaoui, A., Peñalver, A., & Aguilar, M. (2019). UAV-Based Digital Terrain Model Generation under Leaf-Off Conditions to Support Teak Plantations Inventories in Tropical Dry Forests. A Case of the Coastal Region of Ecuador. *Sensors*, 19(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/S19081934>
- Aguilar, M., Avella, C., Mirian, C., De Lima, V., Franco, M., Hernández, A., Herrera, Y., León, O., Londoño, M., Pinzón, M., Ramírez, W., Sánchez, L., Rojas, S., & Vargas, O. (2021). *Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino*. (A. Mauricio & R. Wilson (eds.); Instituto). Instituto Alexander von Humboldt. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/35916/EVALUACION_Y_SEGUIMIENTO_DE_LA_RESTAURACION_ECOLOGICA_EN_EL_PARAMO_ANDINO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Andrade, J., Escobar, G., & Paredes, D. (2019). Análisis en Flujo Permanente de los Factores que Inciden en la Disminución de la Capacidad Hidráulica de la Línea de Conducción del Sistema La Mica-Quito Sur. *INGENIO*, 2(2), 46–57. <https://doi.org/10.29166/INGENIO.V2I2.1703>
- Aponte, J., & Ospina, J. E. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. *Asociación Española de Teledetección*, 53, 59–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- Atkinson, P., Jeganathan, C., Dash, J., & Atzberger, C. (2012). Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123, 400–417. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.001>
- Austin, R. (2010). Introduction to unmanned aircraft systems (UAS). En *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment* (1^a ed., pp. 1–9). John Wiley & Sons, Ltd. <https://perpus.univpancasila.ac.id/repository/EBUPT200208.pdf>
- Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., & Martín, R. (2009). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Universidad Politécnica de Madrid*, 1–29. <https://www.researchgate.net/publication/266245324>
- Boon, M., Greenfield, R., & Tesfamichael, S. (2016). Wetland assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 781–788. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-781-2016>
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical andes. *Science*, 312, 1755–1756.

<https://doi.org/10.1126/science.1128087>

- Cárdenas, G. (2019). *Aproximación al entendimiento de la interacción río-acuífero, a partir de la implementación del método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), en el sector del río Tonusco, municipio de Santa Fe de Antioquia*. Universidad EAFIT.
- Castellanos, G., Maldonado, F., & Moreno, M. (2016). Obtención de imágenes índice de vegetación SAVI a partir de imágenes milirreflectancia TOA. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/311442359_OBTENCION_DE_IMAGENES_INDICE_DE_VEGETACION_SAVI_A_PARTIR_DE_IMAGENES_MILIRREFLECTANCIA_TOA
- Castilla, J. (2016). *Módulo clasificador de imágenes ópticas multiespectrales aplicado al área de geociencias* [Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica].
<https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/3010/TMIPICYTC3I62016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castillo, B. (2022). Aplicación de métodos geoestadísticos en el modelado espacio-temporal de los niveles de agua subterránea del acuífero Valle de Sébaco, Nicaragua. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(2), 196–212.
<https://doi.org/10.15359/rca.56-2.10>
- Coaguila, D., Tangerino, F., Freitas, Y., & Gonçalves, D. (2013). Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial utilizando datos de evapotranspiración. In *Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 4080–4085.
<https://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/sbsr2013/evapotranspiration.pdf>
- Comunidad Andina [CAN]. (2008). *Principales acciones: Noticias sobre el proceso andino de integración en el 2008*.
<https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/20116119413CAN2008.pdf>
- Corrales, R., & Ochoa, V. (2014). Vista de firmas espectrales de la cobertura de la tierra, aplicando radiometría de campo. *Ciencias Espaciales*, 7(1), 76–96.
<https://www.camjol.info/index.php/CE/article/view/2527/2282>
- Coudrain, A., Francou, B., & Kundzewicz, Z. (2005). Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrological Sciences*, 50(6), 925–932. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.925>
- Diaconu, D., Peptenatu, D., Simion, A., Pintilii, R.-D., Draghici, C., Teodorescu, C., Gruiam, A., & Ilie, A.-M. (2017). The restrictions imposed upon the urban development by the piezometric level. case study: Otopeni-Tunari-Corbeanca. *Urbanism. Architecture. Constructions*, 8(1), 27–36.
<https://web.s.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=20690509&AN=119239557&h=e%2FNJ6JiRL2a7mHEYYBZcukUtq01d76d%2BwkTBXZZDrldfKA0zUapOlgBqdhQ7qgINaAL3cMkNcL6V62P5U5YfCA%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLoca>
- Diaz, J. A., Pieri, D., Arkin, C., Gore, E., Griffin, T., Fladeland, M., Bland, G., Soto,

- C., Madrigal, Y., Castillo, D., Rojas, E., & Achí, S. (2010). Utilization of in situ airborne MS-based instrumentation for the study of gaseous emissions at active volcanoes. *International Journal of Mass Spectrometry*, 295(3), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2010.04.013>
- Empresa Publica Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (2020). *Memoria de sostenibilidad [EPMAPS]*. [https://ungc-production.s3.us-west-2.amazonaws.com/attachments/cop_2021/500211/original/MEMORIA DE SOSTENIBILIDAD EPMAPS Agua de Quito 2020.pdf?1625850223](https://ungc-production.s3.us-west-2.amazonaws.com/attachments/cop_2021/500211/original/MEMORIA_DE_SOSTENIBILIDAD_EPMAPS_Agua_de_Quito_2020.pdf?1625850223)
- 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>
- Espinel, G. (2019). *Desarrollo de una metodología para la evaluación de saturación del humedal Pugllahoma mediante el uso de UAVs*. [Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20633>
- Estrada, F., & Navas, M. (2013). *Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias de competencia de la dirección general del agua (2007-2011)*. https://www.miteco.gob.es/images/es/caracterizacion-hidrologica-de-sequias_tcm30-436649.pdf
- Evans, R., & Love, R. (1957). The step-point method of sampling—a practical tool in range research. *Journal of Range Management*, 10(5), 208–212. <https://doi.org/10.2307/3894015>
- Event 38 Unmanned Systems. (2022). *E386 Complete Package*. <https://event38.com/product/e386-complete-package/>
- Ewald, M., Skowronek, S., Aerts, R., Lenoir, J., Feilhauer, H., Van De Kerchove, R., Honnay, O., Somers, B., Garzón-López, C. X., Rocchini, D., & Schmidtlein, S. (2020). Assessing the impact of an invasive bryophyte on plant species richness using high resolution imaging spectroscopy. *Ecological Indicators*, 110, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.ecolind.2019.105882>
- Federal Aviation Administration. (2023). *Drones*. <https://www.faa.gov/uas/>
- Fondo para la Protección del Agua [FONAG]. (2016). *Diseño de monitoreo del humedal Pugllahoma*. [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)
- Gardner, C., Finlayson, C., Davidson, N., Fennessy, S., Coates, D., Damm, A., Baker, C., Kumar, R., & Stroud, D. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales. En N. Dudley (Ed.), *Ramsar. Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas 2018 (15 al 19 de enero del 2018, Gland-Suiza)* (pp. 4–76). Ramsar Convención de Humedales.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B., Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>

- Guerschman, J. P., Hill, M. J., Renzullo, L. J., Barrett, D. J., Marks, A. S., & Botha, E. J. (2009). Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 928–945. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.006>
- Hernández, A. (2020). *Comportamiento del nivel freático en el cultivo de banano (Musa Acuminata) en la provincia Guayas, Ecuador*. [Universidad de Salzburg]. https://issuu.com/unigis_latina/docs/105095
- Herrera, M., Porras, L., & Estrella, C. (2019). Propuesta de declaración del espectro electromagnético para Ecuador. *Revista Geoespacial*, 15(1), 15–32. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v15i1.1356>
- Hispa Drones. (2019, febrero 11). *Partes de un sistema aéreo no tripulado (UAS)*. <https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/partes-sistema-aereo-no-tripulado-uas/>
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L., & Zhang, H. (2017). Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 586, 319–327. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.02.001>
- Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 295–309. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Itkin, M., Kim, M., & Park, Y. (2016). Development of Cloud-Based UAV Monitoring and Management System. *Sensors*, 1–19. <https://doi.org/10.3390/s16111913>
- Jara, C. (2022). *Estudio integral de humedales altoandinos (andean peatlands) con Teledetección y SIG* [Universidad de Valencia]. https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/82721/Tesis_JaraCarlosPeatlands_OK.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jones, G., Pearlstine, L., & Percival, F. (2010). An Assessment of Small Unmanned Aerial Vehicles for Wildlife Research. *Wildlife Society Bulletin*, 34(3), 750–758. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2193/0091-7648%282006%2934%5B750%3AAAOSUA%5D2.0.CO%3B2>
- Junta de Andalucía. (2005). Restauración ecológica de humedales. En *Manual de restauración de humedales mediterráneos* (pp. 14–23). http://observatoriagua.uib.es/repositori/hum_manual-ja.pdf
- Kuhn, H. (2016). Optics of the electromagnetic spectrum. *Physics Bulletin*, 12(3), 246. <https://doi.org/10.1088/0031-9112/12/9/006>
- La Convención sobre los Humedales. (2012). *Los beneficios de la restauración de humedales*. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/bn/bn4-sp.pdf>
- Lam, N. S. N. (2013). Spatial Interpolation Methods: A Review. *Taylor & Francis Online*, 10(2), 129–150. <https://doi.org/10.1559/152304083783914958>
- López, E. (2012). El cambio climático y la gestión de páramos. *Agrónomos y Veterinarios sin Fronteras*, 1, 19–34. www.camaren.org

- Luque Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Autores científico-técnico y académicos*, 15, 1–15.
- Marcinkowska, A., Zagajewski, B., Raczko, E., Ochtyra, A., & Jarocińska, A. (2018). Classification of High-Mountain Vegetation Communities within a Diverse Giant Mountains Ecosystem Using Airborne APEX Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 10(4), 570. <https://doi.org/10.3390/RS10040570>
- Martín, L., Medina, J., & Upegui, E. (2019). Vista de evaluación del aporte de las características texturales en imágenes adquiridas en vehículos aéreos no tripulados para la identificación del estrés biótico en frailejones. Caso de estudio: páramo de Chingaza (Colombia). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(1), 27–44. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/3842/4079>
- Martínez, R., & Solís, G. (2018). Caracterización Espectral y Detección de Flecha Seca en Palma Africana en Puntarenas, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61), 349–367. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.13>
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971–2990. <https://doi.org/10.3390/rs70302971>
- 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>
- Mena, P., & Medina, G. (2001). *La biodiversidad de los páramos en el Ecuador* (P. Mena, G. Medina, & R. Hofstede (eds.)). Abya-Yala. https://www.academia.edu/9044711/LA_BIODIVERSIDAD_DE_LOS_PÁRAMOS_EN_EL_ECUADOR
- MicaSense. (2022). *RedEdge-MX Integration Guide*. MicaSense. <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/360011389334-RedEdge-MX-Integration-Guide>
- Minea, I., Andrei, A., & Mihai, N. (2015). Interpolating phreatic level altitude around Mădârjac village using geomorphometric variables as covariates. *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, 403–411.
- Montealegre, A., Lamelas, M., & De La Riva, J. (2014). Evaluación de métodos de interpolación utilizados en la creación de modelos digitales de elevaciones para la normalización de la nube de puntos lidar-pnoa en aplicaciones forestales (Sophie). *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.*, 116–122.
- Morales, N. F. (2020). *Teledetección y procesamiento de imágenes satelitales* (2ª ed., Vol. 2, Número Geomática Ambiental).
- Nex, F., & Remondino, F. (2013). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S12518-013-0120-X>
- Ojeda, W., González, A., & Flores, J. (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos

- no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 157–166.
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/3535/353551867010/html/index.html>
- Oñate de Mora, M. (2015). Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto. En *Los dores y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (pp. 49–56). fenercom.com/wp-content/uploads/2015/03/Los-Drones-y-sus-Aplicaciones-a-la-Ingenieria-Civil-fenercom-2015.pdf
- Palma, A. (2020). *Evaluación del estado del humedal Pugllohuma, perteneciente al Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), mediante el análisis de índices espectrales de imágenes capturadas desde una aeronave no tripulada (UAV)*. [Escuela Politécnica Nacional].
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21131>
- Paz, F., Reyes, M., & Mediano, E. (2011). Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. *Agrociencia*, 45(1), 121–134.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952011000100011&script=sci_arttext
- Peláez, O. (2017). *Análisis de la respuesta espectral de las coberturas vegetales de los ecosistemas de páramos y humedales a partir de los sensores aerotransportados ultracam d, dji phantom 3 pro y mapir nir. casos de estudio humedal “El Ocho”, Villamaría – Caldas*. [Universidad Católica de Manizales].
https://www.researchgate.net/profile/Omar-Pelaez-Martinez/publication/349664178_ANALISIS_DE_LA_RESPUESTA_ESPECTRAL_DE_LAS_COBERTURAS_VEGETALES_DE_LOS_ECOSISTEMAS_DE_PARAMOS_Y_HUMEDALES_A_PARTIR_DE_LOS_SENSORES_AEROTRANSPORTADOS_ULTRACAM_D_DJI_PHANTON_3_PR
- Pérez, L., & Miranda, R. (2010). Radiaciones electromagnéticas y salud en la investigación médica. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 39(1).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0138-65572010000100005
- Piedad, A., Hernández, D., Lárraga, H., & González Zacarías. (2020). Teledetección en la agricultura de precisión: estado del arte de los índices de vegetación. *Revista Académico-Científica*, 6(2), 47–59.
<https://www.eumed.net/uploads/articulos/c930da0a3d36ff2509e913c836b4bd c1.pdf>
- Quintana, R. (2018). Humedales, biodiversidad y servicios eco sistémicos. ¿Hacia dónde vamos? En UNSAM (Ed.), *Agua + Humedales* (1ª ed., pp. 174–192).
<http://bit.ly/2gDqQLp>
- Ríos, R. (2021). Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(4), 75–84.
<https://orcid.org/0000-0001-6544-1729>
- Riou, R., & Seyler, F. (1997). Texture analysis of tropical rain forest infrared satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(5), 515–521.
https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/97journal/may/1997_may_515-521.pdf

- Sani, J. C., Tierra, A., & Robayo, A. (2015, junio 3). Vehículos aéreos no tripulados - UAV para la elaboración de cartografías escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 10(1), 112–116. <https://doi.org/10.24133/CCTESPE.V10I1.34>
- Segura, G., Badilla, E., & Obando, L. (2011). LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN THE SIQUIRRES-TURRIALBA CORRIDOR. *Revista Geológica de América Central*, 45, 101–121.
- Shuttle Radar Topography Mission [SRTM]. (2000). *EARTH DATA*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. [https://search.earthdata.nasa.gov/search?polygon\[0\]=-78.55664%2C-0.28082%2C-78.54346%2C-0.85232%2C-77.82715%2C-0.81276%2C-77.92383%2C-0.1885%2C-78.55664%2C-0.28082&fst0=Solid+Earth&lat=-0.6088151843596421&long=-78.07763671875&zoom=7](https://search.earthdata.nasa.gov/search?polygon[0]=-78.55664%2C-0.28082%2C-78.54346%2C-0.85232%2C-77.82715%2C-0.81276%2C-77.92383%2C-0.1885%2C-78.55664%2C-0.28082&fst0=Solid+Earth&lat=-0.6088151843596421&long=-78.07763671875&zoom=7)
- Suárez, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171–177. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>
- Tellkamp, M., Herrera, H., Ponsot, E., & Bautista, I. (2019). Population Estimates and Habitat Selection of White-tailed Deer (*Odocoileus virginianus ustus*) in the Antisana Water Conservation Area, Ecuador. *Bionatura*, 2(1). <https://doi.org/10.21931/RB/CS/2019.02.01.29>
- Tibocha, J., Muñoz, J., Tibocha, J., & Muñoz, J. (2023). Certificación de competencias laborales con énfasis en operación de drones UCE/AEROPROF. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 78–83. <https://doi.org/10.29166/REVFIG.V15I1.4390>
- Tomlins, G. F., & Lee, Y. J. (2014). Remotely piloted aircraft — an inexpensive option for large-scale aerial photography in forestry applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 9(2), 76–85. <https://doi.org/10.1080/07038992.1983.10855042>
- Valencia, E., Changoluisa, I., Palma, K., Cruz, P., Valencia, D., Ayala, P., Hidalgo, V., Cevallos, C., Quisi, D., Jara, N., Puga, D., & Espinel, G. (2021). Wetland monitoring technification for the Andean region based on a multi-agent framework. *Elsevier*, 1, 1–21.
- Van Zuidam, R. (1987). Aerial Photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping. *The Geographical Journal*, 153(2), 298. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/634926>
- Velasco, J., García-Nieto, S., Reynoso-Meza, G., & Sanchis, J. (2012). Desarrollo y evaluación de una estación de control de tierra para vehículos aéreos no tripulados. *XXXIII Jornadas de Automática.*, 451–456.
- Walton, M., Gadia, T., & Zeedyk, B. (2014). *Characterization and Restoration of Slope Wetlands in New Mexico*. <https://quiviracoalition.org/wp-content/uploads/2018/03/Characterization-and-Restoration-of-Slope-Wetlands-.pdf>
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2016). *Use*

of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>

ANEXOS

ANEXO 1

REGLAMENTO DE OPERACIÓN DE UAV

DIRECCIÓN GENERAL
DE AVIACIÓN CIVIL



Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R

Quito, D.M., 04 de noviembre de 2020

DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL

CONSIDERANDO

Que, la Constitución de la República en el artículo 226 consagra el principio de legalidad o de habilitación legal previa, por el cual: *“Las instituciones del Estado, sus organismos, dependencias, las servidoras o servidores públicos y las personas que actúen en virtud de una potestad estatal ejercerán solamente las competencias y facultades que les sean atribuidas en la Constitución y la ley. [...]”*;

Que, la Constitución de la República en el artículo 394 establece que: *“El Estado garantizará la libertad de transporte [...], aéreo, [...] dentro del territorio nacional, sin privilegios de ninguna naturaleza”*;

Que, la Ley de Aviación Civil en el artículo 5 establece que la *“Dirección General de Aviación Civil es una entidad autónoma de derecho público, con personería jurídica y fondos propios, con sede en el Distrito Metropolitano de Quito”*, y que *“El Director General de Aviación Civil, es la máxima autoridad de la Entidad y será designado por el Presidente de la República, de una terna propuesta por el Consejo Nacional de Aviación Civil”*;

Que, el señor Presidente Constitucional de la República del Ecuador, mediante Decreto Nro. 728 de 29 de abril de 2019, designó al señor Anyelo Patricio Acosta Arroyo como Director General de Aviación Civil;

Que, la Dirección General de Aviación Civil con Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R de 30 de agosto de 2020, aprobó el nuevo Reglamento que norma la **“Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)”**;

Que, el Comité de Normas, en reunión efectuada el 28 de septiembre de 2020, creó un grupo de trabajo, para la revisión de la Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R de 30 de agosto de 2020, que trata sobre Reglamento para la **“Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)”**, a fin de adecuarlo a las necesidades que implica esta materia y se revise la carga regulatoria establecida, y con Memorando Nro. DGAC-SGAC-2020-0559-M 29 de septiembre de 2020, designó y se conformó el grupo de trabajo para tal efecto;

Que, el grupo de trabajo luego del análisis respectivo, remite al Comité de Normas mediante memorando Nro. DGAC-OGOP-2020-0659-M de 05 de octubre de 2020, su informe con el que considera algunas modificaciones al Reglamento de RPAs y recomienda que *“[...] todos los Apéndices sean retirados del Reglamento por ser éstos, procedimientos propios de cada Gestión para el cumplimiento de la norma, y pueden ser*

DIRECCIÓN GENERAL
DE AVIACIÓN CIVIL



Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R

Quito, D.M., 04 de noviembre de 2020

incluidos en los manuales y/o procedimientos de cada área, señalando además, que éstos deben ser revisados a fin de que se ajusten al nuevo proyecto de reglamento que se pone a su consideración”;

Que, el Comité de Normas en reunión efectuada el 13 de octubre de 2020, tomó conocimiento del informe presentado por el grupo de trabajo y luego del análisis respectivo, aprobó los cambios propuestos, dentro de ellos se eliminó el literal (f) del artículo 18, y se acogió la recomendación realizada por el grupo de trabajo por lo que en consenso resolvió recomendar al Director General aprobar la **modificación** al Reglamento para la **“Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)”**, la misma que entrará en vigencia a partir de la legalización de la Resolución que se emita, sin perjuicio de su publicación en el Registro Oficial, y mantener el plazo de 3 meses para la socialización e implementación de dicho Reglamento;

Que, el Comité de Normas en reunión efectuada el 23 de octubre de 2020, tomó conocimiento y analizó las observaciones emitidas por el Director General de Aviación Civil respecto de la propuesta de reglamento modificado, y luego del análisis respectivo el Comité resolvió acoger parcialmente las modificaciones planteadas, y por consiguiente recomendar al Director General aprobar la inclusión de varias de las modificaciones propuestas, las mismas que entrarán en vigencia y su socialización conforme se establece en el considerando anterior;

Que, el señor Subdirector General de Aviación Civil en su calidad de Presidente del Comité de Normas emitió su informe recomendando la aprobación de las modificaciones emitidas por el Director General y que concordaron con el criterio técnico de los miembros del Comité de Normas;

Que, el artículo 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, determina las atribuciones y obligaciones del Director General de Aviación Civil entre ellas: *“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 sus facultades legales y reglamentarias,

RESUELVE

Artículo Primero.- Aprobar la modificación al Reglamento que norma la **“Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)”** que fue aprobado con Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R de 30 de agosto de 2020, conforme el Reglamento

DIRECCIÓN GENERAL
DE AVIACIÓN CIVIL



Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R

Quito, D.M., 04 de noviembre de 2020

modificado que forma parte integrante de esta Resolución.

Artículo Segundo.- Mantener el plazo de 3 meses establecido en el artículo 3 de la Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R de 30 de agosto de 2020, para la socialización e implementación del Reglamento que norma la “Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)” modificado conforme la presente resolución.

Artículo Tercero.- Durante el plazo referido en el artículo anterior, las direcciones administrativas involucradas en esta reglamentación, deberán elaborar o adecuar los formatos relacionados con las solicitudes, formularios, autorizaciones, y demás documentos.

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

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

DISPOSICIÓN TRANSITORIA

Única.- Los trámites administrativos que se encuentren en desarrollo ante la Dirección General de Aviación Civil bajo la Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R, deberán sustanciarse hasta su conclusión de acuerdo a los procedimientos establecidos en el Reglamento aprobado en esta Resolución.

Comuníquese y publíquese. - Dada en la Dirección General de Aviación Civil en Quito Distrito Metropolitano.

Documento firmado electrónicamente

Plto. Anyelo Patricio Acosta Arroyo
DIRECTOR GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL

Anexos:

- 3_proyecto_reglamento_rpas_final.pdf

Copia:

Señor Abogado
Telmo Italo Aguila Barragan
Abogado 2

Señora

DIRECCIÓN GENERAL
DE AVIACIÓN CIVIL



Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R

Quito, D.M., 04 de noviembre de 2020

Luz Marina Estrella Silva
Secretaria

Señora
Luz Marina Palacios Zumba
Asistente de Abogacía

Señor Técnico
Santiago Remigio Alegria Chico
Inspector Despachador de Vuelo 2

sa/mv/gp/mj



**DIRECCIÓN GENERAL
DE AVIACIÓN CIVIL**

**Operación de Aeronaves
Pilotadas a Distancia (RPAs)**

Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)

Capítulo A: Generalidades.

Art. 1.- Definiciones y abreviaturas.

- (a) Los términos y expresiones utilizados en la presente Regulación, sea que consten en singular o en plural, tendrán el siguiente significado:
- (1) Accidente. - Todo suceso relacionado con la utilización de una RPA que ocurre entre el momento en que la aeronave está lista para desplazarse con el propósito de realizar un vuelo y el momento en que se detiene, al finalizar el vuelo, y se apaga su sistema de propulsión principal, durante el cual:
 - a) Cualquier persona sufre lesiones mortales o graves a consecuencia de: Contacto directo con cualquier parte de la RPA, incluso las partes que se hayan desprendido de la RPA; o,
 - b) La aeronave sufre daños o roturas estructurales que: afectan adversamente su resistencia estructural, su performance o sus características de vuelo; y que normalmente exigen una reparación importante
 - (2) Actividades recreativas. - Actividades o acciones que permiten que una persona se recree o entretenga.
 - (3) Aeródromo. - Área definida de tierra o de agua (que incluye todas sus edificaciones, instalaciones y equipos) destinada total o parcialmente a la llegada, salida y movimiento en superficie de aeronaves.
 - (4) Aeródromo controlado. - Aeródromo en el que se facilita servicio de control de tránsito aéreo para el tránsito del aeródromo.
 - (5) Aeronave. - Toda máquina que puede sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra.
 - (6) Aeronave pilotada a distancia (RPA). - Aeronave no tripulada que es pilotada desde una estación de pilotaje a distancia.
 - (7) Altura. - Distancia vertical entre un nivel, punto u objeto considerado como punto y una referencia especificada.
 - (8) Áreas Sensibles. - Espacio terrestre que contiene objetivos estratégicos que inciden en gran magnitud en el desarrollo económico, social y militar del país; como por ejemplo refinerías, hidroeléctricas, termoeléctricas, áreas industriales, bases militares, puentes importantes, entre otros.
 - (9) Autorización especial de vuelo de una RPA. - Documento oficial otorgado por la AAC, en la que se especifican condiciones especiales, atribuciones o restricciones para la Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia, y le otorga la facultad para desempeñar las funciones propias expresamente consignadas en ella.

- (10) Mercancías peligrosas. - Todo objeto o sustancia que pueda constituir un riesgo para la salud, la seguridad, la propiedad o el medio ambiente y que figura en la lista de mercancías peligrosas de las Instrucciones Técnicas o esté clasificado conforme a dichas instrucciones.
- (11) Operador de la RPA. - Es la persona al mando de los controles de una aeronave pilotada a distancia.
- (12) Operación con visibilidad directa visual (VLOS). - Operación en la cual el piloto a distancia u observador RPA mantiene contacto visual directo sin ayudas con la aeronave pilotada a distancia.
- (13) Trabajos aéreos. - Operación de aeronave en la que ésta se aplica a servicios especializados tales como agricultura, construcción, fotografía, levantamiento de planos, observación y patrulla, búsqueda y salvamento, anuncios aéreos.
- (14) Zona de control. - Espacio aéreo controlado que se extiende hacia arriba desde la superficie terrestre hasta un límite superior especificado.
- (15) Zona peligrosa. - Espacio aéreo de dimensiones definidas en el cual pueden desplegarse en determinados momentos actividades peligrosas para el vuelo de las aeronaves
- (16) Zona prohibida. - Espacio aéreo de dimensiones definidas sobre el territorio o las aguas jurisdiccionales de un Estado, dentro del cual está prohibido el vuelo de las aeronaves.
- (17) Zona restringida. - Espacio aéreo de dimensiones definidas sobre el territorio o las aguas jurisdiccionales de un Estado, dentro del cual está restringido el vuelo de las aeronaves, de acuerdo con determinadas condiciones especificadas.
- (18) Zona Intangible. - Espacios protegidos de excepcional importancia cultural y biológica en los cuales no puede realizarse ningún tipo de actividad extractiva debido al valor que tienen para las generaciones presentes y futuras.

(b) Las siguientes abreviaturas son de aplicación para este reglamento:

AAC	Autoridad de Aviación Civil (Dirección General de Aviación Civil).
AGL	Sobre el nivel del terreno.
ATZ	Zona de Tránsito de Aeródromo.
MTOW	Peso (masa) máximo de despegue.
NM	Millas náuticas.
RPAs	Aeronaves pilotadas a distancia (Remote Piloted Aircrafts).
VFR	Reglas de vuelo visual.
VLOS	Operación con visibilidad directa visual.

VMC Condiciones meteorológicas de vuelo visual.

Art. 2.- Aplicabilidad.

(a) Los requisitos de este Reglamento se aplican a:

(1) Las operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAs) usados en actividades civiles cuyo peso (masa) máximo al despegue (MTOW) sea superior a 0.25 Kilogramos y menor o igual a 150 Kilogramos; y,

(2) Las personas que operan una RPA.

(b) Queda prohibida la operación de las aeronaves de más de 150 kilogramos de peso (masa) máxima de despegue (MTOW).

La AAC se reserva el derecho de emitir permisos especiales con base en las reglas de este reglamento, relacionados con operaciones con RPAs que, por sus características técnicas y por su finalidad de operación, las cuales sean realizadas por entidades públicas o privadas debidamente reconocidas o autorizadas con fines exclusivos de investigación científica, innovación y desarrollo.

(c) Estas reglas no serán aplicables para:

(1) Operación de aeromodelismo.

(2) Operación con RPAs con MTOW de menos de 0.25 Kilogramos.

(3) Globos fijos, cometas, cohetes, y aeronaves radiocontroladas y globos libres no tripulados.

(4) Operaciones realizadas por las Fuerzas Armadas, Aduanas o Policía Nacional dentro del ámbito de sus funciones.

Art. 3.- Operaciones recreativas.

Las operaciones de RPAs con fines exclusivamente en actividades recreativas se ajustarán a las reglas de operación establecidas en el Capítulo B.

Art. 4.- Operaciones de trabajos aéreos.

Las operaciones de trabajos aéreos, además de cumplir con las reglas de operación del Capítulo B y C, deben contar con el correspondiente permiso de operación de conformidad con la normativa vigente.

Art. 5.- Autorización especial de vuelo.

Las operaciones de RPAs que requieran una autorización especial de cualquiera de los requisitos de operación del Capítulo B, deben obtener la autorización expresa de la AAC según el Capítulo D.

Capítulo B: Reglas de vuelo y operación general.**Art. 6.- Aplicabilidad.**

Este capítulo establece las reglas de vuelo para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (RPAs). Excepto que la AAC autorice expresamente de otra forma, la operación de las RPAs se ajustará a lo establecido en el presente capítulo.

Art. 7.- Operación negligente o temeraria de aeronaves.

- (a) La operación de las RPAs debe realizarse de tal forma que no ponga en peligro la seguridad de las operaciones aéreas, de las personas en la superficie, de sus bienes y de la fauna silvestre.
- (b) El operador de una RPA suspenderá inmediatamente el vuelo, en cualquier momento en que la seguridad de las personas, de los bienes y de la fauna esté en peligro como resultado de esta operación, o cuando no pueda cumplir con todos los requisitos del presente capítulo.
- (c) Las operaciones interrumpidas según el literal (b) no se reanudarán en tanto las condiciones que generan el peligro estén presentes.

Art. 8.- Responsabilidad por la operación.

- (a) El operador de una RPA es responsable de la seguridad de la operación de cada vuelo.
- (b) Ninguna persona podrá iniciar o continuar el vuelo si conoce que la RPA no se encuentra en condiciones para realizar una operación segura.
- (c) El operador de una RPA es responsable solidariamente con el explotador y/o propietario de la aeronave, por la operación de la misma.
- (d) El operador de una RPA es responsable que la aeronave no represente ningún peligro para personas, animales, otras aeronaves y bienes, en caso de pérdida del control de la aeronave por cualquier motivo.
- (e) Las RPAs destinados para actividades recreativas que sean operados por menores de edad, deberán encontrarse bajo la supervisión directa de un adulto. La responsabilidad absoluta de la operación recaerá sobre el explotador y/o propietario de la aeronave y de manera solidaria, sobre la persona que ejerza la patria potestad del menor.
- (f) El operador de una RPA, no podrá iniciar el vuelo a menos que la RPA se encuentre debidamente registrado de conformidad a lo establecido en el presente Reglamento.

Art. 9.- Integridad fisiológica de un operador de RPA.

Ninguna persona operará una RPA 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, de cualquier sustancia psicotrópica o cualquier otra que pudiera afectar sus facultades para operar los controles de manera segura.
- (c) Tiene una condición física o mental que podría interferir con la operación segura de la RPA.

Art. 10.- Restricciones de las operaciones en demostraciones aéreas, eventos deportivos y otros eventos.

- (a) Salvo que la AAC haya otorgado una autorización especial según el Capítulo D de este reglamento, está prohibida la operación de las RPAs a una distancia menor a 500 metros de una demostración aérea o de cualquier reunión de personas al aire libre como conciertos, festivales, eventos deportivos, entre otros.
- (b) Sobre o en la vecindad de cualquier zona a ser visitada o recorrida por el Presidente y Vicepresidente infringiendo las restricciones establecidas por la AAC o inobservando los requisitos y procedimientos que establezca la Presidencia de la República en la normativa que expida para el efecto.

Art. 11.- Cumplimiento con las leyes y reglamentos locales.

El operador de una RPA cumplirá todas las leyes, reglamentos, ordenanzas y otras disposiciones relacionadas con seguridad nacional, seguridad pública, protección de la privacidad y la intimidad personal, propiedad intelectual, entre otras.

Art. 12.- Operación con visibilidad directa.

- (a) El operador de una RPA es responsable de mantener contacto directo visual con la aeronave durante todo el vuelo.
- (b) La presencia de un observador no exime al operador de una RPA del cumplimiento del literal anterior.

Art. 13.- Prohibición de operación simultánea.

Una persona no debe operar en forma simultánea más de una RPA en vuelo, a excepción de las RPAs que cumplan con las condiciones para dicha operación.

Art. 14.- Operaciones en Espacio aéreo controlado.

Está prohibida la operación de RPA en espacio aéreo controlado, salvo que exista la autorización de la AAC para dicha operación.

Art. 15.- Derecho de paso.

El operador de una RPA cederá el paso a las aeronaves tripuladas incluyendo:

- (a) aviones;

- (b) helicópteros;
- (c) planeadores;
- (d) ultraligeros; y,
- (e) globos libres tripulados.

Art. 16.- Horas de operación.

Salvo autorización especial emitida según el Capítulo D de este Reglamento, las RPAs serán operadas en las horas comprendidas entre la salida y la puesta del sol; y en condiciones meteorológicas de vuelo visual (VMC).

Art. 17.- Altura máxima de vuelo.

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

Art. 18.- Operaciones en las cercanías de un aeródromo, helipuerto, zonas prohibidas, zonas restringidas, zonas intangibles, áreas sensibles, estratégicas y zonas de seguridad del Estado.

Las RPA no serán operadas:

- (a) A una distancia igual o mayor a 9 kilómetros (5 NM) de los límites o linderos de cualquier aeródromo o zonas de seguridad del Estado o a una distancia igual o mayor a 0.9 kilómetros (0.5 NM) de los límites o linderos de cualquier helipuerto, lo que resulte más restrictivo.
- (b) En zonas prohibidas, zonas restringidas, zonas intangibles y zonas de seguridad del estado determinadas por la ley.
- (c) Dentro de un radio de 9 kilómetros (5 NM) de una zona de incendio forestal.
- (d) Cerca de personas o propiedades cuya operación involucre vulneración de su privacidad personal y familiar.
- (e) A una distancia menor a 150 metros (500 ft) de los centros de privación de libertad o centros de rehabilitación social; excepto la operación de RPAs del Servicio Nacional de Atención Integral a Personas Adultas Privadas de la Libertad y A Adolescentes Infractores (SNAI) que por sus competencias y actividades propias de vigilancia por seguridad en los CPL y CRS deben realizarlo.
- (f) En zonas ocupadas por equipos de emergencia o auxilio tales como el cuerpo de bomberos, hospitales, clínicas, asilos, etc.
- (g) Las entidades públicas o privadas competentes según corresponda, tendrán la facultad de aplicar el derecho de inhibición o derribo (tecnología anti-dron) o tomar acciones necesarias, cuando un RPA incumpla lo señalado en este reglamento.

Art. 19.- Actividades previas al vuelo.

El operador de una RPA se asegurará, antes de iniciar cada vuelo lo siguiente:

- (a) El área seleccionada para el vuelo ha sido inspeccionada y permite la ejecución segura de la misma dentro de los límites establecidos en el presente capítulo.
- (b) La RPA ha sido inspeccionado para identificar posibles daños y se encuentra en condiciones aptas para una operación segura, incluyendo la disponibilidad de combustible o carga de la batería acordes al vuelo planificado;
- (c) Se han cumplido todas las tareas de mantenimiento establecidas por el fabricante; y,
- (d) No exista interferencias visibles o detectables con otras señales de radio que pudieran afectar el control de la RPA.

Art. 20.- Limitaciones Operacionales.

El operador de una RPA es responsable por asegurarse que la misma sea operada de acuerdo con las limitaciones operacionales establecidas por el fabricante.

Art. 21.- Lanzamiento y rociado.

No se realizará ningún lanzamiento o rociado desde una RPA, salvo autorización expresa emitida por la AAC.

Art. 22.- Prohibición de transportar.

Las RPA no transportarán armas, dispositivos laser, mercancía peligrosa, material que represente peligro biológico o cualquier otro tipo de mercancía, que en caso de desprendimiento o filtraciones representen un riesgo para las personas, animales o bienes en la superficie.

Art. 23.- Operación desde vehículos en movimiento.

Ninguna persona operará una RPA desde un vehículo en movimiento.

Art. 24.- Procedimientos de emergencia.

El operador de una RPA seguirá los procedimientos establecidos por el fabricante en caso de pérdida del enlace de comunicaciones con el mismo.

Art. 25.- Registro.

Todo propietario de una RPA, debe registrar la aeronave en la Dirección General de Aviación Civil, de conformidad a lo siguiente:

- a) Para servicios de trabajos aéreos. - RPA cuyo peso (masa) máximo de despegue (MTOW) sea igual o superior a 0.5 Kilogramos y no mayor a 150 Kilogramos.

- b) Para actividades recreativas. - RPA cuyo peso (masa) máximo de despegue (MTOW) sea igual o superior a 2 Kilogramos y no mayor a 150 Kilogramos.

Nota: Las RPAs no contempladas en los literales a) y b) de esta sección quedan exentas del cumplimiento del Registro.

Art. 26.- Seguros.

- (a) El propietario o el operador de la RPA en **actividades de trabajos aéreos**, está en la obligación de responder por los daños causados a terceros, como resultado de sus actividades de vuelo, para lo cual deberá contar y presentar ante la AAC los seguros correspondientes que cubra la responsabilidad civil frente a terceros, según los montos mínimos de cobertura que se establecen a continuación:

De 0,25 kg hasta 25 kg de peso (masa) máximo de despegue (MTOW)	USD 3.000,00
De más de 25 kg hasta 50 kg de peso (masa) máximo de despegue (MTOW)	USD 6.000,00
De más de 50 kg hasta 150 kg peso (masa) máximo de despegue (MTOW)	USD 12.000,00

- (b) Las RPAs en **actividades recreativas** cuyo peso (masa) máximo de despegue (MTOW) sea inferior a 25 kg, no están en la obligación de presentar ante la AAC seguros que cubran la responsabilidad civil frente a terceros; sin embargo, el operador será el responsable civil directo de los daños que cause la aeronave por la operación de la misma, así como responderá por culpa o negligencia de cualquier índole establecida en el artículo 2229 del Código Civil ecuatoriano.

Las aeronaves en **actividades recreativas** cuyo peso (masa) máximo de despegue (MTOW) sea igual o superior a 25 kg, está en la obligación de responder por los daños causados a terceros, como resultado de sus actividades de vuelo para lo cual, deberá contar y presentar ante la AAC los seguros correspondientes que cubra la responsabilidad civil frente a terceros, de acuerdo a los montos mínimos de cobertura establecidos en el literal (a) del presente Artículo.

- (c) No obstante, a lo dispuesto en los literales (a) y (b), en caso de que la cuantificación del daño sea superior a la cobertura de dicha póliza, el operador será el responsable civil directo de los daños que cause la aeronave por la operación de la misma, así como, responderá por culpa o negligencia de cualquier índole conforme lo establecido en el artículo 2229 del Código Civil Ecuatoriano. Por tanto, el operador es responsable civil directo de los daños que cause la aeronave por la operación de la misma, en la privacidad, intimidad, derecho a la imagen, y demás actividades.

Art. 27.- Accidente, incidente o pérdida de una RPA.

Si ocurriera algún accidente, incidente o pérdida de una RPA el propietario u operador tiene 48 horas para comunicar este particular a la autoridad, a efectos de iniciar la investigación correspondiente.

Art. 28.- Autoridad de inspección.

- (a) Todo propietario u operador de una RPA debe permitir a los inspectores de la AAC en cualquier momento y lugar, realizar las inspecciones y chequeos necesarios para determinar el cumplimiento de la reglamentación aeronáutica vigente.
- (b) Sin perjuicio de la acción legal que corresponda, el negarse a la inspección o el incumplimiento de cualquiera de los requerimientos o limitaciones establecidos en este Reglamento, constituirá motivo suficiente para que la AAC, prohíba la operación de la RPA por constituir un peligro para la Seguridad operacional. De ser necesario, las autoridades públicas nacionales y locales podrán ser alertadas del particular, a fin de evitar que la actividad de vuelo pretendida constituya una amenaza para la seguridad operacional o se ponga en riesgo a personas y/o propiedades.

Capítulo C: Autorización Técnica Operación de RPAs en Trabajos Aéreos.**Art. 29.- Aplicabilidad.**

Este capítulo establece los requisitos para la emisión de la autorización técnica de operación de RPAs en Trabajos Aéreos. La AAC emitirá la autorización técnica, si el solicitante cumple con los requerimientos establecidos en este reglamento y demuestre que sus procedimientos son aceptables para la Autoridad.

Art. 30.- Registro de vuelo.

Cada RPA deberá contar con un registro de vuelo en el que conste lo siguiente:

- (1) Marca, modelo y número de serie;
- (2) Fecha;
- (3) Nombre del operador de la RPA;
- (4) Puntos y horas de salida y llegada;
- (5) Propósito del vuelo; y,
- (6) Firma del operador de la RPA.

Art. 31.- Registros de mantenimiento.

El operador de una RPA deberá mantener registros de mantenimiento de acuerdo a lo recomendado por el fabricante.

Art. 32.- Autorización de operador RPA.

Para la operación de una RPA en trabajos aéreos, el operador deberá estar en posesión de una Autorización de Operador de RPA emitida por la AAC de conformidad con el Capítulo E de este Reglamento.

Capítulo D: Autorización especial de vuelo de una RPA.**Art. 33.- Aplicabilidad.**

Este capítulo se aplica a la solicitud de autorización especial de vuelo para las desviaciones de ciertos requisitos específicos del Capítulo B.

Art. 34.- Solicitud de autorización especial de vuelo.

La solicitud de autorización especial de una RPA, debe remitirse a la AAC con 10 días término de anticipación a la operación o actividad propuesta, adjuntando, el formulario siguiente:

 SOLICITUD DE AUTORIZACION ESPECIAL DE VUELO RPA (Form. RPA-001)				
INFORMACIÓN GENERAL DEL SOLICITANTE Y/O EXPLOTADOR				
Nombre completo o razón social:				
Cédula de Identidad o RUC:			Fecha de la solicitud	
Dirección:				
E-mail:			Teléfono(s):	
Datos de la RPA				
Marca:	Modelo	Nro. Registro (si aplica):	Serie:	Peso (MTOW):
Datos de la operación				
Fecha(s) o período de operación:				
Descripción de los equipos:				
Tipo de actividad que va a desarrollar:				
Provincia, cantón, parroquia (área/sector) y coordenadas de la operación:				
Nombres completos del operador de la RPA:				
Otra información adicional:				
Autorización especial de vuelo solicitada (detallar cada sección con el respectivo literal y numeral según corresponda):				
Declaro conocer el Reglamento "Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia" NOMBRE: FIRMA Y NRO. CÉDULA DE CIUDADANÍA DEL SOLICITANTE				
* Adjuntar el certificado de seguro (si aplica) y otras autorizaciones de entidades gubernamentales, según corresponda. *La persona de un RPA debe llevar consigo la presente autorización durante la operación. *La presente autorización es válida solamente para las operaciones y fechas especificadas en los datos del presente formulario. *La presente autorización estará sujeta al estricto cumplimiento de Capítulo B del presente reglamento, (a excepción de las desviaciones solicitadas) y las limitaciones de operación adicionales según corresponda, cualquier incumplimiento será motivo para su revocatoria y/o acción legal respectiva.				

Capítulo E: Autorización de operador RPA.**Art. 35.- Aplicabilidad.**

Este capítulo establece los requisitos para emitir una autorización de operador de aeronaves pilotadas a distancia (RPA).

Art. 36.- Requisitos de idoneidad: Generalidades.

Para optar por una autorización de operador de RPA, una persona debe:

- (a) Tener al menos dieciocho (18) años de edad.
- (b) Ser capaz de leer, hablar y entender el idioma español.
- (c) Haber culminado la enseñanza media o equivalente.
- (d) Demostrar de manera aceptable a la AAC, el haber aprobado satisfactoriamente un curso teórico/práctico para operador de RPA, dentro de los últimos veinticuatro (24) meses.

Art. 37.- Emisión de la autorización para operador de RPA.

El solicitante a una autorización de operador de RPA, presentará la documentación de manera prescrita por la ACC.

- (a) La autorización para operador de RPA tendrá una vigencia de 24 meses contados a partir de su emisión.
- (b) La Autorización será suscrita por el Director de Seguridad Operacional.
- (c) En caso de modificación a la autorización del operador deberá notificar a la ACC en el término de 5 días de antelación a la realización de sus actividades.

Art. 38.- Renovación de la autorización de un operador de RPA.

- (a) Para renovar una autorización de un operador de RPA, el solicitante deberá presentar el registro de vuelo que sea aceptable para AAC, que incluya:
 - (1) Haber efectuado operaciones en RPA ejerciendo las funciones de operador de RPA que correspondan, no menos de quince (15) horas de vuelo en los últimos seis (6) meses que preceden a su solicitud.
 - (2) Cuando no se hayan cumplido los requisitos de experiencia reciente indicados en el párrafo anterior, el solicitante deberá haber aprobado satisfactoriamente un curso teórico/práctico para operador de RPA, dentro de los últimos doce (12) meses.

ANEXO 2

DATOS DE MICRO TOPOGRAFIA POR PARTE DEL FONAG

Year	Month	Day	Time	Location	Activity	Notes
2010	1	1	08:00	...	...	...
2010	1	2	08:00	...	...	...
2010	1	3	08:00	...	...	...
2010	1	4	08:00	...	...	...
2010	1	5	08:00	...	...	...
2010	1	6	08:00	...	...	...
2010	1	7	08:00	...	...	...
2010	1	8	08:00	...	...	...
2010	1	9	08:00	...	...	...
2010	1	10	08:00	...	...	...
2010	1	11	08:00	...	...	...
2010	1	12	08:00	...	...	...
2010	1	13	08:00	...	...	...
2010	1	14	08:00	...	...	...
2010	1	15	08:00	...	...	...
2010	1	16	08:00	...	...	...
2010	1	17	08:00	...	...	...
2010	1	18	08:00	...	...	...
2010	1	19	08:00	...	...	...
2010	1	20	08:00	...	...	...
2010	1	21	08:00	...	...	...
2010	1	22	08:00	...	...	...
2010	1	23	08:00	...	...	...
2010	1	24	08:00	...	...	...
2010	1	25	08:00	...	...	...
2010	1	26	08:00	...	...	...
2010	1	27	08:00	...	...	...
2010	1	28	08:00	...	...	...
2010	1	29	08:00	...	...	...
2010	1	30	08:00	...	...	...
2010	2	1	08:00	...	...	...
2010	2	2	08:00	...	...	...
2010	2	3	08:00	...	...	...
2010	2	4	08:00	...	...	...
2010	2	5	08:00	...	...	...
2010	2	6	08:00	...	...	...
2010	2	7	08:00	...	...	...
2010	2	8	08:00	...	...	...
2010	2	9	08:00	...	...	...
2010	2	10	08:00	...	...	...
2010	2	11	08:00	...	...	...
2010	2	12	08:00	...	...	...
2010	2	13	08:00	...	...	...
2010	2	14	08:00	...	...	...
2010	2	15	08:00	...	...	...
2010	2	16	08:00	...	...	...
2010	2	17	08:00	...	...	...
2010	2	18	08:00	...	...	...
2010	2	19	08:00	...	...	...
2010	2	20	08:00	...	...	...
2010	2	21	08:00	...	...	...
2010	2	22	08:00	...	...	...
2010	2	23	08:00	...	...	...
2010	2	24	08:00	...	...	...
2010	2	25	08:00	...	...	...
2010	2	26	08:00	...	...	...
2010	2	27	08:00	...	...	...
2010	2	28	08:00	...	...	...
2010	2	29	08:00	...	...	...
2010	3	1	08:00	...	...	...
2010	3	2	08:00	...	...	...
2010	3	3	08:00	...	...	...
2010	3	4	08:00	...	...	...
2010	3	5	08:00	...	...	...
2010	3	6	08:00	...	...	...
2010	3	7	08:00	...	...	...
2010	3	8	08:00	...	...	...
2010	3	9	08:00	...	...	...
2010	3	10	08:00	...	...	...
2010	3	11	08:00	...	...	...
2010	3	12	08:00	...	...	...
2010	3	13	08:00	...	...	...
2010	3	14	08:00	...	...	...
2010	3	15	08:00	...	...	...
2010	3	16	08:00	...	...	...
2010	3	17	08:00	...	...	...
2010	3	18	08:00	...	...	...
2010	3	19	08:00	...	...	...
2010	3	20	08:00	...	...	...
2010	3	21	08:00	...	...	...
2010	3	22	08:00	...	...	...
2010	3	23	08:00	...	...	...
2010	3	24	08:00	...	...	...
2010	3	25	08:00	...	...	...
2010	3	26	08:00	...	...	...
2010	3	27	08:00	...	...	...
2010	3	28	08:00	...	...	...
2010	3	29	08:00	...	...	...
2010	3	30	08:00	...	...	...
2010	3	31	08:00	...	...	...
2010	4	1	08:00	...	...	...
2010	4	2	08:00	...	...	...
2010	4	3	08:00	...	...	...
2010	4	4	08:00	...	...	...
2010	4	5	08:00	...	...	...
2010	4	6	08:00	...	...	...
2010	4	7	08:00	...	...	...
2010	4	8	08:00	...	...	...
2010	4	9	08:00	...	...	...
2010	4	10	08:00	...	...	...
2010	4	11	08:00	...	...	...
2010	4	12	08:00	...	...	...
2010	4	13	08:00	...	...	...
2010	4	14	08:00	...	...	...
2010	4	15	08:00	...	...	...
2010	4	16	08:00	...	...	...
2010	4	17	08:00	...	...	...
2010	4	18	08:00	...	...	...
2010	4	19	08:00	...	...	...
2010	4	20	08:00	...	...	...
2010	4	21	08:00	...	...	...
2010	4	22	08:00	...	...	...
2010	4	23	08:00	...	...	...
2010	4	24	08:00	...	...	...
2010	4	25	08:00	...	...	...
2010	4	26	08:00	...	...	...
2010	4	27	08:00	...	...	...
2010	4	28	08:00	...	...	...
2010	4	29	08:00	...	...	...
2010	4	30	08:00	...	...	...
2010	5	1	08:00	...	...	...
2010	5	2	08:00	...	...	...
2010	5	3	08:00	...	...	...
2010	5	4	08:00	...	...	...
2010	5	5	08:00	...	...	...
2010	5	6	08:00	...	...	...
2010	5	7	08:00	...	...	...
2010	5	8	08:00	...	...	...
2010	5	9	08:00	...	...	...
2010	5	10	08:00	...	...	...
2010	5	11	08:00	...	...	...
2010	5	12	08:00	...	...	...
2010	5	13	08:00	...	...	...
2010	5	14	08:00	...	...	...
2010	5	15	08:00	...	...	...
2010	5	16	08:00	...	...	...
2010	5	17	08:00	...	...	...
2010	5	18	08:00	...	...	...
2010	5	19	08:00	...	...	...
2010	5	20	08:00	...	...	...
2010	5	21	08:00	...	...	...
2010	5	22	08:00	...	...	...
2010	5	23	08:00	...	...	...
2010	5	24	08:00	...	...	...
2010	5	25	08:00	...	...	...
2010	5	26	08:00	...	...	...
2010	5	27	08:00	...	...	...
2010	5	28	08:00	...	...	...
2010	5	29	08:00	...	...	...
2010	5	30	08:00	...	...	...
2010	5	31	08:00	...	...	...
2010	6	1	08:00	...	...	...
2010	6	2	08:00	...	...	...
2010	6	3	08:00	...	...	...
2010	6	4	08:00	...	...	...
2010	6	5	08:00	...	...	...
2010	6	6	08:00	...	...	...
2010	6	7	08:00	...	...	...
2010	6	8	08:00	...	...	...
2010	6	9	08:00	...	...	...
2010	6	10	08:00	...	...	...
2010	6	11	08:00	...	...	...
2010	6	12	08:00	...	...	...
2010	6	13	08:00	...	...	...
2010	6	14	08:00	...	...	...
2010	6	15	08:00	...	...	...
2010	6	16	08:00	...	...	...
2010	6	17	08:00	...	...	...
2010	6	18	08:00	...	...	...
2010	6	19	08:00	...	...	...
2010	6	20	08:00	...	...	...
2010	6	21	08:00	...	...	...
2010	6	22	08:00	...	...	...
2010	6	23	08:00	...	...	...
2010	6	24	08:00	...	...	...
2010	6	25	08:00	...	...	...
2010	6	26	08:00	...	...	...
2010	6	27	08:00	...	...	...
2010	6	28	08:00	...	...	...
2010	6	29	08:00	...	...	...
2010	6	30	08:00	...	...	...
2010	6	30	08:00	...	...	...

ANEXO 3

DATOS EN CAMPO DEL METODO DE LA BOTA

Transecto 1				Transecto 2			
Distancia (m)	Febrero	Julio	Agosto	Distancia (m)	Febrero	Julio	Agosto
Pozo 1				Pozo 10			
2	seco	seco	seco	2	seco	seco	seco
4	seco	seco	seco	4	seco	seco	seco
6	seco	seco	seco	6	seco	seco	seco
8	seco	seco	seco	8	seco	seco	seco
10	seco	seco	seco	10	seco	seco	seco
12	seco	seco	seco	12	seco	seco	seco
14	agua	agua	agua	14	seco	seco	seco
16	seco	agua	agua	16	seco	seco	seco
18	seco	seco	seco	18	seco	seco	seco
20	seco	seco	seco	20	seco	seco	seco
22	seco	agua	agua	22	seco	seco	seco
24	saturado	saturado	saturado	24	saturado	saturado	saturado
26	seco	saturado	seco	26	seco	seco	seco
28	seco	agua	agua	28	seco	seco	seco
30	seco	agua	agua	30	seco	seco	seco
32	agua	agua	agua	32	seco	seco	seco
34	agua	agua	agua	34	seco	seco	seco
36	seco	seco	seco	36	seco	seco	seco
38	seco	seco	seco	38	seco	seco	seco
40	seco	seco	seco	40	seco	seco	seco
42	seco	seco	seco	42	seco	seco	seco
44	seco	saturado	seco	44	seco	seco	seco
46	seco	seco	seco	46	seco	seco	seco
48	seco	seco	seco	48	seco	seco	seco
50	seco	seco	seco	50	seco	seco	seco
52	seco	seco	seco	52	seco	seco	seco
54	seco	seco	seco	54	seco	seco	seco
56	seco	seco	seco	56	seco	seco	seco
58	seco	seco	seco	58	seco	seco	seco
60	agua	agua	agua	60	seco	seco	seco
62	seco	saturado	seco	62	seco	seco	seco
64	seco	seco	seco	64	seco	seco	seco
66	seco	seco	seco	66	seco	seco	seco
68	seco	seco	seco	68	seco	seco	seco
70	seco	seco	seco	70	seco	seco	seco
72	seco	seco	seco	72	seco	agua	seco
74	seco	seco	seco	74	seco	saturado	saturado
76	seco	saturado	saturado	76	saturado	saturado	saturado
78	seco	seco	seco	78	saturado	saturado	saturado
80	seco	seco	seco	80	saturado	saturado	saturado
82	seco	seco	seco	82	saturado	saturado	saturado
84	seco	seco	seco	84	saturado	saturado	saturado
86	seco	seco	seco	86	seco	saturado	saturado
88	seco	seco	seco	88	seco	seco	seco
90	seco	seco	seco	90	seco	seco	seco
92	seco	seco	seco	92	seco	seco	seco
94	seco	saturado	saturado	94	seco	seco	seco
96	seco	seco	seco	96	seco	seco	seco
98	seco	seco	seco	98	seco	seco	seco
100	seco	seco	seco	100	seco	seco	seco
102	seco	seco	seco	102	saturado	agua	agua
104	seco	seco	seco	104	seco	seco	seco
106	seco	seco	seco	106	seco	seco	seco
108	seco	seco	seco	108	seco	seco	seco
110	seco	seco	seco	110	seco	seco	seco
112	seco	seco	seco	112	seco	seco	seco
114	seco	seco	seco	114	seco	seco	seco
116	seco	agua	seco	116	seco	seco	seco
118	seco	seco	seco	118	seco	saturado	saturado
120	agua	agua	agua	120	seco	saturado	saturado
122	seco	seco	seco	122	seco	saturado	saturado
124	seco	seco	seco	124	seco	saturado	saturado
126	seco	seco	seco	126	seco	saturado	saturado
128	seco	seco	seco	128	seco	saturado	saturado
130	seco	seco	seco	130	seco	saturado	saturado
132	seco	seco	seco	132	seco	saturado	saturado
134	seco	saturado	saturado	134	saturado	saturado	saturado
136	seco	agua	agua	136	agua	agua	agua
138	seco	saturado	seco	138	agua	agua	agua
140	saturado	saturado	seco	140	agua	agua	agua
142	saturado	seco	seco	142	saturado	saturado	saturado
144	seco	agua	agua	144	saturado	saturado	saturado
146	seco	seco	seco	146	saturado	saturado	saturado
148	seco	seco	seco	148	saturado	saturado	saturado
150	seco	seco	seco	150	seco	saturado	seco
152	agua	agua	agua	152	seco	saturado	seco
154	seco	seco	seco	154	seco	saturado	seco
156	seco	seco	seco	156	agua	agua	agua
158	seco	seco	seco	158	seco	seco	seco
160	seco	seco	seco	160	seco	seco	seco
162	seco	seco	seco	162	seco	seco	seco
164	seco	seco	seco	164	seco	saturado	seco
166	seco	seco	seco	166	seco	saturado	seco
168	seco	saturado	saturado	168	seco	seco	seco
170	seco	seco	seco	170	seco	seco	seco
172	seco	seco	seco	172	saturado	saturado	saturado
174	agua	agua	agua	174	saturado	saturado	saturado
176	seco	saturado	seco	176	seco	saturado	seco
178	seco	saturado	seco	178	seco	saturado	seco
180	seco	seco	seco	180	seco	seco	seco
182	seco	seco	seco	182	seco	seco	seco
184	seco	saturado	saturado	184	seco	seco	seco
186	seco	saturado	saturado	186	seco	seco	seco
188	seco	seco	seco	188	seco	seco	seco
190	seco	seco	seco	190	seco	seco	seco
192	seco	seco	seco	192	seco	seco	seco
Pozo 4				Pozo 13			

ANEXO 4

TABLAS OBTENIDAS DEL ANALISIS CON PÍXELES Y ÁREAS.

Tablas NDVI

Clase	Pixeles en Febrero	Porcentaje de Pixeles (%)	Área (m2)
1	12841120	32,99	74122,95
2	10559003	27,13	60949,86
3	7507146	19,29	43333,59
4	4593417	11,80	26514,64
5	3421598	8,79	19750,53
Total	38922284	100	224671,57

Clase	Pixeles en Julio	Porcentaje de Pixeles (%)	Área (m2)
1	16387750	44,97	101023,72
2	9607443	26,36	59225,92
3	5591239	15,34	34467,68
4	2884087	7,91	17779,21
5	1974996	5,42	12175,04
Total	36445515	100	224671,57

Clase	Pixeles en Agosto	Porcentaje de Pixeles (%)	Área (m2)
1	14454284	39,93	89717,99
2	10572787	29,21	65625,47
3	6170198	17,05	38298,53
4	3019847	8,34	18744,24
5	1979266	5,47	12285,34
Total	36196382	100	224671,57

Tablas NDWI

Clase	Pixeles en Febrero	Porcentaje de Pixeles (%)	Área (m2)
1	1061566	2,73	6128,50
2	19137370	49,17	110481,52
3	6733600	17,30	38873,59
4	11984589	30,80	69187,96
Total	38917125	100	224671,57

Clase	Pixeles en Julio	Porcentaje de Pixeles (%)	Área (m2)
1	15483309	42,48	95448,16
2	15249622	41,84	94007,58
3	2467243	6,77	15209,53
4	3245362	8,90	20006,31
Total	36445536	100	224671,57

Clase	Pixeles en Agosto	Porcentaje de Pixeles (%)	Área (m2)
1	5714024	15,79	35467,05
2	20630266	57,00	128052,45
3	4542422	12,55	28194,90
4	5309661	14,67	32957,17
Total	36196373	100	224671,57

Niveles Piezómetros de nivel freático

Clase	Píxeles en Febrero	Porcentaje de Píxeles (%)	Área (m ²)
1	5031239	13,02	29259,15
2	8028503	20,78	46689,72
3	11832173	30,63	68809,94
4	6255466	16,19	36378,63
5	7485885	19,38	43534,13
Total	38633266	100	224671,57

Clase	Píxeles en Julio	Porcentaje de Píxeles (%)	Área (m ²)
1	5804012	15,02	33753,20
2	14287705	36,98	83090,08
3	8126938	21,04	47262,17
4	3659294	9,47	21280,61
5	6755317	17,49	39285,51
Total	38633266	100	224671,57

Clase	Píxeles en Agosto	Porcentaje de Píxeles (%)	Área (m ²)
1	5445599	14,10	31668,85
2	13261882	34,33	77124,41
3	9181000	23,76	53392,06
4	3940877	10,20	22918,15
5	6803908	17,61	39568,09
Total	38633266	100	224671,57