

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**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).**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

KEVIN ALEJANDRO PALMA CASTRO

kevin.palma@epn.edu.ec

Director: Ph.D. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS

xavier.zapata@epn.edu.ec

Codirector: Ph.D. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES

esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, Julio 2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Kevin Alejandro Palma Castro, 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.

KEVIN ALEJANDRO PALMA CASTRO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Kevin Alejandro Palma Castro, bajo nuestra supervisión.

Dr. Xavier Zapata Ríos

DIRECTOR

Dr. Esteban Valencia Torres

CODIRECTOR

DEDICATORIA

A mi madre Rosario y a mi padre Neisser,

A mis hermanos,

Y a mi abuelita Juanita,

Quien hubiera querido ver este logro culminado antes

Lo dedico con mucho amor a quien siempre será MAMÁ.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida, por la oportunidad de poder cumplir las metas que me he trazado. A toda mi familia por el apoyo constante, por los consejos brindados, porque ellos cada día han sabido encaminarme a todos los proyectos que he realizado. A mi madre, mi reina Charo, que herede la persistencia y terquedad para seguir adelante. A mi padre, mi gordo Neisser, sus palabras y consejos me han convertido en quien soy hoy. Mis hermanos, Nei y David, que sus locuras y bromas nunca me dejaron solo. Mis primas, Pame, Tefa, Sherlyn y Brandon, por los abrazos y aventuras juntos. Mis tías y tíos: Vero, Nancy, Elsa, Pepe y Humberto, por jalarme las orejas y apoyarme siempre.

A mis directores Xavier Zapata Ríos y Esteban Valencia, que con paciencia y sabiduría supieron guiarme en mis ideales; sus correcciones, opiniones y diferentes puntos de vista enriquecieron enormemente el desarrollo del presente proyecto. Todo su apoyo académico e individual me han brindado una nueva perspectiva tanto en mi vida profesional como personal.

Al FONAG por la información proporcionada, fundamental para la elaboración del trabajo. De igual manera, a todos mis amigos y compañeros del GI-ATA que sin su ayuda y conocimientos hubiera sido imposible completar los mapeos.

A todos mis amigos más cercanos Daniel, Darwin, Randy, Christian, Erick, Manny, Pancho, Isra, Ali, Ari, Ricky, Alejo, Sofi, Barry, Issac, Gaby, Joel, Meli, Pauli, Vivi, Rommel, Karla, Sebas, Bryan, los OneD's, a todos los miembros del HCCH y muchos más que me faltarían hojas para poder nombrarlos. Gracias por siempre confiar en mí.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE ANEXOS	XV
SIGLAS	XVI
RESUMEN	XVII
<i>ABSTRACT</i>	XVIII
PRESENTACIÓN	XIX
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVO GENERAL	5
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.5. HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1. MARCO TEÓRICO.....	6
2.2. ESTADO DEL ARTE	27
CAPÍTULO III	31
METODOLOGÍA.....	31
3.1. PREPARACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS.....	31
3.2. ESTUDIO DE VARIABLES CLIMÁTICAS	34
3.3. MISIÓN DE VUELO EN EL SOFTWARE “MISSION PLANNER”	39
3.5. MEDICIÓN DE NIVEL FREÁTICO.....	44
3.6. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS PREVIO AL VUELO.....	46
3.7. TOMA DE IMÁGENES.....	46

3.8. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN SOFTWARE PIX4D	48
3.9. CALCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.....	54
CAPÍTULO IV	58
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1. MAPA A COLOR VERDADERO	58
4.2. MAPAS DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS	60
4.3. MAPAS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	75
4.4. MAPAS DE ÍNDICES DE AGUA	107
4.5. METODOLOGÍA DE MONITOREO EN REGIONES ANDINAS.....	130
CAPÍTULO V	133
RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	133
5.1. RESUMEN	133
5.2. CONCLUSIONES.....	136
5.3. TRABAJOS FUTUROS	139
REFERENCIAS.....	140
ANEXOS	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ubicación de la zona de estudio	6
Figura 2 - Diques de madera instalados en el humedal Pugllohuma	7
Figura 3 – Piezómetros instalados en el humedal Pugllohuma	7
Figura 4 – Onda electromagnética sus campos y longitud de onda	9
Figura 5 – Espectro electromagnético proveniente del sol, ventanas atmosféricas y aplicaciones de las longitudes de onda.....	9
Figura 6 – Bandas espectrales de la cámara multiespectral Micasense RedEdge – MX.....	10
Figura 7 – Firma espectral típica de la vegetación saludable.....	11
Figura 8 – Firmas espectrales de la vegetación saludable, no saludable y suelo.....	12
Figura 9 – Firma espectral para el agua pura.....	13
Figura 10 – Firmas espectrales de agua limpia y turbia	13
Figura 11 – Firmas espectrales del agua a diferentes concentración de sólidos totales.....	14
Figura 12 – Firmas espectrales comunes de vegetación (saludable) y de agua (clara)	14
Figura 13 – Ejemplo de NDVI para vegetación saludable y no saludable	16
Figura 14 – Esquema de componentes UAS	18
Figura 15 – Clasificación de drones considerando su peso y envergadura	20
Figura 16 – Enlaces mediante el sistema de comunicación.....	21
Figura 17 – UAV de ala fija Event386	32
Figura 18 – Cámara Multiespectral Micasense RedEdge - MX.....	33
Figura 19 – Estación de tierra y sistema de comunicación utilizados en campo.....	34

Figura 20 – Rosa de vientos para el año 2018 de la estación M-5126 Jatunhuayco.....	38
Figura 21 – Distribución de la frecuencia de vientos para el 2018 de la estación M-5126 Jatunhuayco.....	39
Figura 22 – Ejemplo de misión de vuelo en el software “ <i>Mission Planner</i> ”	40
Figura 23 – Reconocimiento del humedal y sus zonas afectadas (31-01-2019).....	40
Figura 24 – Charcos cubiertos por agua o por vegetación.....	41
Figura 25 – Reconocimiento de tipo vegetación del humedal	42
Figura 26 – Reconocimiento de vegetación y parcela.....	43
Figura 27 – Toma panorámica del humedal del día de la toma de datos (07/11/2019)	44
Figura 28 – Medición de los piezómetros y extracción del agua	45
Figura 29 – Calibración previo al vuelo dron Event386	46
Figura 30 – Lanzamiento manual del dron Event386 para su despegue	47
Figura 31 – Captura de pantalla de software Mission Planner en el sobrevuelo del dron	47
Figura 32 – Configuraciones para la alineación de fotos.....	48
Figura 33 – Puntos de amarre generados en la alineación inicial	48
Figura 34 - Configuraciones empleadas en el procesamiento de la nube de puntos.....	49
Figura 35 – Configuraciones empleadas en el procesamiento del DSM y ortomosaicos	50
Figura 36 – Calibración de imágenes en la pestaña <i>Index Calculator</i>	51
Figura 37 – Panel de reflectancia Micasense RedEdge- MX e instrucciones de uso.....	52
Figura 38 – Mapas de reflectancia (5 bandas) y DSM	53

Figura 39 – Ortomosaico RGB obtenido a través del software Agisoft Metashape.....	54
Figura 40 – Ortomosaico RGB obtenido a través del software Pix4D	54
Figura 41 – Mapa RGB del humedal tomada por el FONAG	55
Figura 42 – Corrección de la geolocalización de los productos obtenidos	56
Figura 43 – Ejemplo de corte de raster por medio de la herramienta “Clip Raster”	56
Figura 44 – Resultado del cálculo de NDWI con “Raster Calculator”	57
Figura 45 – Mapa RGB del humedal Pugllohuma	59
Figura 46 – Mapa DSM del humedal Pugllohuma	61
Figura 47 – Mapa de pendientes del humedal Pugllohuma	62
Figura 48 – Mapa de orientación del terreno del humedal Pugllohuma	64
Figura 49 – Mapa de curvas de nivel del humedal Pugllohuma	65
Figura 50 – Curvatura del terreno del humedal Pugllohuma	67
Figura 51 – Ajuste de geolocalización de piezómetro 2	68
Figura 52 – Corrección de localización de los piezómetros	69
Figura 53 – Delimitación zona de estudio y ubicación de piezómetros	71
Figura 54 – Comparación de métodos de interpolación para generación de nivel freático.....	72
Figura 55 – Clasificación de zonas de acumulación.....	73
Figura 56 – Modelo 3D del humedal Pugllohuma y la zona de acumulación de agua	74
Figura 57 – Mapa e histograma de pixeles NDVI	77
Figura 58 – Métodos de visualización de datos para el mapa.....	78
Figura 59 – Mapa NDVI por rangos del humedal Pugllohuma	79
Figura 60 – Mapa GCI por rangos del humedal Pugllohuma	82
Figura 61 – Mapa NDRE por rangos del humedal Pugllohuma.....	84
Figura 62 – Mapa GNDVI por rangos del humedal Pugllohuma.....	86

Figura 63 – Mapa de cobertura suelo del humedal Pugllohuma	88
Figura 64 – Recorte de índices espectrales de vegetación por tipo de cobertura	90
Figura 65 – Valores NDVI por tipo de cobertura.....	92
Figura 66 - Valores GCI por tipo de cobertura.....	92
Figura 67 - Valores NDRE por tipo de cobertura.....	93
Figura 68 - Valores GNDVI por tipo de cobertura.....	93
Figura 69 – Comparación de índices de vegetación sin ajuste para el humedal Pugllohuma.....	95
Figura 70 - Comparación de detalles específicos de índices de vegetación y mapa RGB.....	97
Figura 71 – Área de vegetación en buen estado por índice espectral.....	98
Figura 72 – Mapa RGB con Transectos de vegetación.....	100
Figura 73 – Riqueza, abundancia, diversidad y dominancia por transecto de vegetación	102
Figura 74 – Desviación estándar de NDVI vs abundancia, riqueza, diversidad y dominancia	104
Figura 75 – Promedio de NDVI vs abundancia, riqueza, diversidad y dominancia.....	105
Figura 76 – Promedio y desviación estándar de los índices de vegetación por transecto	106
Figura 77 – Charcos del humedal Pugllohuma en época seca y lluviosa.....	108
Figura 78 – Mapa NDWI por rangos del humedal Pugllohuma	110
Figura 79 – Mapa $\left(\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}\right)$ por rangos del humedal Pugllohuma.....	112
Figura 80 - Mapa $\left(\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}\right)$ por rangos del humedal Pugllohuma	114
Figura 81 - Mapa $\left(\frac{-\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}\right)$ por rangos del humedal Pugllohuma	116
Figura 82 – Mapa por zonas del humedal Pugllohuma	118

Figura 83 - Valores NDWI por tipo de cobertura	120
Figura 84 - Valores $\left(\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}\right)$ por tipo de cobertura.....	120
Figura 85 - Valores $\left(\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}\right)$ por tipo de cobertura.....	121
Figura 86 - Valores $\left(\frac{-\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}\right)$ por tipo de cobertura	121
Figura 87 - Comparación de índices de agua sin ajustes para el humedal Pugllohuma.....	123
Figura 88 – Comparación de detalles específicos de índices de agua y mapa RGB.....	124
Figura 89- Agua superficial del humedal Pugllohuma por índice espectral	125
Figura 90 – Intersección índice de agua y zona de saturación.....	127
Figura 91 – Mapa de saturación de agua del humedal Pugllohuma.....	128
Figura 92 – Modelo 3D del humedal Pugllohuma y las áreas de saturación de agua.....	129
Figura 93 – Análisis de la parcela piloto de restauración por índices espectrales.....	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Clasificación de drones por su peso propuesto por (Brooke-Holland, 2013).	19
Tabla 2 – Clasificación de UAV propuesto por (Gupta et al., 2019)	20
Tabla 3 – Tabla comparativa de drones de ala fija comerciales.....	22
Tabla 4 - Cuadro comparativo entre cámaras multiespectrales	24
Tabla 5 – Recopilación bibliográfica.....	28
Tabla 6 – Características básicas del dron de ala fija Event386	31
Tabla 7 – Características básicas de la cámara Micasense RedEdge - MX.....	33
Tabla 8 – Variables climáticas de la zona de estudio.....	36
Tabla 9 – Parámetros del estudio del viento por medio del programa “WRPLOT View”	37
Tabla 10 – Anotaciones tomadas en los piezómetros del humedal Pugllohuma.....	45
Tabla 11 – Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa NDVI.....	80
Tabla 12 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa GCI.....	83
Tabla 13 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa NDRE	85
Tabla 14 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa GNDVI.....	87
Tabla 15 – Tipos de vegetación en el humedal Pugllohuma y su cobertura de área	89
Tabla 16 – Valores medios y desviación estándar de los índices de vegetación por tipo de cobertura	91
Tabla 17 – Valores obtenidos en los transectos de vegetación en campo.....	101
Tabla 18 – Valores promedio y desviación estándar de índices espectrales de vegetación por transecto de vegetación	103
Tabla 19 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa NDWI	111

Tabla 20 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura	
mapa $\left(\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}\right)$	113
Tabla 21 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura	
mapa $\left(\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}\right)$	115
Tabla 22 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura	
mapa $\left(\frac{-\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}\right)$	117
Tabla 23 – Valores de índices espectrales de agua por tipos de cobertura	119
Tabla 24 – Porcentajes de intersección entre vegetación húmeda, cuerpos de agua y zonas de alta acumulación de agua.....	126

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Opciones de configuración para el procesamiento de imágenes en el software Pix4D	150
Anexo 2 – Ubicación piezómetros y datos medidos del nivel freático	155
Anexo 3 – Mapas de índices espectrales sin ajuste por rangos, con sus respectivos histogramas de pixeles.....	156

SIGLAS

ACHA	Área de conservación hídrica Antisana
UAV	Aeronave no tripulada
MAE	Ministerio del ambiente Ecuador
GI-ATA	Grupo de Investigación Aerodynamics and Thermofluids Applied
UAS	Sistemas autónomos no tripulados
FONAG	Fondo para la protección del agua
NDVI	Índice normalizado de diferencia de vegetación
GCI	Índice de clorofila verde
NDRE	Índice normalizado de borde rojo
NDWI	Índice normalizado de diferencia de agua
MNDWI	Índice normalizado de diferencia de agua modificado
GNDVI	Índice normalizado verde de diferencia de vegetación
GCS	Ground control Station
NIR	Infrarrojo cercano
FAA	Administración federal de aviación
INAMHI	Instituto nacional de meteorología e hidrología
DSM	Modelo digital de superficie
DTM	Modelo digital de terreno
DLS	Sensor de luz descendente
GIS	Sistema de información geográfica
GSD	Ground Sample Distance
DEM	Modelo digital de elevación
IDW	Inverse distance weighted
SIG	Sistema de información geográfica

RESUMEN

La expansión de la frontera agrícola y el cambio climático han disminuido los humedales aceleradamente, siendo Suramérica la segunda región con mayor pérdida de estos ecosistemas. Entre ellos, los humedales altoandinos, cuales constituyen un componente fundamental en el abastecimiento de agua para muchas ciudades de la región. Para Quito, los páramos andinos representan el 85% de abastecimiento de agua. En este contexto, el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) ha implementado varias medidas de restauración en humedales altoandinos alterados dentro del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA). Sin embargo, es necesario una metodología para la evaluación continua de las medidas de restauración implementadas. Por lo cual, el presente estudio propone una metodología de monitoreo por medio de imágenes multiespectrales tomadas desde un dron de ala fija para la evaluación del estado de los humedales altoandinos. En este sentido, el humedal Pugllohuma, perteneciente al ACHA, fue seleccionado como zona piloto para el desarrollo del proyecto. La metodología se basa en el análisis de índices espectrales de vegetación y agua en conjunto con mapas topográficos y datos en campo. Los resultados obtenidos de los índices de vegetación (NDVI, GCI, NDRE y GNDVI) se evalúan por tipo de vegetación y en tres transectos de vegetación. Concluyendo, los índices NDVI y GCI definen con mayor exactitud las zonas de transición del humedal y el estado de la vegetación, estableciendo una superficie con alta densidad vegetativa de 130 005 m² y un área con alto contenido de clorofila de 62 340 m². Por otra parte, los cuerpos de agua y humedad de la vegetación se evaluaron a partir de tres índices espectrales establecidos en el presente proyecto y el índice NDWI; siendo el índice propuesto de $\left(\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}\right)$ cual diferencia con mayor exactitud las masas de agua dentro del humedal y obteniendo una área de aguas superficiales de 3 226 m². Además, se estableció una zona de saturación de agua en el humedal del 18.31% a partir del nivel freático, mapas topográficos e índices espectrales de agua.

Palabras clave: Índices espectrales, Zona de saturación, Nivel freático, Contenido de clorofila, ACHA, Humedales.

ABSTRACT

The agricultural frontier expansion and climate change, have decreased at an accelerated rate the wetlands, being South America the second region with the greatest loss of these ecosystems. Among them, the high Andean wetlands, the main source of water supply for many cities in the region. Regarding Quito, the Andean paramos provide 85% of the water supply. In this context, the Water Protection Fund (FONAG) has implemented several restoration measures in altered high Andean wetlands within the Antisana Water Conservation Area (ACHA). Nevertheless, is necessary a methodology for the continuous assessment of the restoration measures implemented. Therefore, the present study proposes a monitoring methodology through multispectral images taken from a fixed-wing drone to assess the state of high Andean wetlands. In this sense, Pugllohuma wetland, belonging to ACHA, was selected as pilot zone for the development of the project. The methodology is based on the comparative analysis of spectral indices of vegetation and water together with topographic maps and field data. The results obtained from the vegetation indices (NDVI, GCI, NDRE and GNDVI) are evaluated by vegetation type and in three vegetation transects established by FONAG. Concluding that NDVI and GCI indices define more accurately the transition zones of the wetland and the vegetation condition, establishing a high vegetative density surface of 130 005 m² and a high content chlorophyll surface of 62 340 m². On the other hand, for the characterization of the water bodies and vegetation moisture is performed by the assessment of three spectral indices established in the present project and the water index, NDWI; concluding that the proposed index $\left(\frac{Blue - RedEdge}{Blue + RedEdge}\right)$ differentiates with higher accuracy the water masses inside the wetland, obtaining a water surface area of 3 226 m². Moreover, it was established a water saturation zone for Pugllohuma wetland of 18.31% from field data of the phreatic level, topographic maps analysis and the assessment of spectral indices of water.

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

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de titulación desarrolla una metodología para la caracterización y evaluación del humedal Pugllahoma, mediante el análisis comparativo de índices espectrales, mapas topográficos y datos medidos en campo. Las imágenes utilizadas para el trabajo fueron captadas a partir de un dron comercial de ala fija incorporado con un sensor multiespectral. La tesis se divide en cinco capítulos modulares que abarcan desde la introducción hasta trabajos futuros.

Capítulo I, introduce los planteamientos del trabajo, antecedentes, justificación, objetivos e hipótesis.

Capítulo II, presenta el marco teórico, donde se recopila información referente a la zona de estudio, técnicas de teledetección y sistemas aéreos no tripulados. Adicionalmente, se resume el estado de arte de la literatura revisada para el presente proyecto.

Capítulo III, describe a detalle la metodología desarrollada desde los requerimientos previos a la toma de imágenes, equipos utilizados y procesamiento de imágenes para la obtención de los mapas de reflectancia y DSM.

Capítulo IV, muestra los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes y se generan los diversos mapas temáticos a partir de los 5 mapas de reflectancia y el DSM del humedal. De igual manera, se detallan los análisis efectuados con los datos medidos en campo y la comparación con los resultados expuestos. Además, se presenta la metodología acoplada para el uso de drones de ala fija con sensores multiespectrales para tareas de monitoreo en la región andina.

Capítulo V, resume brevemente los principales hallazgos y conclusiones obtenidas; como también los trabajos a futuro a seguir del presente proyecto.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En los últimos años se ha estimado una gran pérdida de humedales a nivel global, siendo Suramérica la segunda región más afectada con una pérdida del 32% de estos ecosistemas (Hu, Niu, Chen, Li, & Zhang, 2017). Dentro de los humedales de la región suramericana se encuentran los humedales altoandinos, los cuales se sitúan a lo largo de los Andes en los ecosistemas páramo, jalca y puna (WWF, 2005). A pesar que, organismos internacionales como la Convención Ramsar a partir del 2002 catalogó a los humedales altoandinos como ecosistemas estratégicos para la región (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2002), estos ecosistemas aún se encuentran bajo una gran amenaza y vulnerabilidad debido a dos variables preponderantes: la expansión de la frontera agrícola y el cambio climático (Orúe, Laterra, & Cabria, 2007).

En este contexto, varios modelos climáticos predicen que la tasa de calentamiento en la parte baja de la tropósfera aumentará con la altura, en otras palabras, la temperatura aumentará más en las altas montañas que en bajas elevaciones (Bradley, Vuille, Diaz, & Vergara, 2006), lo cual resultaría en un incremento significativo de la temperatura en montañas de Ecuador, Perú, Bolivia y el norte de Chile (Vuille, Bradley, Werner, & Keimig, 2003). Este incremento afectará directamente a los Andes tropicales y sus diversos ecosistemas incluyendo a los humedales altoandinos; generando potenciales consecuencias negativas respecto al abastecimiento de agua para millones de habitantes (Coudrain, Francou, & Kundzewicz, 2005). Por ejemplo, los humedales altoandinos y el páramo representan la mayor fuente de abastecimiento de agua potable de varias ciudades andinas como Bogotá, Lima, Quito, Sucre, Mérida, San Cristóbal, Medellín, Cali, Cuenca, Trujillo, Arequipa, Cusco, El Alto, Arica, Iquique, Antofagasta, La Paz y Cochabamba (Gobierno-Ecuador, Gobierno-Chile, CONDESAN, & TNC-Chile, 2008). En particular, para el caso de la ciudad de Quito, el 85% del abastecimiento de agua proviene del páramo (ecosistema de alta montaña), específicamente de tres puntos: la reserva Cayambe- Coca del río Cunuyacta a 3900

m.s.n.m, la laguna Micacocha a 3900 m.s.n.m. que se alimenta de las pendientes del volcán Antisana y del río Pita a 3200 m.s.n.m proveniente de los volcanes Cotopaxi y Sincholagua (Buytaert et al., 2006).

A pesar de la importancia económica, cultural y ambiental que representan los humedales altoandinos, aún no existe una metodología estándar para el monitoreo de las zonas de protección hídrica en la capital o a nivel nacional; con la excepción del “Mapa interactivo ambiental” (<http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>) del Ministerio del Ambiente Ecuador (MAE), que provee una información general de años pasados sobre la localización y extensión de manglares, lagunas, sitios RAMSAR y demás áreas de interés. No obstante, el mapa interactivo ambiental no posee un registro histórico de los humedales o complejos de humedales que se encuentran a lo largo del ecosistema páramo. Aún más, los mapas presentados por medio de la plataforma del MAE no presentan una periodicidad anual y su resolución espacial es muy gruesa. Por lo cual, no se cuenta con un registro o información actual sobre la condición de los humedales altoandinos que abastecen a la capital.

En este sentido, el Grupo de Investigación Aerodynamics and Thermofluids Applied (GI-ATA) perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional desarrolló una metodología y plataforma de información para la implementación de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de ala fija como herramienta de monitoreo de zonas de protección hídrica en el proyecto institucional CEPRA-XII-2018-12. Como zona piloto de estudio se seleccionó al Humedal Pugllohuma, ubicado dentro del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), debido a su proximidad e importancia al ser uno de los humedales que abastece a la capital. En dicho proyecto, se usó un dron de alas fijas comercial implementado con una cámara RGB y la información obtenida se procesó mediante algoritmos propios del GI-ATA. Como resultado se generaron ortomosaicos y realizaron varios mapas temáticos en donde se verificó las áreas de mayor y menor humedad a partir de un modelo de color HSV el cual se basa en la segmentación de imágenes por su matiz, saturación y valor. No obstante, el modelo de segmentación de imágenes por inspección visual implementado no consideró el estado y tipo de vegetación, la estacionalidad, grado de

luminosidad, saturación de agua en el humedal y demás variables físicas presentes en la zona de estudio.

Por tal motivo, el presente proyecto de titulación plantea la evaluación integral del humedal Pugllohuma mediante la implementación de índices espectrales. Los índices espectrales son relaciones y/o combinaciones de dos o más bandas para resaltar espectralmente características de la imagen permitiendo visualizar determinadas variables biofísicas del terreno (Gómez Nieto & Martín, 2008). Adicionalmente, los índices espectrales son catalogados como una herramienta adecuada en el análisis de imágenes debido a su versatilidad en diversas aplicaciones y gran número de combinaciones e índices normalizados que existen (Blackburn, 1998; Watts, Ambrosia, & Hinkley, 2012; Chuvieco E., Martin, M.P., 2010).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Existen tres tipos de metodologías puntuales para evaluar, clasificar y verificar el estado de los humedales mediante imágenes aéreas: plataformas satelitales (Guo, Li, Sheng, Xu, & Wu, 2017), aeronaves civiles y sistemas autónomos no tripulados (UAS) (Jiménez López & Mulero-Pázmány, 2019). Las plataformas satelitales cubren grandes extensiones de terreno, no obstante, la información recopilada de sensores pasivos es limitada por el porcentaje de cobertura de nubes, al igual que, sus estudios temporales están condicionados por los períodos de visita del satélite. Por otra parte, los satélites con sensores activos como el radar, no se limitan en la obtención de sus imágenes por la cobertura de nubes. Sin embargo, la resolución de los sensores de plataformas de acceso libre es regularmente baja e inhabilita identificar problemas puntuales dentro de los ecosistemas (Nex & Remondino, 2014). Por otra parte, las aeronaves civiles presentan altos costos operativos, y una compleja configuración de la aeronave previo a la tarea de monitoreo (Diaz et al., 2010). Mientras, los UAS tienen la ventaja de recopilar datos con alta resolución espacial (centímetros por pixel), alta periodicidad temporal y menor costo operativo (Hunt, Cavigelli, Daughtry, McMurtrey, & Walthall, 2005), realizando las modificaciones o alteraciones de los humedales (Green, Hagon, Gómez, & Gregory, 2019). Además, el uso de UAS y técnicas de fotogrametría han

demostrado mejorar de manera significativa la evaluación integral de la hidrología superficial de los humedales (Boon & Tesfamichael, 2017a).

Cabe indicar dentro de los UAVs existen dos tipos de configuraciones: drones multicópteros (provistos de 3 o más propelas) y drones de ala fija. Debido al acondicionamiento aerodinámico de los modelos de ala fija, éstos presentan un mayor beneficio respecto al aprovechamiento de la fuerza de sustentación, reduciendo el consumo energético y aumentando la capacidad de carga útil y tiempo de vuelo (Boon, Drijfhout, & Tesfamichael, 2017). Por lo cual se optó el uso de un dron de ala fija considerando que se obtendrán mayores tiempos de vuelo y en consecuencia una mayor área de monitoreo.

La implementación de aeronaves no tripuladas de ala fija para el cálculo de índices espectrales han presentado resultados precisos y detallados en la evaluación del estado hidrológico y de la vegetación de los humedales (Boon, Greenfield, & Tesfamichael, 2016; Boon & Tesfamichael, 2017b). Por lo cual, en el presente estudio se propone un estudio comparativo en el humedal Pugllohuma entre los índices espectrales: índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI), índice de clorofila verde (GCI), índice normalizado de borde rojo (NDRE), índice normalizado de diferencia de vegetación verde (GNDVI) e índice normalizado de diferencia de agua (NDWI). Con el fin de verificar cuales índices espectrales presentan mejores resultados en la evaluación del estado del humedal.

Para poder obtener un análisis integral, la información obtenida a partir de los índices espectrales se debe comparar con mediciones en campo respecto a la condición de la vegetación y al nivel freático obtenido el día del sobrevuelo. En este sentido, la zona de estudio (humedal Pugllohuma) cuenta con información sobre el tipo de vegetación y la variabilidad del nivel freático. La información recolectada servirá como línea base para establecer el estado del humedal Pugllohuma y brindar una metodología para el monitoreo de humedales altoandinos por medio de imágenes multispectrales tomadas desde un UAV. De igual manera, el presente estudio brindará otros análisis con mayor detalle sobre la condición del humedal Pugllohuma, la misma que podría ser utilizada por el GI-ATA en la segunda fase del proyecto CEPRA y por el FONAG como una nueva metodología base para el monitoreo de humedales por medio de

imágenes multiespectrales. Cabe mencionar, que la información obtenida será cargada a la plataforma de información digital “HUMEGIS” (<https://hidrologia.cedia.org.ec/sitio>) desarrollada en el proyecto CEPRA-XII-2018-12 para que estudiantes, investigadores, tomadores de decisiones y público en general hagan uso de ella.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el 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).

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las variables topográficas del humedal Pugllohuma para su caracterización hidrogeológica.
- Evaluar cualitativa y cuantitativamente las coberturas obtenidas del análisis de índices espectrales de vegetación y agua.
- Comparar los mapas temáticos obtenidos de la evaluación de índices espectrales versus datos obtenidos en campo.
- Adaptar la metodología de monitoreo desarrollada en el proyecto CEPRA-XII-2018-12 para la implementación de imágenes multiespectrales.

1.5. HIPÓTESIS

El cálculo de los índices espectrales: NDVI, GCI, NDRE, GNDVI y NDWI, obtenidos de imágenes capturadas desde un UAV permiten el análisis integral del estado del humedal altoandino Pugllohuma, perteneciente al Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio seleccionada fue el humedal Pugllohuma, ubicado a 43 kilómetros sur-este de Quito, dentro del ACHA perteneciente al FONAG (Figura 1). El humedal se encuentra en el páramo altoandino sobre los 4000 m.s.n.m. y cubre una extensión aproximada de 15 hectáreas (Valencia, Palma, et al., 2020). El humedal Pugllohuma ha sido fuente de varias investigaciones, debido a que alimenta al sistema de abastecimiento de agua para Quito, Mica Sur. Años atrás el humedal fue propiedad de hacendados privados, que se dedicaban a la crianza de ganado. Por lo cual trazaron drenajes artificiales para poder drenar el agua del humedal y así ampliar el área de pastoreo en la zona.

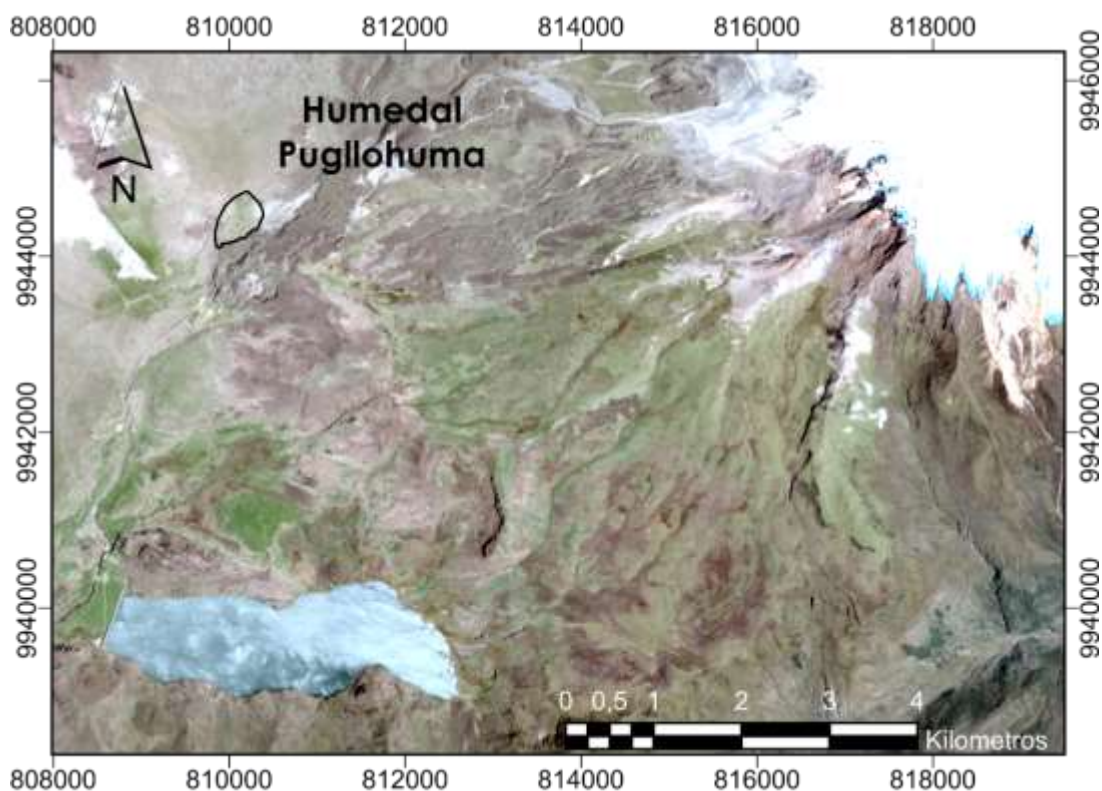


Figura 1 – Ubicación de la zona de estudio

Modificado de: (Valencia, Changoluisa, Palma, Ayala, & Cruz, 2020)

Por lo cual, el FONAG adquirió los terrenos del humedal, y desde entonces ha aplicado varias medidas con el fin de restaurar su ecosistema original. Como primera medida correctiva en el 2017, se instaló varios diques de madera en los drenajes artificiales (Figura 2), con el objetivo de alargar los tiempos de retención e infiltración del agua dentro del humedal (FONAG, 2017). Además, colocaron 18 piezómetros para el monitoreo periódico (15 días) por parte del personal técnico del FONAG, midiendo la profundidad del agua bajo la superficie, conductividad, pH y temperatura. De los 18 piezómetros, 2 piezómetros (#6 y #10) poseen equipos de medición automáticos que verifican la altura del nivel de agua cada cinco minutos, lo cual provee al FONAG información adicional sobre la intensidad en que pueden llenarse los pozos (Figura 3).



Figura 2 - Diques de madera instalados en el humedal Puglllohuma

Elaboración: propia



Figura 3 – Piezómetros instalados en el humedal Puglllohuma

Elaboración: propia

2.1.2. Teledetección

Se entiende como teledetección a técnicas y procedimientos para obtener información de un medio a partir de imágenes en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético por medio de sensores instalados en plataformas de satélite o aerotransportados (aeronaves tripuladas y aeronaves no tripuladas) (European Space Agency, 2009).

2.1.3. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga en ondas eléctricas y magnéticas (Figura 4) en paquetes de energía conocidos como fotones; existe un espectro electromagnético con variables longitudes de onda y frecuencia lo cual brinda diferentes características a la radiación a lo largo del espectro (Elliott, Nabavizadeh, Seung, Hansen, & Holland, 2018).

2.1.3.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético describe todos los tipos de radiaciones electromagnéticas, incluyendo las radiaciones electromagnéticas que el ojo humano no puede ver como: ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, rayos ultravioletas, rayos-X y rayos Gamma. Toda radiación electromagnética viaja a través del espacio a la velocidad de la luz (300 000 km/s) (Hubblesite, 2019). El espectro electromagnético se divide en función a la longitud de la onda de la radiación, entre más pequeña la longitud de onda lleva mayor energía y posee mayor frecuencia (e.g. rayos gamma), y mientras más grande sea la longitud de onda menor energía poseerá y menor frecuencia tendrá (e.g. ondas de radio) (ScienceAtNASA, 2010).

El sol emite energía en todo el espectro electromagnético y bombardea continuamente a la tierra. Sin embargo, gran parte de la radiación es reflejada o absorbida por varios gases (vapor de agua, dióxido de carbono y ozono) en la atmósfera terrestre, otra radiación como la del espectro visible atraviesan a lo largo de la atmósfera. Estas regiones del espectro con longitudes de onda que pueden pasar a través de la atmósfera se las conoce como “ventanas atmosféricas” (Figura 5); algunas microondas incluso pueden traspasar las nubes, lo cual las convierte en las mejores longitudes de onda para transmitir señales de comunicación satelital (National Aeronautics and Space Administration, 2010b).

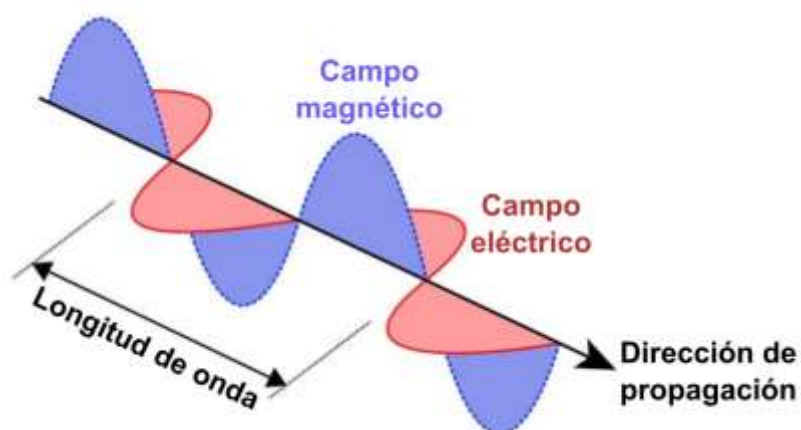


Figura 4 – Onda electromagnética sus campos y longitud de onda

Modificado de (Verhoeven & Archaeology, 2018)

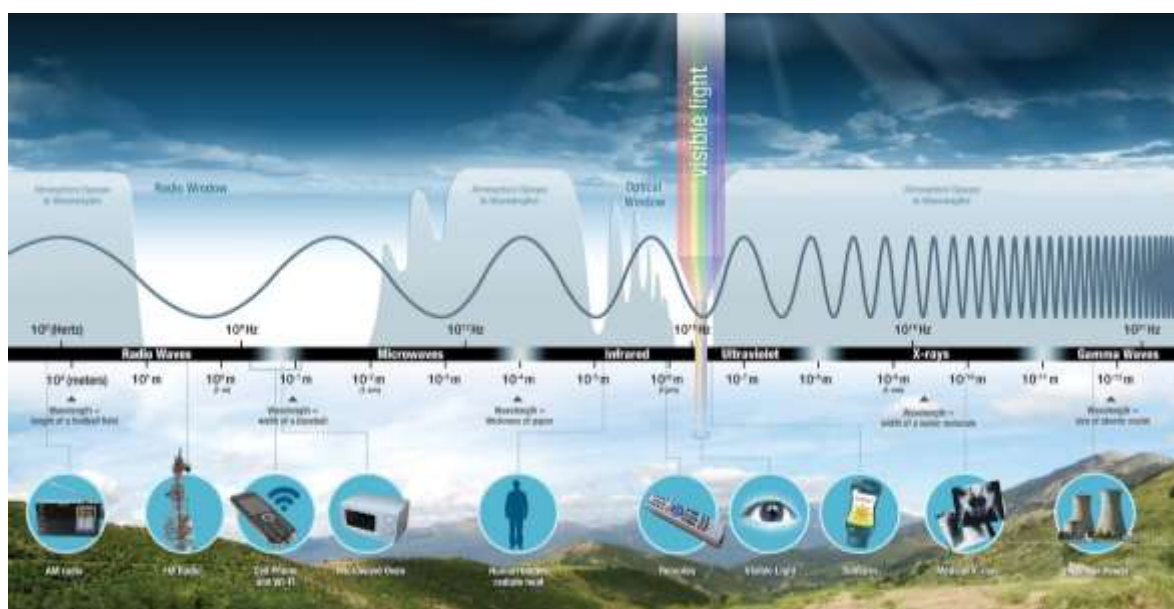


Figura 5 – Espectro electromagnético proveniente del sol, ventanas atmosféricas y aplicaciones de las longitudes de onda.

Elaboración: (National Aeronautics and Space Administration, 2010a)

2.1.4. Firmas espectrales

La radiación proveniente del sol que llega a la superficie de la tierra o a un objeto puede reflejarse y se reenvía al espacio (reflectividad o albedo), puede absorberse y pasa a incrementar la energía del objeto (absortividad) o puede transmitirse hacia a otros objetos (transmisividad). La proporción de cada uno de estos tres procesos depende de la longitud de onda y características de los objetos. En este sentido, cada elemento

de la naturaleza posee una respuesta espectral propia en diferentes longitudes de onda lo que se conoce como “firma espectral” (Carreño, 2019).

Se entiende como firma espectral al comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada o albedo desde algún objeto o tipo de superficie a lo largo del espectro electromagnético (Hernández & Montaner, 2009). Para propósitos del proyecto de titulación, se detallarán las firmas espectrales de agua y vegetación dentro del espectro visible e infrarrojo que son los rangos del espectro electromagnético que se emplean para el presente estudio debido a las bandas que captura el sensor seleccionado (*Micasense RedEdge-MX*) como se muestra en la siguiente Figura 6.



Figura 6 – Bandas espectrales de la cámara multispectral Micasense RedEdge – MX

Elaboración: propia

2.1.4.1. Firma espectral vegetación

La firma espectral única de la vegetación permite diferenciar de otros tipos de cobertura de suelo, la curva de la reflectancia es influenciada por el contenido de clorofila, salud, contenido de agua y composición bioquímica de la vegetación (Jones & Vaughan, 2010). A continuación, se muestra la curva de reflectancia espectral típica para una vegetación saludable (Figura 7); como se puede resaltar, la firma espectral de la vegetación se caracteriza por dos picos característicos, el primero en la región verde (540nm), pico verde, y el otro en la región del borde rojo (690nm – 720nm), pico del borde rojo; en la región del espectro visible se presenta dos cuencas (pozos de clorofila) en las longitudes de onda (420-490) nm y 660nm (Moroni, Porti, & Piro, 2019).

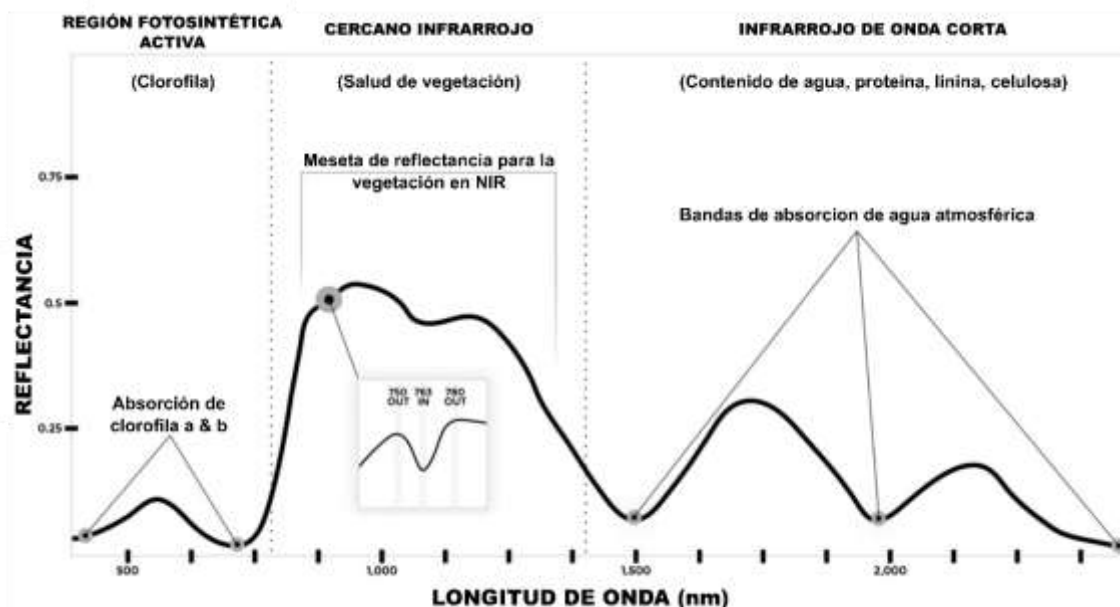


Figura 7 – Firma espectral típica de la vegetación saludable

Modificado de (Pauli et al., 2016)

En este sentido se pueden dividir su comportamiento espectral por franjas: (400nm - 500nm) en donde se produce una fuerte absorción por la clorofila, el caroteno y la xantofila, (500nm – 600 nm) la absorción disminuye y su reflectancia es mayor a sus dos franjas adyacentes lo cual resulta en la coloración verde común de las plantas, (600nm – 700nm) se obtiene nuevamente una gran absorción por la clorofila la cual es menor si se encuentra en la parte del envés de la hoja o si se trata de vegetación seca, (700nm – 800nm) se considera la zona de transición entre la zona de absorción por la clorofila y los valores elevados de reflectancia, y la zona entre (800nm - 1100nm) en donde se da una elevada reflectancia debido a la estructura interna de la hoja (Alonso, Moreno, & Rodríguez, 1999).

El borde rojo y sus bandas adyacentes poseen una característica distinguida de la firma espectral de las hojas, lo cual es relacionado a la estructura interna de las hojas y al contenido de agua. Cuando la planta no está saludable del todo o se encuentra en estado de envejecimiento, la clorofila se degrada más rápido que los carotenoides entre los pigmentos, por lo cual se incrementa significativamente la reflectancia en la región roja del espectro visible, ya que la absorción se reduce notablemente debido a la clorofila. Por otra parte, la región del infrarrojo cercano o mejor conocido como NIR

por sus iniciales en inglés, las hojas saludables se caracterizan generalmente por altos valores de reflectancia y transmitancia, mientras que posee bajos valores de reflectancia cuando las células se deterioran (Sims & Gamon, 2002).

En este sentido, se debe tener una idea clara de la diferencia de las firmas espectrales entre una planta saludable y una no saludable, como se muestra en la siguiente Figura 8. Las plantas saludables suelen tener una reflectancia menor en las bandas del espectro visible y una mayor reflectancia en las bandas del NIR que las plantas bajo estrés o en proceso de envejecimiento (plantas no saludables).

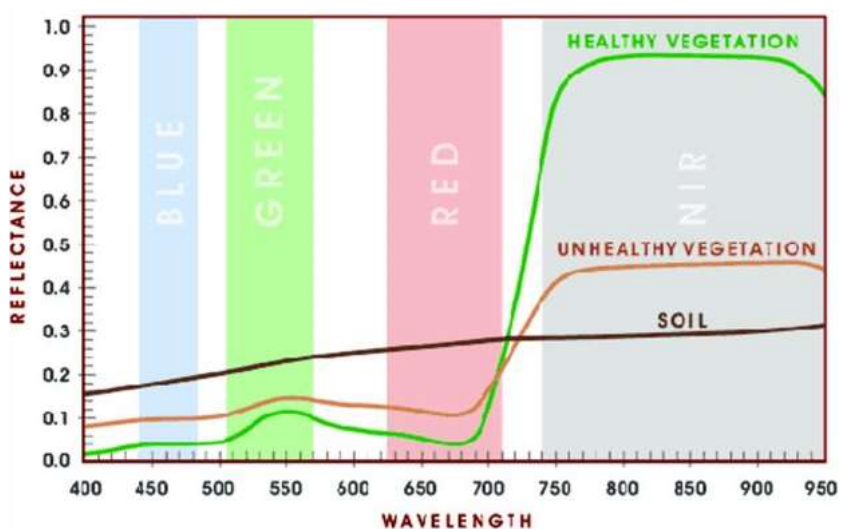


Figura 8 – Firmas espectrales de la vegetación saludable, no saludable y suelo

Elaboración: (Chang, Clay, Clay, & Reese, 2012)

2.1.4.2. Firma espectral agua

La firma espectral del agua varía según la concentración de partículas en suspensión. Por ejemplo, el agua pura transmite la radiación electromagnética en el espectro visible y absorbe en el infrarrojo (Drozd & Fernández, 2015). Mientras tanto, el agua en su estado de mayor pureza absorbe escasamente las ondas de la región azul – verde del espectro y su absorción aumenta considerablemente a partir de los 550 nm en adelante como se muestra en la siguiente Figura 9. La reflectancia por su parte es inversamente proporcional a la longitud de onda, es decir, a bajas longitudes de onda

mayor reflectividad, lo cual es lo causante del color azul de las aguas naturales más claras como los océanos y algunos lagos profundos ultraoligotróficos (Dekker, 1993).

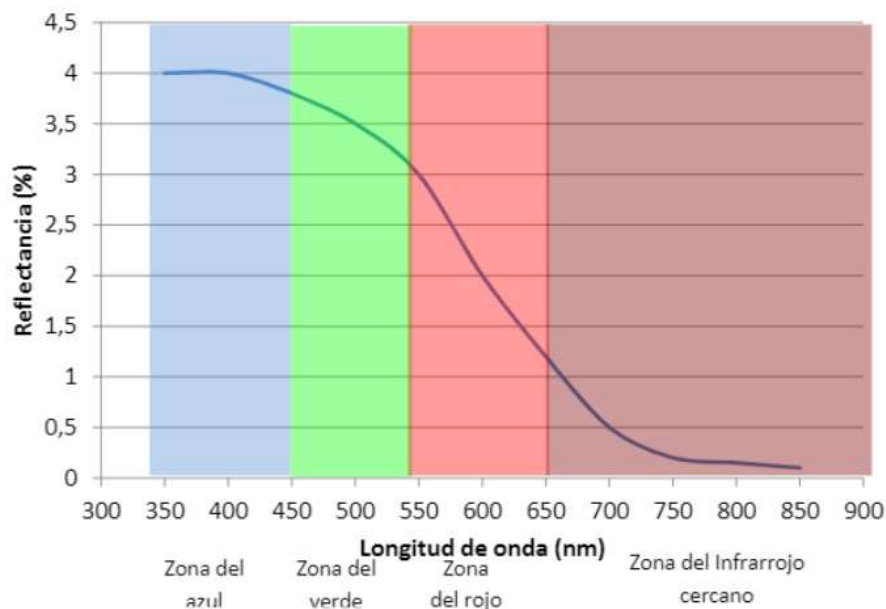


Figura 9 – Firma espectral para el agua pura

Elaboración: (Drozd & Fernández, 2015)

Por otra parte (Bartolucci, Robinson, & Silva, 1977) evaluaron el agua turbia de un río y un agua relativamente clara de un lago. Diseñando la siguiente firma espectral para agua turbia y limpia (Figura 10). En este sentido, la absorción aumenta de manera irregular conforme se sigue en el espectro infrarrojo. De manera más concreta se muestra en la Figura 11, como la firma espectral del agua varía según la turbidez o la cantidad de sólidos totales presentes.

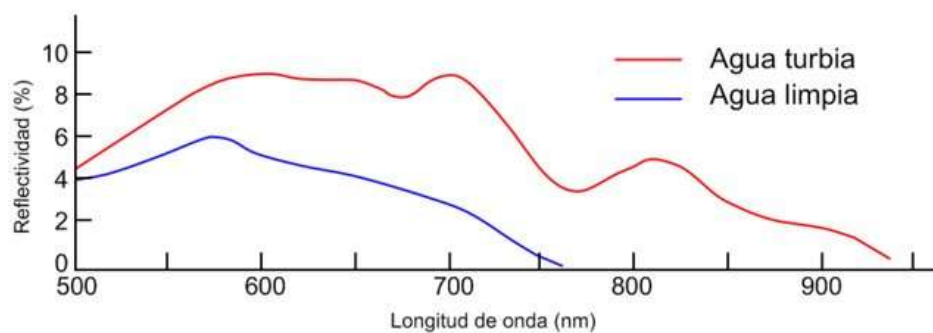


Figura 10 – Firmas espectrales de agua limpia y turbia

Modificado de (Bartolucci et al., 1977)

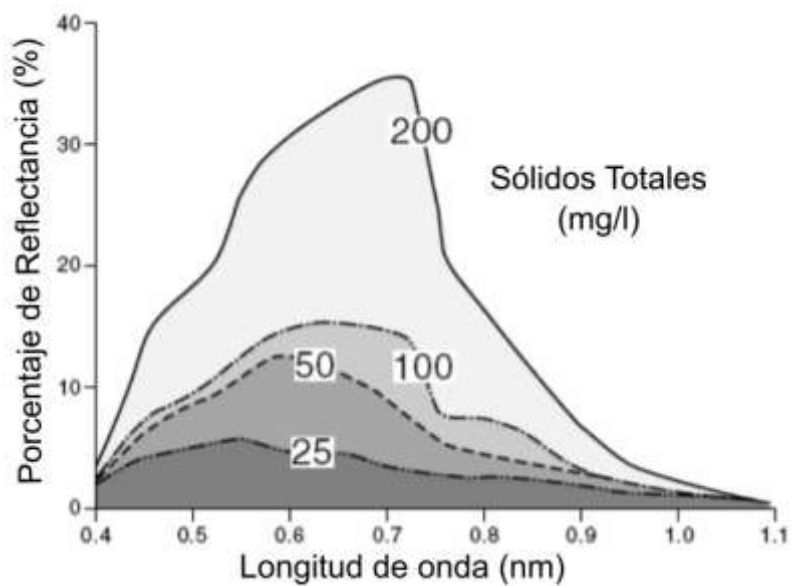


Figura 11 – Firmas espectrales del agua a diferentes concentración de sólidos totales

Modificado de (Papoutsas, Hadjimitsis, & Alexakis, 2011)

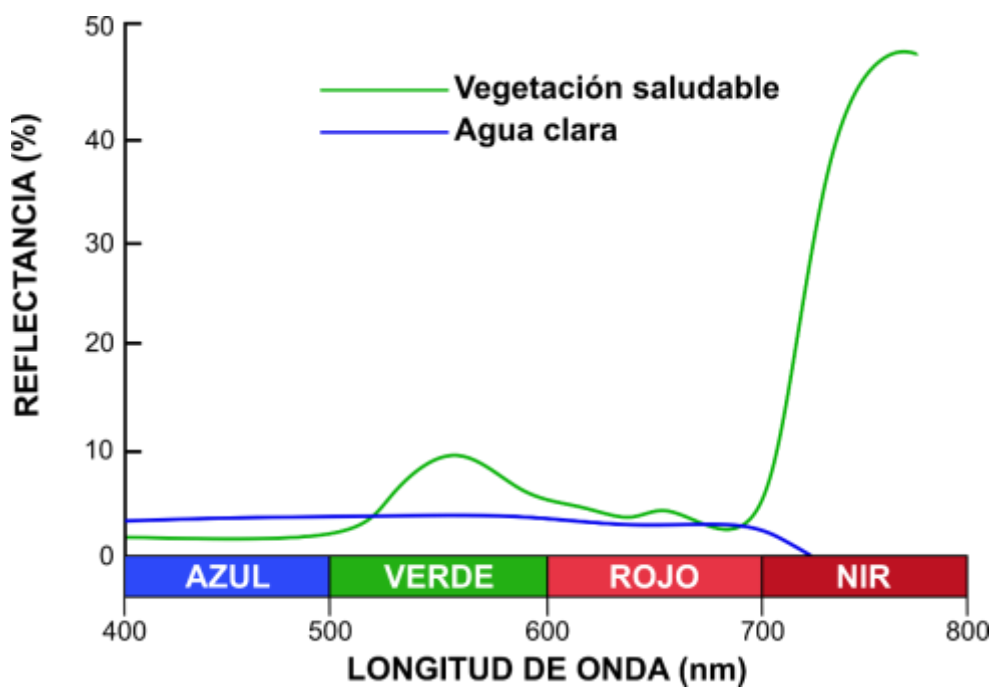


Figura 12 – Firmas espectrales comunes de vegetación (saludable) y de agua (clara)

Modificado de (Parece & Campbell, 2015)

Además, es importante señalar la diferencia entre las firmas espectrales de vegetación y agua puesto que son los dos factores primordiales en la evaluación del presente

estudio. Como se muestra en la Figura 12, las curvas espectrales de vegetación saludable y agua clara, los valores de reflectancia del agua tienden a ser menores a lo largo del espectro electromagnético, mientras que la firma espectral de la vegetación posee picos muy bien definidos en la banda verde y NIR. Sin embargo, se debe considerar que las relaciones entre las dos firmas espectrales están sujetas al estado de la vegetación y concentración de sólidos totales en el agua que alterarían la relación presentada.

2.1.5. Índices espectrales

2.1.5.1. NDVI- Índice normalizado de diferencia de vegetación

Los índices espectrales de vegetación son algoritmos que se emplean para simplificar la información de reflectancia de múltiples bandas espectrales a un solo valor con que se relacione con los parámetros físicos de la vegetación (Tucker, 1979). Uno de los índices más utilizados para la evaluación del estado de la vegetación es el NDVI. Los valores del NDVI varían del -1 a +1, en donde valores negativos representan suelo descubierto, valores bajos caracterizan superficies con vegetación en mal estado y valores altos representan una densa cubierta de vegetación verde (Anyamba & Compton, 2017). El índice normalizado de diferencia de vegetación, se lo define como:

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

Una cualidad importante del NDVI, es su uso para la estimación de la salud de la vegetación. En este sentido, se muestra en la Figura 13 un claro ejemplo, donde la vegetación saludable (izquierda) absorbe en su mayoría el rango de la luz visible y refleja una gran cantidad de la luz proveniente de la banda NIR; mientras tanto, la vegetación no saludable, escasa o seca (derecha) refleja más de la luz visible y menos de la luz NIR. Por lo cual entre mayor es el valor del NDVI mayor verdor y mayor densidad vegetativa poseerá la superficie analizada, mientras que valores bajos representan una superficie con vegetación en mal estado.

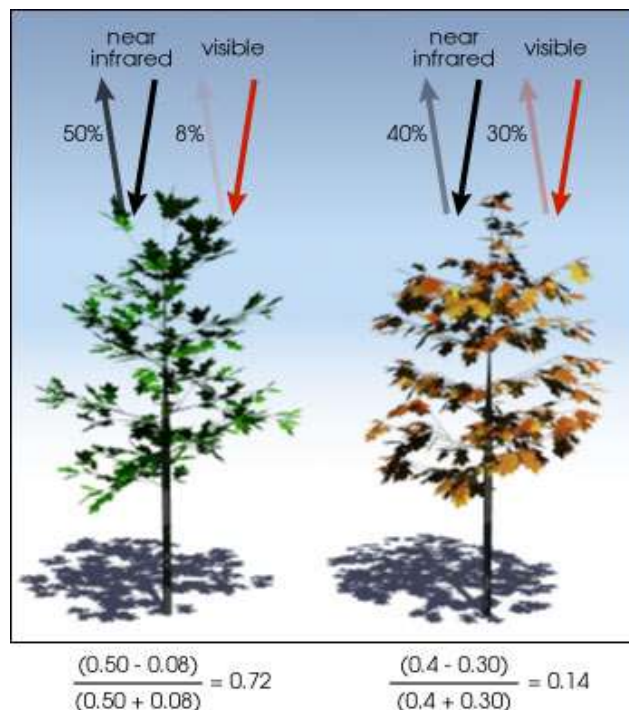


Figura 13 – Ejemplo de NDVI para vegetación saludable y no saludable

Elaboración: (Earth observatory NASA, 2000)

2.1.5.2. GCI – Índice de clorofila verde

El índice de clorofila verde o mejor conocido como GCI por sus siglas en inglés (*Green Chlorophyll Index*) se lo emplea para estimar el contenido de clorofila en las hojas; el contenido de clorofila refleja el estado fisiológico de la vegetación, por ejemplo, la clorofila disminuye en plantas estresadas por lo cual se lo utiliza como una medida del estado de salud de la planta (Hassan et al., 2018). (Gitelson, Viña, Ciganda, Rundquist, & Arkebauer, 2005) lo definen de la siguiente manera:

$$GCI = \frac{NIR}{VERDE} - 1 \quad (1.2)$$

2.1.5.3. NDRE- Índice normalizado de borde rojo

El índice normalizado de borde rojo, utiliza la banda de borde rojo o también conocido como RE por sus siglas en inglés, la cual se considera como una zona que marca el límite entre la absorción de la clorofila en la banda roja y la reflectividad de la banda NIR debido a la estructura interna de la hoja (Jorge, Vallbé, & Soler, 2019). El NDRE se considera sensible al contenido de clorofila en las hojas, en donde valores altos presentan altos niveles en contenido de clorofila mientras que plantas no saludables

presentan valores intermedios y el suelo presenta los valores más bajos (MicaSense, 2020). La fórmula para su cálculo se presenta en la siguiente ecuación:

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE} \quad (1.3)$$

2.1.5.4. GNDVI – Índice normalizado de diferencia de vegetación verde

El índice normalizado de diferencia de vegetación verde definido por (Gitelson, Kaufman, & Merzlyak, 1996) reemplaza la banda roja en el NDVI, con el fin de recopilar información adicional como el contenido de clorofila y permitir una estimación precisa de la concentración del pigmento. Adicionalmente se lo implementa para estimar la absorción de agua y el nitrógeno en el follaje de los cultivos (Kharuf-Gutierrez, Orozco-Morales, Aday Díaz, & Pineda Ruiz, 2018). La fórmula para su cálculo se presenta en la siguiente ecuación:

$$GNDVI = \frac{NIR - VERDE}{VERDE + NIR} \quad (1.4)$$

2.1.5.5. NDWI- Índice normalizado de diferencia de agua

El índice normalizado de diferencia de agua o mejor conocido como NDWI, presenta dos tipos de variaciones en donde consideran las bandas espectrales verde, NIR e infrarrojo de onda corta o mejor conocido como SWIR por sus siglas en inglés. El índice propuesto por (Gao, 1996) define al índice NDWI como la diferencia entre las bandas espectrales encontradas en los 860nm y 1240nm sobre su suma. A continuación, se muestra la fórmula propuesta considerando el nombre de las bandas a las que se encuentra:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2.1)$$

El siguiente índice fue desarrollado con el fin de delinear cuerpos de agua abierta y mejorar su presencia en imágenes remotas; el índice NDWI propuesto por (McFeeters, 1996), utiliza la radiación reflejada de las bandas NIR y verde para resaltar las características de cuerpos de agua mientras se elimina la presencia del suelo y características de la vegetación terrestre. McFeeters, justifica la selección de las bandas NIR y verde en tres puntos: maximizar la reflectancia típicas de cuerpos de agua al usar la banda verde, minimizar la baja reflectancia del NIR por los cuerpos hídricos y aprovechar la alta reflectancia del NIR en la vegetación terrestre y suelo.

Para el presente caso de estudio, se empleará el NDWI de McFeeters puesto que emplean las bandas verde y NIR disponibles en el sensor seleccionado.

$$NDWI = \frac{VERDE - NIR}{VERDE + NIR} \quad (2.2)$$

2.1.6. Sistema aéreo no tripulado (UAS)

Un sistema aéreo no tripulado o UAS por sus siglas en inglés (*Unmanned Aircraft Systems* o *Unmanned Aerial Systems*) comprende los elementos de sistemas individuales que consisten en una aeronave no tripulada o UAV, la estación o base de control y cualquier otro elemento necesario para permitir el vuelo como elementos para el despegue o aterrizaje. Cabe destacar que pueden existir múltiples estaciones de control, enlaces de comando dentro de un mismo UAS (European Aviation Safety Agency, 2009). La administración federal de aviación de los Estado Unidos de América (FAA) define a los UAS como un sistema completo que incluye a la aeronave no tripulada, estaciones de control y enlace de datos (Federal Aviation Administration, 2019). En este contexto los principales componentes de un UAS es el vehículo no tripulado, el sistema de comunicación y la estación de control, Figura 14.

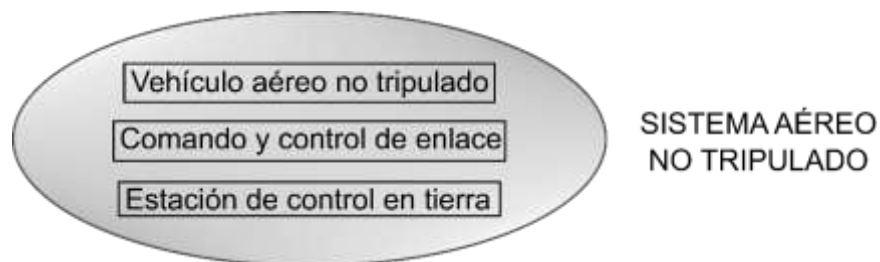


Figura 14 – Esquema de componentes UAS

Modificado de (Gupta, Ghonge, & Jawandhiya, 2019)

2.1.7. Vehículos aéreos no tripulados

El vehículo aéreo no tripulado posee una variedad de acrónimos como UAV por sus siglas en inglés (*Unmanned Aircraft Vehicle*) o en algunos casos se ha expandido a UAVS (*Unmanned Aircraft Vehicle Systems*) (Cavoukian, 2012). En los últimos años el término UAV ha sido remplazado por UA que se define a una aeronave no tripulada por su acrónimo en inglés (*Unmanned Aircraft*) (Walker, 2010). La definición de un UAV puede referirse a una aeronave remotamente controlada por un piloto desde una estación de control en tierra o puede volar autónomamente basado en un vuelo pre

programado o por sistemas dinámicos de automatización más complejos y pueden llevar cargas útiles letales o no letales (las cargas útiles no letales generalmente pueden ser cámaras o videocámaras de baja o alta resolución, radares, armas y en general cualquier equipo requerido para la misión que está diseñado el UAV (Nonami, Kendoul, Wang, Nakazawa, & Satoshi, 2013).

2.1.7.1. Clasificación de UAV:

La clasificación de los UAV es variada, según el autor o la aplicación que posee. Por ejemplo, (Watts et al., 2012), clasifican las plataformas de drones basándose en sus características como el tamaño, duración del vuelo y capacidades en: MAV (Miniatura o micro vehículos aéreos), NAV (Nano vehículos aéreos), VTOL (Despegue y aterrizaje vertical), LASE (Altitud baja, corta duración), LALE (Altitud baja, larga duración), MALE (Altitud media, larga duración) y HALE (Altitud alta, larga duración). En otro caso, existen clasificaciones que consideran el rango de peso que poseen las aeronaves para clasificarlas como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1 – Clasificación de drones por su peso propuesto por (Brooke-Holland, 2013).

Tipo	Rango de peso
Nano drones	Peso \leq 200 g
Micro drones	200 g < Peso \leq 2 kg
Mini drones	2 kg < Peso \leq 20 kg
Pequeños drones	20 kg < Peso \leq 150 kg
Drones tácticos	150 kg < Peso \leq 600 kg
MALE / HALE / Drones de ataque	Peso > 600 kg

Existen otras clasificaciones (Hassanalian & Abdelkefi, 2017) que toman en consideración el peso y envergadura de la aeronave, como se muestra en la Figura 15; en donde se involucran otros conceptos como PAV (Vehículo aéreo pico) y SD (Polvo inteligente).

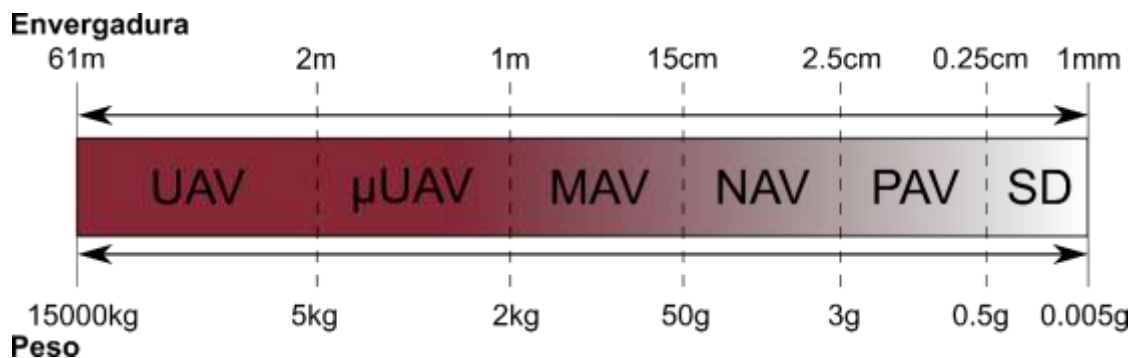


Figura 15 – Clasificación de drones considerando su peso y envergadura

Modificado de: (Hassanalian & Abdelkefi, 2017)

Existe otra clasificación de los UAV de acuerdo a su configuración aerodinámica, tamaño, etc.; en donde se dividen las plataformas en cuatro categorías principales (Tabla 2):

Tabla 2 – Clasificación de UAV propuesto por (Gupta et al., 2019)

Categoría	Características
UAV de ala fija	<ul style="list-style-type: none"> Requieren un sistema de catapulta o pueden ser lanzados manualmente con impulso Poseen una larga duración Pueden volar a velocidades de crucero elevadas
UAV de ala rotatoria	<ul style="list-style-type: none"> También conocido como multicopteros o VTOL Posee una alta maniobrabilidad Puede poseer diferentes configuraciones
Dirigibles	<ul style="list-style-type: none"> Vuela a bajas velocidades Generalmente son de dimensiones largas
UAV de ala de aleteo	<ul style="list-style-type: none"> Poseen alas pequeñas flexibles y/o cambiantes inspiradas en pájaros e insectos voladores Existen configuraciones híbridas o convertibles

2.1.8. Estación de control en tierra

La estación de control en tierra o mejor conocido por sus siglas en inglés GCS (*Ground Control Station*), es un conjunto de sistemas de hardware y software que permiten al operador del UAV comunicarse y controlar al dron y sus cargas útiles (de Paiva, Dias,

de Paiva Guimarães, & Trevelin, 2017). Así sea para configurar los parámetros en una operación autónoma o para controlar directamente al dron (Gago et al., 2015).

2.1.9. Sistema de comunicaciones

Se refiere al sistema responsable entre la comunicación del UAV y la estación en tierra, generalmente este enlace se establece por medio de radiofrecuencia; el sistema de comunicación se encarga básicamente en transmitir: el plan de vuelo programado, información de la ubicación del UAV, comandos de control en tiempo real, información respecto a la carga útil e información de la energía disponible en el UAV (Changoluisa & Cayo, 2018).

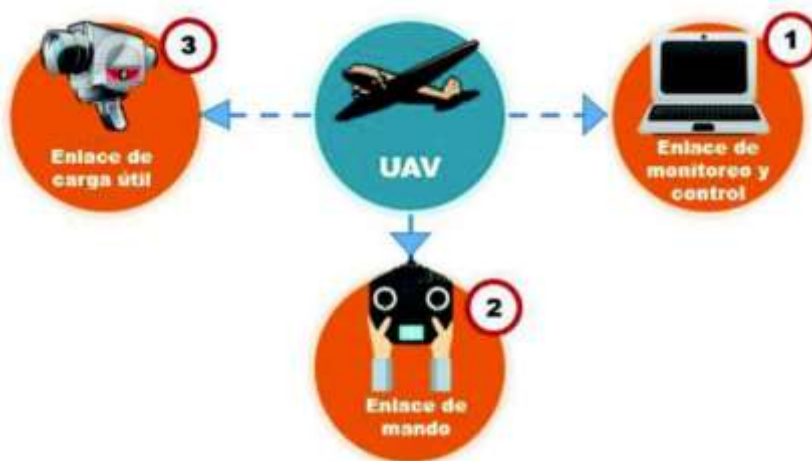


Figura 16 – Enlaces mediante el sistema de comunicación

Elaboración: (Changoluisa & Cayo, 2018)

2.1.10. Cargas útiles (Sensores)

Como ya se mencionó anteriormente existen cargas útiles letales y no letales. Para el presente proyecto se detallan las cargas útiles enfocadas para tareas de monitoreo. Las cargas útiles utilizadas en tareas de monitoreo se refieren a sensores, los cuales se clasifican en activos o pasivos para tareas de reconocimiento o evaluación de una zona en específico. Los sensores pasivos detectan la radiación que es emitida o reflejada por el objeto o la escena que está siendo observada, la luz solar reflejada es la fuente de radiación más común utilizada por los sensores pasivos entre los cuales incluyen diferentes tipos de radiómetros y espectrómetros; la mayoría de sistemas pasivos implementados en tareas de monitoreo operan en bandas del espectro visible,

infrarrojo, termal infrarrojo y porciones de microondas del espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2020). Por otra parte, los sensores activos proveen su propia fuente de energía para iluminar los objetos que observan, es decir, emite radiación la cual rebota en el objeto de observación retro dispersada o reflejada para luego ser medida por el sensor; entre los sistemas activos se encuentran los sistemas LIDAR, basado en tecnología láser, o radar (Thuy Mai, 2017).

2.1.10.1. Cámara multispectral

Es un sensor pasivo el cual mide cuantitativamente la intensidad de la radiación electromagnética en específicas longitudes de onda con determinados anchos de banda a lo largo del espectro electromagnético (Penn State College, 2018).

2.1.11. Evaluación de UAS para monitoreo

2.1.11.1. Selección de UAV para monitoreo

La selección del dron de ala fija se basó en un análisis técnico y económico realizado por el GI-ATA en la fase inicial del proyecto CEPRA-XII-2018-12 mencionado anteriormente. A continuación, se muestra el cuadro comparativo (Tabla 3) entre la aeronave seleccionada y 4 opciones que se consideraron en la adquisición del UAV comercial de ala fija. Bajo este sentido, se seleccionó a la aeronave no tripulada Event 386 para las tareas de monitoreo planteadas en el proyecto CEPRA-XIX-2018-12; considerando el precio, la capacidad de carga útil, autonomía, alcance y techo de vuelo máximo como las variables de mayor importancia para la selección del dron. Los precios presentados en la Tabla 3 se refieren netamente a la aeronave sin equipos o materiales complementarios.

Tabla 3 – Tabla comparativa de drones de ala fija comerciales

Tipo	Ítem	EVENT E386	LEHMAN LA500- RTK	TRIMBLE UX5 HP	EMBENTION F300	SENSEFLY EBEE PLUS
Hardware	Tipo	Ala fija	Ala fija	Ala fija	Ala fija	Ala fija
	Peso (kg)	2.5	1.5	2.9	25	110
	Envergadura (m)	1.9	1.16	1	3	1.1
	Material	Espuma de poli-olefina (EPO) y	EPP foam, fibra de	EPP foam, marco de carbón	-	EPP foam y estructura de carbono

		revestimiento de ABS	carbono y aluminio			
	Propulsión	Hélice de empuje eléctrico, motor sin escobillas	Hélice de empuje eléctrico, motor sin escobillas	Hélice eléctrica inversa, motor sin escobillas	Bícilindrico de dos tiempos	Hélice de empuje eléctrico
	Tipo de batería	LiPo	LiPo	LiPo	-	LiPo
	Capacidad de la batería (mAh)	8000	4000	6600	-	-
	Autonomía (min)	85	45	50	180	60
	Alcance (km)	58	25	60	100	-
	Velocidad crucero (km/h)	46.8	80	80	120	110
Operación	Techo de vuelo máximo (m)	3960	3500	5000	3500	-
	Velocidad de viento (km/h)	43.2	45	55	-	45
	Máxima carga útil (g)	500	1500			
	Distancia de control (km)	5	-	5	-	8
Comunicación	Control de vuelo	Pixhawk 2.1	-	-	Veronte	eMotion3
	Sistema de procesamiento	PPK	RTK	RTK	-	RTK/PPK
	Tipo de despegue	Manual	Manual	Catapulta	-	Manual
Adicionales	Tipo de aterrizaje	Lineal automático / Paracaídas	Lineal automático	Lineal automático	-	Lineal automático
	Precio UAV	\$6,890.00	\$6,695.00	\$7,995.00	\$12,640.00	\$17,990.00

Elaboración: propia

2.1.11.2. Selección de Cámara multispectral

Tabla 4 - Cuadro comparativo entre cámaras multispectrales

Ítem	MICASENSE REDEDGE - MX	MICASENSE REDEDGE - M	PARROT SEQUOIA
Peso (g)	231.9	200	135
Tamaño	8.7 cm x 5.9cm x 4.54cm	9.4cm x 6.3cm x 4.6cm	5.9cm x 4.1cm x 2.9cm
Alimentación	4W nominal, 8W picos	4W nominal, 8W picos	6W nominal, 12W picos
Cámara RGB	No	No	16 MP
Bandas espectrales	5 (azul, verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano)	5 (azul, verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano)	4 (verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano)
Resolución GSD	8 cm/pixel a 120 AGL	8 cm/pixel a 120 AGL	13 cm/pixel a 120 AGL
Profundidad de bits	12 bits	12 bits	10 bits
Velocidad de disparo	1 segundo todas las bandas	1 segundo todas las bandas	1 segundo todas las bandas
Campo de visión (FOV)	47.2 °	47.2 °	61.9° multispectral/ 63.9° RGB
Sensor de luz/ IMU/ GPS	Sí	Sí	Sí
Conexiones	USB	USB	USB
Posibilidad de integración con almacenamiento externo	Sí	Sí	No
Posibilidad de control de disparo	Sí	Sí	No
Posibilidad de integración con RTK	Sí	Sí	No
Diferencias	DLS y GPS integrados en uno, mejora la precisión en conjunto	DLS y GPS separados	Optimizada para agricultura
Precio	\$5,699.00	\$5,099.00	\$3,699.00

Elaboración: propia

Bajo el mismo criterio, el GI-ATA evaluó la carga útil que pudiera ser implementada al dron seleccionado. Considerando el peso máximo de la carga de pago de 500 g, se optó en la adquisición de una cámara multispectral, debido a que otros sensores como LIDAR o un sensor hiperespectral conllevan pesos mucho más elevados y no

cumplen con la carga útil máxima establecida. Por lo cual, se realizó un análisis técnico y económico (Tabla 4) entre los tres sensores multispectrales mas recomendados en la literatura revisada (Micasense RedEdge- MX, Micasense RedEdge- M y Parrot Sequoia). Considerando las características propias de cada sensor, se seleccionó la cámara Micasense RedEdge – MX ya que presenta un alto nivel de resolución, un sistema de sensor de luz y georreferenciación más precisos y su estructura externa cubierta de aluminio brinda una mayor resistencia al uso de la cámara.

2.1.12. Métodos de interpolación (Creación de superficies)

Los métodos de interpolación permiten generar valores para las celdas o pixeles de un ráster a partir de puntos de datos (Environmental Systems Research Institute, 2016b). Existen varios métodos de interpolación como: método de ponderación inverso a la distancia o IDW por sus siglas en inglés, *Kriging*, *Topo to raster*, tendencia y método de mínima curvatura o mejor conocido como “*Spline*”.

2.1.12.1. IDW

Este algoritmo predice las celdas a partir de una composición ponderada de los datos de la muestra, el resultado calculado disminuye su incidencia conforme se aumenta la distancia entre el punto a evaluar y los puntos a su alrededor, es decir, que las celdas más cercanas a los puntos de datos poseen mayor peso en la predicción de los valores (Garzón, 2013).

2.1.12.2. Kriging

El método Kriging es una técnica de interpolación geo estadística que toma en cuenta la separación y el grado de variación entre los puntos de datos conocidos al calcular las celdas en la superficie raster (Paramasivam & Venkatramanan, 2019).

2.1.12.3. Topo to raster

Es un método de interpolación basado en el software ANUDEM; este algoritmo se lo emplea para generar una superficie de drenaje natural y mantiene con mayor precisión las elevaciones montañosas de los puntos de datos de entrada (Garzón, 2013).

2.1.12.4. Tendencia

Se lo define como un método de interpolación polinómica global crea una superficie suave a partir de una función matemática polinómica de los puntos de datos de la

muestra; la superficie generada cambia de forma gradual (Environmental Systems Research Institute, 2019).

2.1.12.5. Spline

El método de curvatura mínima o Spline estima los valores de sus celdas empleando una función matemática la cual minimiza en general la curvatura de la superficie, generando una superficie suave que atraviesa los puntos de entrada de la muestra; se lo considera una herramienta adecuada para calcular superficies que varían levemente como: altura de los niveles freáticos o de concentraciones de contaminación (Environmental Systems Research Institute, 2018).

2.1.13. Métodos de clasificación de datos para su representación

Los métodos de clasificación de datos permiten organizar los valores en un conjunto categorías, rangos o intervalos con el objetivo de simplificar la representación gráfica de los mapas y poder tener una interpretación más adecuada del área de estudio; entre los cuales se revisará: intervalos equivalentes, intervalos geométricos, intervalos manuales, cortes naturales Jenks, cuantiles y desviación estándar (Espinosa, Monsalve, & Gómez, 2013).

2.1.13.1. Intervalos equivalentes

En el método de intervalos equivalentes se divide simplemente en rangos uniformes de igual tamaño cada categoría a partir del máximo y mínimo de los valores en un número de clases especificado. Se recomienda para datos que varíen de manera homogénea (Rhumb Line Maps, 2015).

2.1.13.2. Intervalos geométricos

El método de clasificación de intervalos geométricos genera las rupturas de clase en base a una serie geométrica; este algoritmo establece intervalos geométricos al disminuir la suma de cuadrados del número de elementos de cada intervalo; se lo considera como un método de equilibrio entre los intervalos equivalentes, cuantiles y cortes naturales Jenks (Environmental Systems Research Institute, 2016a).

2.1.13.4. Cortes naturales Jenks

El método de clasificación por corte naturales Jenks se basa en minimizar la desviación promedio dentro de la misma clase y maximizar la varianza entre las clases; las

separaciones entre las clases se establecen donde las diferencias entre sus valores son relativamente grandes (Chen, Yang, Li, Zhang, & Lv, 2013).

2.1.13.5. Cuantil

El método de clasificación cuantil determina que cada categoría tenga el mismo número de entidades, es decir, que cada intervalo posee el mismo número de valores; el método de cuantiles se considera adecuado para datos distribuidos linealmente (Environmental Systems Research Institute, 2016a).

2.1.13.6. Desviación estándar

El método de clasificación de la desviación estándar establece los cortes de las clases a partir del promedio de la muestra en valores proporcionales de (1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, o $\frac{1}{4}$) de la desviación estándar de la muestra; se recomienda para datos con una distribución normal o similares a ella (Espinosa et al., 2013).

2.1.13.7. Intervalos manuales

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de igual manera permiten al usuario establecer la clasificación de los datos en intervalos propios a su predilección, es decir, se puede arreglar las clases bajo el criterio individual del usuario, con cortes y número de clases definidos a su elección.

2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. Eje de investigación

Una vez efectuado la revisión de la literatura y recopilación bibliográfica, se concluye que el uso de imágenes multiespectrales para tareas de monitoreo de humedales a nivel de país es aún un área inexplorada. En contraste con Sudáfrica que poseen numerosos estudios sobre el uso de UAVs en la evaluación de humedales, no obstante, cada estudio se enfoca en el análisis de la vegetación o del agua bajo un solo índice y no realizan una comparación integral entre resultados de los índices espectrales, sus ventajas o desventajas de cada herramienta. La versatilidad inherente de los drones en tareas de monitoreo, las posiciona como una herramienta con grandes potenciales para una variabilidad de análisis en diversos ecosistemas.

2.2.2. Documentos revisados

En la Tabla 5, se presenta la recopilación bibliográfica referente a los temas tratados en el presente trabajo y sobre los cuales se fundamenta.

Tabla 5 – Recopilación bibliográfica

Tipo de Trabajo	Número	Ámbito	Año de publicación
Artículos científicos	51	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación firma espectral • Perspectivas históricas del uso de índices espectrales • Respuestas espectrales de superficies • Implementación de índices espectrales en tareas de monitoreo • Aplicaciones de drones para monitoreo • Métodos de clasificación de datos y generación de superficies • Hidrología de los páramos andinos • Metodologías de monitoreo de humedales • Estado de humedales a nivel mundial 	1977-2020
Documentos gubernamentales	8	<ul style="list-style-type: none"> • Estrategia regional de manejo de humedales • Secretaria de convención Ramsar 	2008-2019
Informes técnicos	3	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de cobertura vegetal humedal Pugllohuma • Informe meteorológico • Informe de cobertura de suelo humedal Pugllohuma 	2018-2019
Libros	2	<ul style="list-style-type: none"> • Páramos andinos 	2000-2012

Manuales	8	• Suelos de páramo	2019-2020
		• Teledetección aplicada a la hidrogeología	
		• Métodos de clasificación de datos	
		• Uso de cámara Micasense Rededge	
		• Procesamiento de imágenes	
Tesis	3	• Enlaces de comunicación de UAVs	2010-2018
		• Patrones de respuesta espectral	
		• Estructura de sistemas aéreos no tripulados	

2.2.3. Principales hallazgos

El monitoreo de humedales a lo largo de los años ha sido realizado en su mayoría por medio de plataformas satelitales siendo una herramienta eficaz en la identificación de patrones de repuesta en complejos de humedales. Además, las imágenes satelitales abarcan una extensa área de estudio y proveen de una visión general del estado de los humedales. Sin embargo, al caracterizar o identificar problemas puntuales dentro de un humedal se limitarían solamente a plataformas satelitales privadas de alta resolución, lo cual encarecería los costos de obtención de la información y por lo tanto el estudio. Adicionalmente, satélites con sensores pasivos poseen una desventaja primordial, la cobertura de nubes al momento de la toma de imágenes. Especialmente para el caso de la región andina, el monitoreo de humedales por medio de satélites pasivos se limita significativamente debido al alto porcentaje de cobertura de nubes presente a lo largo de todo el año.

Boon et al. (2016); Boon & Tesfamichael (2017b); Boon et al. (2017) y Boon & Tesfamichael, (2017a) han demostrado en varios de sus estudios que el uso de UAVs proveen resultados precisos y adecuados para el monitoreo y caracterización de los humedales para Sudáfrica. En sus estudios se analizan varios índices espectrales en diversos casos de estudio con el fin de delimitar, evaluar el estado de la vegetación y del sistema hidrológico de los humedales. Sin embargo, en todos sus estudios no se

establece una comparación entre los resultados obtenidos por los diferentes índices o cual posee mayor correlación con los datos en campo. Como tal no presenta una metodología validada con datos de campo y los productos obtenidos de los índices espectrales.

Existen muchos casos prácticos en donde se ha evaluado el uso de drones para tareas de monitoreo, no obstante, la mayoría de ellos han sido realizados en latitudes alejados de la zona ecuatorial en donde las condiciones ambientales y la baja altura son totalmente diferentes para el caso de la región andina. Donde la baja temperatura, el alto porcentaje de humedad relativa, baja densidad del aire y las fuertes ráfagas de viento pueden comprometer seriamente al desempeño de la aeronave. En este sentido, se ha evaluado el desempeño teórico y real que han obtenido las aeronaves en ambientes de alta complejidad de vuelo como es la región andina (Valencia, Alulema, & Rodríguez, 2019; Valencia, Oña, Rodríguez, Oña, & Hidalgo, 2019). Presentando configuraciones adaptadas para este tipo de ecosistemas de alta demanda energética.

2.2.4. Diagnostico

A nivel nacional los UAVs se emplean en su mayoría para aplicaciones dirigidas al estudio de ingeniería civil en espacios urbanos. Pocas iniciativas presentan a los drones como una herramienta para tareas de monitoreo en ecosistemas sensibles como por ejemplo, la presentada por el MAE en el monitoreo del Parque Nacional Yasuní mediante el uso de drones multicópteros Skyranger (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2015). Sin embargo, el uso de drones multicópteros implica una mayor demanda de energía y tiempo en las tareas de monitoreo, por lo tanto, las aeronaves no tripuladas de ala fija presentan una ventaja aerodinámica al utilizar la fuerza de sustentación del viento brindando una mayor área de cobertura con menor demanda de energía y tiempo. Por lo cual, el monitoreo de ecosistemas en la región andina mediante el uso de drones de ala fija implementado con un sensor multiespectral, se presenta como una opción innovadora y eficaz en el análisis integral del humedal considerando tanto el componente de la vegetación como los cuerpos de agua presentes en los humedales.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. PREPARACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

Los equipos utilizados en el presente proyecto son:

- Dron comercial de ala fija Event386 – (UAV)
- Cámara multispectral Micasense RedEdge – MX – (Carga útil)
- Computador portátil Dell - (Estación de tierra)
- Radios de telemetría y enlace de mando – (Sistema de comunicación)

3.1.1. Dron de ala Fija (Event386)

Tabla 6 – Características básicas del dron de ala fija Event386

Características	Valores
Dimensiones	190 cm (Envergadura), 130 cm (Largo)
Peso	2.5 kg
Duración de vuelo	85 minutos
Velocidad crucero	12 m/s
Rango	60 km (Puede mapear 850 hectáreas por vuelo a 120 m sobre el nivel del suelo)
Máxima carga de pago	500 g
Rango de telemetría	5 km

- Sistema automático de protección para sensores para el aterrizaje
- Sistema automático de paracaídas para aterrizaje
- Software para operación y planificación de la misión (vuelo autónomo, retorno a zona de despegue, lista de chequeo automatizada previo al vuelo)
- Tope sobre el nivel medio del mar: 3 960 m, despegue automático probado hasta 3,100 m
- Máxima velocidad del viento continua para operaciones autónomas: 10 m/s

Modificado de (EVENT38 Unmanned Systems, 2018)

La Tabla 6, presenta las configuraciones más detalladas de la aeronave seleccionada. Cabe recalcar que el tope sobre el nivel del mar de la aeronave estipulado por los fabricantes es de 3 960 m.s.n.m.; el área de estudio se ubica por encima los 4 000 m.s.n.m. Aunque la zona de estudio sobrepase el techo establecido, el dron Event386 (Figura 17) fue una de las aeronaves que más cerca se encontraba el techo de vuelo máximo a la altura de la zona de estudio y cumplía con las características técnicas y económicas del proyecto CEPRA.



Figura 17 – UAV de ala fija Event386

Elaboración: propia

3.1.2. Cámara multiespectral (Micasense RedEdge- MX)

La cámara Micasense RedEdge – MX (Figura 18) presenta una cubierta de aluminio que brinda mayor resistencia a la estructura externa de la cámara. El sistema de sensor de luz y georreferenciación se encuentra de manera conjunta en DLS. Además, se menciona en la Tabla 7, las configuraciones más detalladas del sensor seleccionado.



Figura 18 – Cámara Multiespectral Micasense RedEdge - MX

Elaboración:(Micasense, 2018)

Tabla 7 – Características básicas de la cámara Micasense RedEdge - MX

Características	Valores
Dimensiones	8.7 cm x 5.9 cm x 4.54 cm
Peso	231.9 g
Conexión externa	4 W nominal, 8 W pico
Bandas espectrales	Azul, Verde, Roja, Borde rojo, Infrarrojo cercano (obturador global, banda estrecha)
Longitud de onda	Azul (475 nm centro, 20 nm de ancho de banda), Verde (560 nm centro, 20 nm de ancho de banda), Rojo (668 nm de centro, 10 nm de ancho de banda), Borde rojo (717 nm centro, 10 nm de ancho de banda), infrarrojo cercano (840 nm centro, 40 nm de ancho de banda)
Salida RGB	Obturador global, alineado a todas las bandas
Resolución	8 cm por pixel (por banda) a 120 m sobre el nivel del suelo
Velocidad de captura	1 captura por segundo (todas las bandas, RAW de 12 bits)
Campo de visión	47.2° HFOV
Opciones de disparo	Temporizador, solape, disparador externo, captura manual

Modificado de (Micasense, 2018)

3.1.3. Estación de tierra y sistema de comunicación

El computador portátil empleado en las tareas en campo (Figura 19) posee un sistema operativo Windows 10 Pro2019, con un procesador Intel® Core™i7-44770 CPU de 64 bits y 8GB de memoria RAM. Se considera un computador estándar. Las antenas empleadas en el estudio son omnidireccionales, es decir, que pueden captar o enviar datos en todas las direcciones; ideales para aplicaciones de mapeo digital ya que el dron cambia constantemente de dirección conforme avanza la misión de vuelo.



Figura 19 – Estación de tierra y sistema de comunicación utilizados en campo

Elaboración: propia

3.2. ESTUDIO DE VARIABLES CLIMÁTICAS

Previo a la generación de la misión del vuelo, se debe analizar las variables climáticas que puedan interferir con el desempeño adecuado de la aeronave. Sauter (2007) menciona a los vientos de alta velocidad, la humedad, lluvia y temperaturas extremas como variables climáticas que pueden afectar de manera significativa a los UAVs. El viento afecta directamente en la trayectoria del UAV limitando su control y disminuyendo su desempeño (tiempo de vuelo) por lo cual en consecuencia aumenta el consumo de la batería; mientras tanto, que temperaturas extremas tienen implicaciones negativas en los componentes físicos de la aeronave y en su desempeño aerodinámico debido a que la temperatura influencia directamente en la densidad del aire y en la capacidad de las baterías de LiPo, ya que en función a que se reduce la

temperatura la capacidad de las baterías decae; por último, la humedad presenta un problema grave si llega a condensarse en los equipos electrónicos que se utilizan, llegando a perder la comunicación y control de la aeronave (Ranquist, Steiner, & Argrow, 2016).

En este sentido, se evaluó el viento, humedad y temperatura de la zona de estudio a partir de la estación meteorológica más cercana, M5126 – Jatunhuayco. Se solicitó información al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de los registros históricos de la estación meteorológica. Los datos provistos por el INAMHI datan desde el año 2015 hasta inicios del 2019 (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2019), los cuales presentaban grandes vacíos por operaciones de mantenimiento y reparación en la estación en gran parte de los años 2016 y 2017; el año 2018 presentaba la mayor cantidad de datos para realizar una evaluación adecuada de las variables climáticas de la zona. De manera adicional, se planificó realizar el estudio pluviométrico de la zona, sin embargo, los datos de precipitación provistos por el INAMHI presentaban fallas en todo el registro.

Los resultados obtenidos caracterizan a la zona de estudio con una alta humedad relativa del 86.64% (promedio anual), lo cual puede interferir con los componentes electrónicos de la aeronave al momento del sobrevuelo. Los vientos de la zona poseen una baja frecuencia en periodos de calma, también, se determinó que existen periodos de vientos fuertes entre junio a septiembre, siendo agosto el mes de mayores velocidades de viento que dificultarían la operación del dron y la toma de imágenes. La temperatura típica de operaciones para UAVs se encuentra entre los -20°C y 50°C (Ranquist et al., 2016), la temperatura en la zona de estudio varía entre los -6°C a los 15°C , con un promedio anual aproximado de 5° , es decir, que no se presentan temperaturas extremas que puedan comprometer la estructura física de la aeronave; sin embargo, las bajas temperaturas influyen de manera directa en la capacidad de las baterías de LiPo, las cuales son utilizadas por el UAV seleccionado. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta que los fuertes vientos, la alta humedad relativa en el aire y las bajas temperaturas presente en la zona de estudio interferirán en el desempeño adecuado del dron y se deberán tomar las precauciones necesarias. En la Tabla 8, se

muestran los valores de temperatura (promedio, máxima y mínima) y velocidad del viento promedio y máxima a lo largo del año 2018 con sus respectivas frecuencias de calma de viento.

Tabla 8 – Variables climáticas de la zona de estudio

Mes	Temperatura (°C)			Velocidad promedio del viento (m/s)	Velocidad máx del viento (m/s)	Frecuencia de calma de viento (%)
	Promedio	Máxima	Mínima			
Enero	3.9	13	-4.5	2.9	12.47	6.78
Febrero	4.5	15	-6	2.37	11.05	6.41
Marzo	4.8	13	-2.9	2.83	9.52	7.57
Abril	4.6	13	-2.8	3.77	10.68	4.04
Mayo	4.4	13	-2.2	3.2	10.87	6.88
Junio	3.6	10	-1.6	5.26	12.95	5.43
Julio	3.9	12	-2.5	4.64	16.05	2.6
Agosto	3.7	12	-2.7	5.45	18.37	3.68
Septiembre	3.5	13	-5.1	4.05	11.94	3.49
Octubre	4.4	14	-5.2	2.27	10.45	7.66
Noviembre	4.9	14	-2	2.04	10.73	8.89
Diciembre	5	13	-3.2	3.84	11.24	5.38

Elaboración: propia

De manera complementaria, se analizó la dirección y velocidad del viento por medio del software de libre uso “WRPLOT View”. El programa brinda información respecto al número total de horas en la cual se basa el análisis, promedio de la velocidad del viento, datos sin valores, frecuencia de vientos en calma, disponibilidad de información y datos utilizados (Tabla 9). El programa grafica automáticamente la rosa de vientos, en donde se puede visualizar que la mayor frecuencia con respecto a la dirección del viento se da en dirección hacia el noroeste (NO) en análisis anual del viento (Figura 20). De igual manera, nos brinda la distribución de frecuencia de los vientos respecto a su velocidad (Figura 21). En conclusión, se obtuvo vientos de 0.5 m/s a 2.10 m/s

como los vientos más comunes en la zona, no obstante, se debe considerar la existencia de vientos mayores a 8.80 m/s (7.5%) que pueden interferir con el desempeño adecuado del dron.

Tabla 9 – Parámetros del estudio del viento por medio del programa “WRPLOT View”

Parámetros	Valores
Número total de horas	7751
Velocidad promedio del viento	3,55 m/s
Registros con calma	441
Frecuencia de calma de viento	5,69 %
Disponibilidad de información	99,90 %
Registros incompletos o faltantes	8
Total de registros utilizados	7743

Elaboración: propia

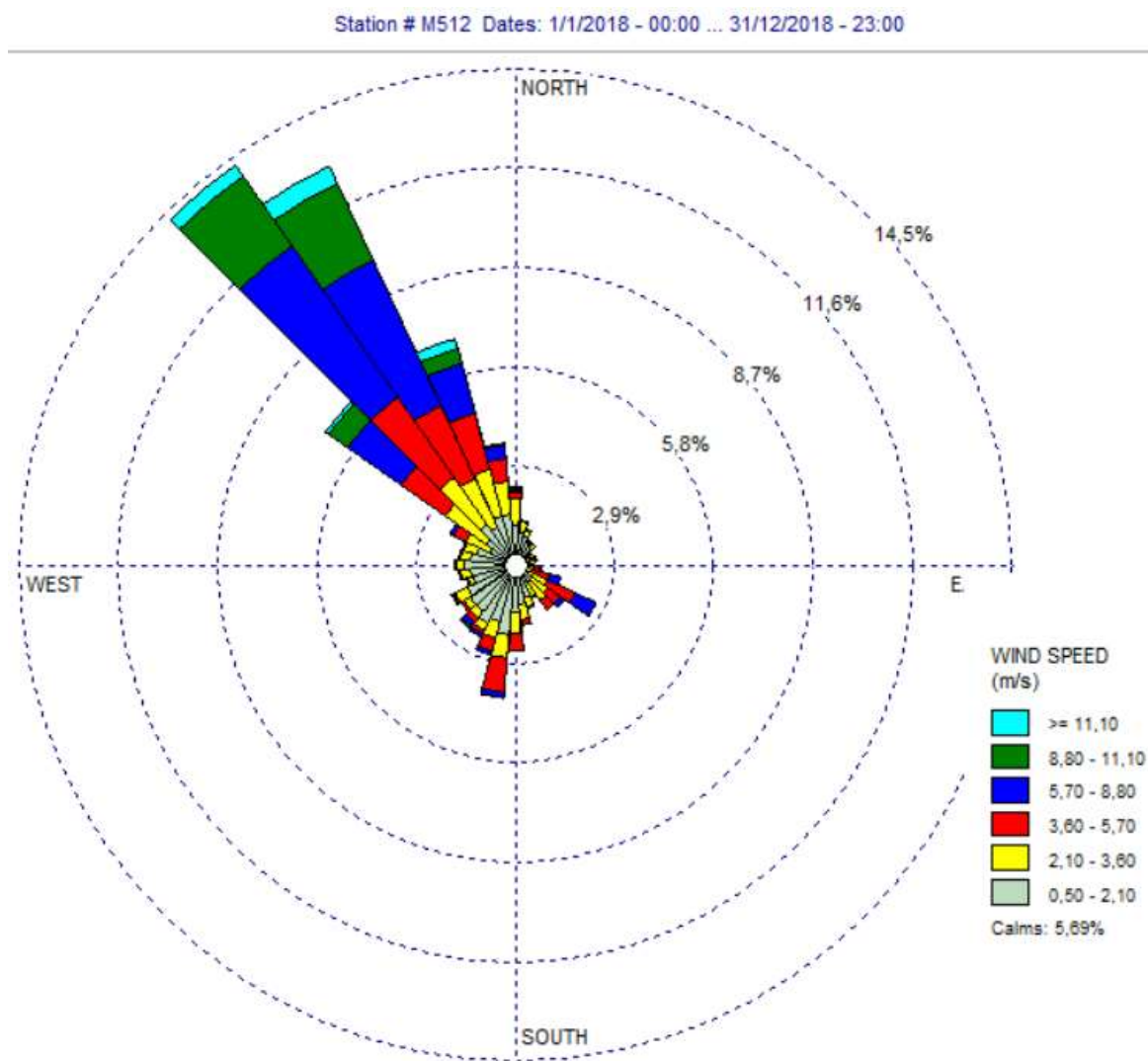


Figura 20 – Rosa de vientos para el año 2018 de la estación M-5126 Jatunhuayco

Elaboración: propia

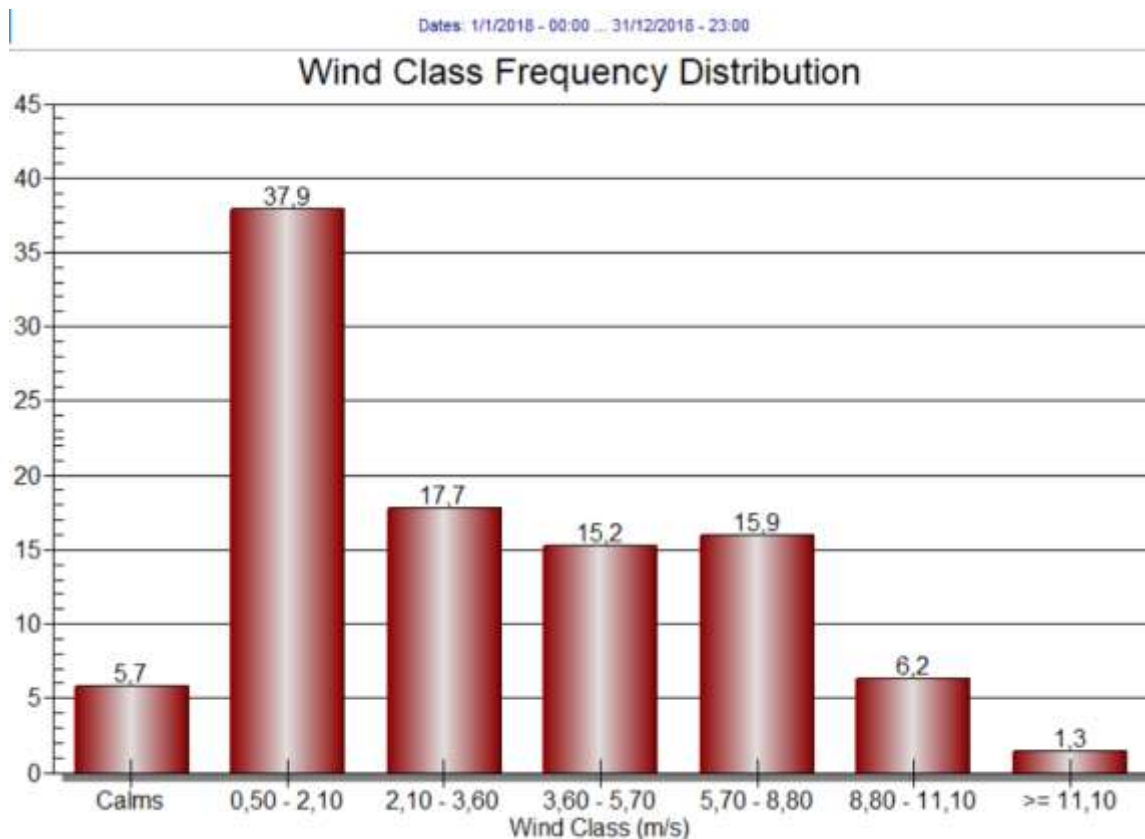


Figura 21 – Distribución de la frecuencia de vientos para el 2018 de la estación M-5126 Jatunhuayco

Elaboración: propia

3.3. MISIÓN DE VUELO EN EL SOFTWARE “MISSION PLANNER”

Previo a la salida en campo se configura una misión con la estimación de velocidad y dirección de viento esperados para el día del vuelo del dron en el software *Mission Planner* (Figura 22). Sin embargo, debido a las condiciones cambiantes propias de la zona de estudio, la misión estaría sujeta a cambios. En este contexto, se estableció el plan de vuelo en dos misiones complementarias. Consistió en un total de 40 minutos de vuelo para una altura de 80 metros sobre el nivel del terreno, para obtener una resolución del terreno de 6cm/pixel con una superposición del 80% y una superposición lateral del 70%.



Figura 22 – Ejemplo de misión de vuelo en el software “Mission Planner”

Elaboración: propia

3.4. RECONOCIMIENTO DEL ESTADO Y TIPO DE VEGETACIÓN

Previo a la toma de imágenes se realizaron varias visitas al humedal, para reconocer su temporalidad, realizar pruebas de vuelo con varios drones y evaluar su respuesta ante condiciones de vuelo exigentes como las que representa el páramo andino. En este contexto, se tomaron imágenes de la zona reconociendo su vegetación, el estado en la que se encuentra y la conformación de los drenes naturales como artificiales. La primera visita en campo se dio el 31 de enero del 2019, en el marco de reconocimiento de la zona de estudio (Figura 23). Finales de enero y en particular febrero se considera la temporada de menor precipitación en la zona de estudio. Como se ilustran en las imágenes, los drenes artificiales se encuentran sin agua, así como las zonas que se consideran como charcos están sin agua.



Figura 23 – Reconocimiento del humedal y sus zonas afectadas (31-01-2019)

Elaboración: propia

La segunda visita al humedal se realizó el 20 de junio del 2019, para iniciar las pruebas de vuelo con el dron Event386. Sin embargo, debido a los fuertes vientos y constantes lluvias que se registraron el vuelo del dron no se pudo ejecutar. Las condiciones meteorológicas mencionadas continuaron hasta finales de septiembre lo que dificultó la prueba del dron en la zona de estudio. Por lo tanto, durante este periodo se configuró un reconocimiento más detallado del humedal entre junio y septiembre. Las imágenes de la Figura 24 a & b fueron tomadas a mediados de junio, son charcos que están cubiertos por vegetación en las épocas de poca lluvia, posterior a unos tres meses, en septiembre todos los charcos y drenajes se llenaron debido a la prolongada época de lluvias, imágenes de la Figura 24 c & d.

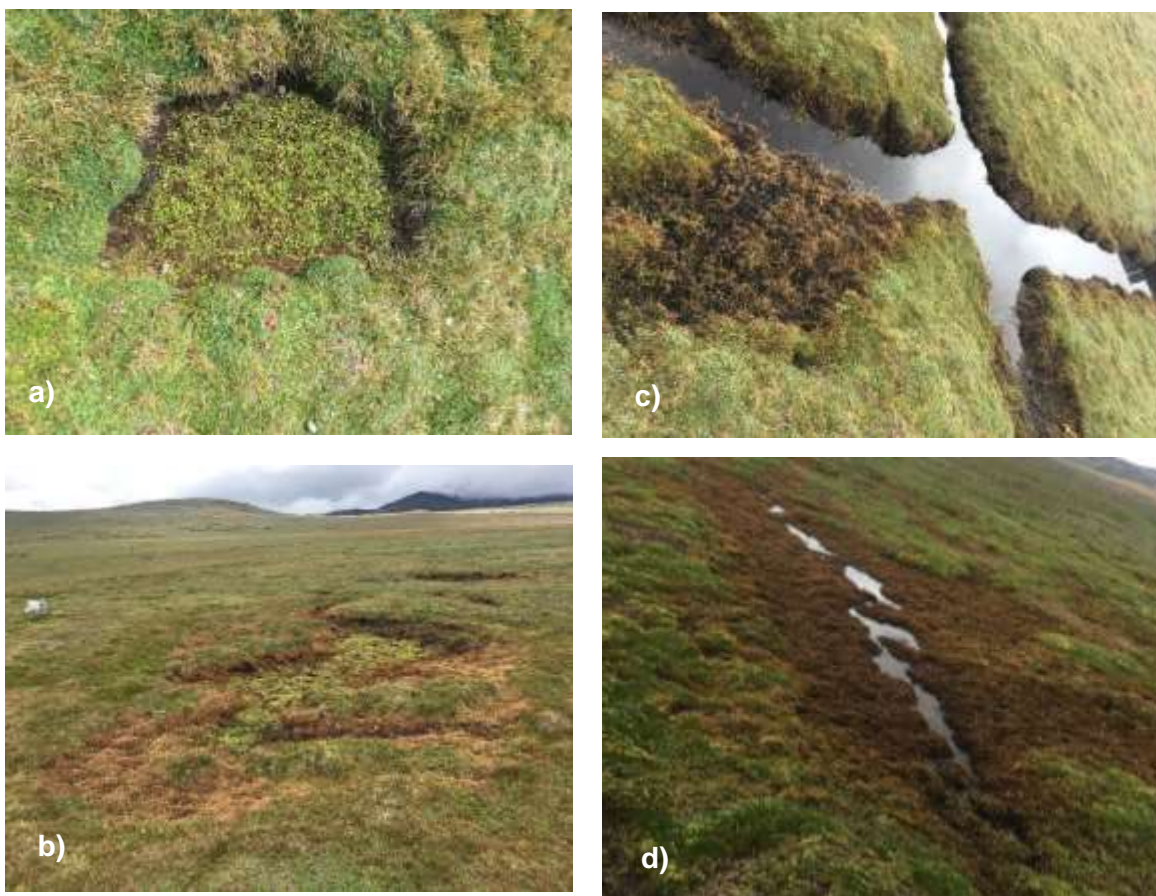


Figura 24 – Charcos cubiertos por agua o por vegetación

Elaboración: propia



Figura 25 – Reconocimiento de tipo vegetación del humedal

Elaboración: propia

Las imágenes de la Figura 25 a & c se ubican en la franja oeste del centro del humedal, esta franja se caracteriza por vegetación en mal estado, las especies predominante en

esta área son *Werneria* y *Calamagrostis*. Cabe resaltar que esta franja se extiende desde la parte alta del humedal hasta la parte baja del humedal. La imagen de la Figura 25 b corresponde a la región sur-oeste del humedal, en donde predomina la especie *Werneria*. La imagen de la Figura 25 d se capturó en la parte central del humedal de su drenaje principal, la vegetación predominante es *Azorella*.

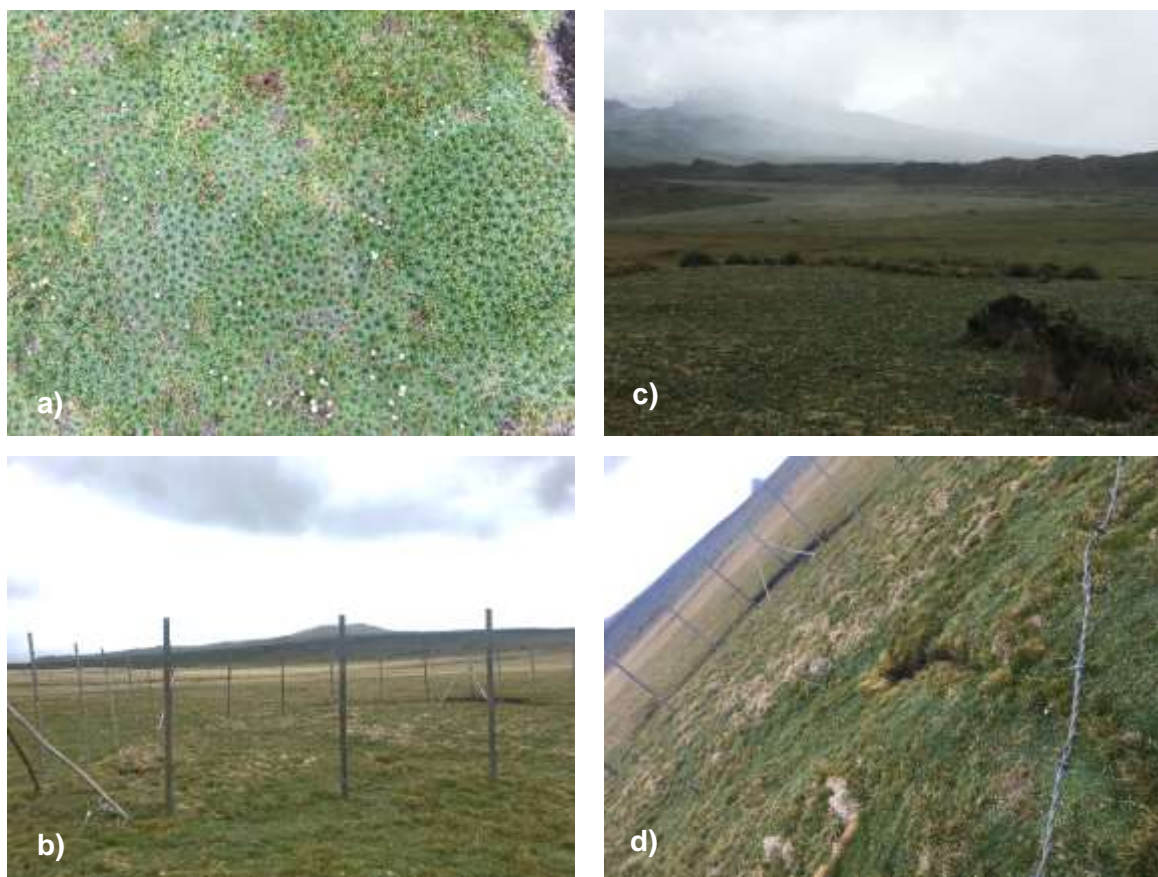


Figura 26 – Reconocimiento de vegetación y parcela

Elaboración: propia

La imagen de la Figura 26 a, corresponde al tipo de vegetación *Azorella* cuál se identifica como la especie dominante dentro del humedal. En la imagen de la Figura 26 c, se puede visualizar al fondo una vegetación con una coloración más clara denominada *Thamnolia*, ubicada en la región del noreste del humedal. Por ultimo las imágenes de las Figuras 26 b & d, corresponde a una parcela cuadrada de 130 m², la cual fue delimitada por personal técnico del FONAG, con el motivo de evitar la presencia de caballos salvajes dentro de la parcela y evaluar si su aislamiento presenta

alguna diferencia. El día 07 de noviembre del 2019, se procedió con la toma de imágenes con el dron comercial implementado con la cámara multiespectral. Se procedió a la toma de datos del nivel freático. El día presentó un grado de nubosidad considerable propio de la zona de estudio, pero permitió el sobrevuelo de la aeronave sin contratiempos. Se presenta en la Figura 27 una imagen panorámica del humedal, y como se puede visualizar, todos los charcos y drenajes se encuentran cubiertos por agua.



Figura 27 – Toma panorámica del humedal del día de la toma de datos (07/11/2019)

Elaboración: propia

3.5. MEDICIÓN DE NIVEL FREÁTICO

El FONAG desde el 2017, instaló 18 piezómetros como parte de su programa de monitoreo de la cantidad y calidad del agua. Cada 15 días técnicos del FONAG miden la profundidad del agua, pH, temperatura y conductividad. La Tabla 10, muestra las anotaciones tomadas en un día de medición a los piezómetros en acompañamiento con personal del FONAG. Para el presente estudio, la calidad del agua no comprende como parte del alcance por lo cual los datos mencionados solo son informativos. En este sentido, se mide la profundidad del agua del humedal (Figura 28) con el fin de analizar el nivel freático con el índice espectral para el agua NDWI y correlacionar los valores en campo con los resultados obtenidos del índice.

Tabla 10 – Anotaciones tomadas en los piezómetros del humedal Pugllohuma

Pugllohuma		Fecha: 06/03/2020		Hora: 10:05	
#	Conductividad	pH	Temperatura	Profundidad	
1	53.7	5.154	10.0	47.3	
2	-	-	10.0	30.2	
3	305	6.296	10.0	44.8	
4	106.5	5.985	10.0	61.2	
5	64.3	6.265	10.1	37.5	
6	309	6.686	10.2	46.5	
7	839	6.714	9.9	51.8	
8	249	6.307	9.8	51.5	
9	153.9	6.117	9.9	51.8	
10	165.6	6.608	10.5	40.5	
11	75.2	5.830	9.7	35.6	
12	166.6	6.802	9.6	27.8	
13	84	6.226	10.2	80.2	
14	57	6.045	9.8	97.5	
15	415	6.438	10.1	89	
16	170.8	6.183	10.2	43	
17	100.9	5.615	10.0	50.3	
18	88.8	6.698	10.2	39.3	

Elaboración: propia

**Figura 28** – Medición de los piezómetros

Elaboración: propia

3.6. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS PREVIO AL VUELO

Una vez de haber levantado los datos en campo sobre la vegetación y nivel freático. Procedemos al ensamblaje y calibración de los equipos a utilizar. Como primer paso armamos y verificamos que todos los componentes de la aeronave se encuentren en buenas condiciones. Una vez que el dron se encuentra armado se procede a calibrarlo y enlazarlo con la computadora para cargar la misión de vuelo. La computadora debe reconocer la ubicación del dron y el sentido donde se dirige, entonces se calibra, girando sobre su propio eje vertical horizontal y en el mismo plano (Figura 29). Posterior a este paso el dron esta enlazado con la estación en tierra y se carga la misión de vuelo pre programada.



Figura 29 – Calibración previo al vuelo dron Event386

Elaboración: propia

3.7. TOMA DE IMÁGENES

El plan de vuelo o misión de vuelo se carga mediante el software *Mission Planner* a la aeronave y en conjunto con la cámara Micasense RedEdge- MX emprenden el vuelo. El despegue se hace de manera manual como se muestra en la Figura 30, y una vez en el aire, se cambia a su configuración de piloto automático y empieza la misión establecida. El software *Mission Planner* nos permite visualizar a tiempo real como se está desarrollando la misión y donde está capturando las imágenes (Figura 31); Como

brinda información continua de la altura, velocidad de la aeronave a nivel del suelo, Sik Radio rssi (*remote strong signal indicator*) el cual se refiere a un parámetro que evalúa la calidad de la comunicación con la estación de tierra, velocidad vertical, y distancia que se encuentra de la estación de control.



Figura 30 – Lanzamiento manual del dron Event386 para su despegue

Elaboración: propia



Figura 31 – Captura de pantalla de software Mission Planner en el sobrevuelo del dron

Elaboración: propia

3.8. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN SOFTWARE PIX4D

Como primera fase del procesamiento, se cargan las imágenes en el software Pix4D, el cual reconoce el tipo de cámara y el sistema de referencia geográfico. El procesamiento se divide en tres secciones alineación de fotos, generación de puntos de nube y generación del DSM, Ortomosaico e índices, los cuales se detallarán a continuación. La información recopilada de las propiedades y opciones de cada tipo de configuración ha sido recopilada de la página oficial del software Pix4D (Pix4D, 2020d). Adicionalmente, se presenta en el Anexo 1 las diferentes opciones de configuración para el procesamiento de imágenes para el programa Pix4D.

3.8.1. Alineación de fotos

Se seleccionó la opción “Full” para obtener resultados más precisos ya que configura la alineación de fotos al tamaño original de las fotos (Figura 32). Posterior a la finalización del primer paso del procesamiento se muestra en el programa los puntos de toma de las imágenes, su orientación y como se interponen unas imágenes con otras (Figura 33).

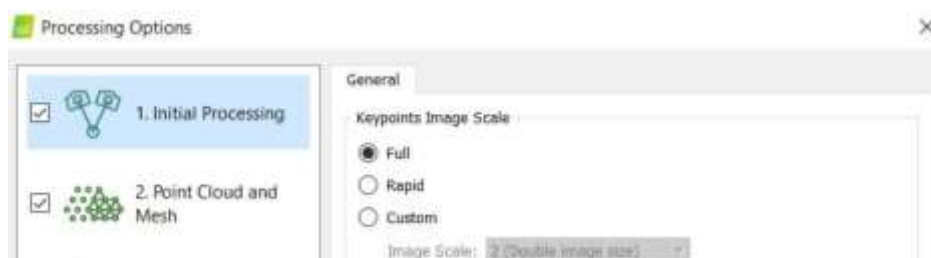


Figura 32 – Configuraciones para la alineación de fotos

Elaboración: propia

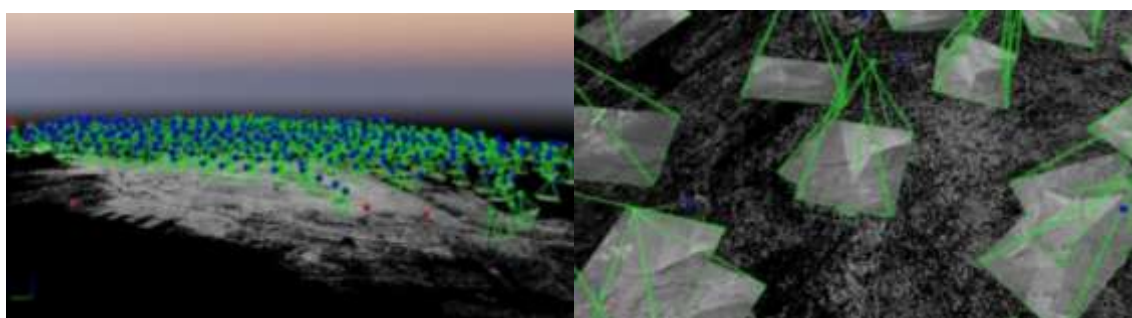


Figura 33 – Puntos de amarre generados en la alineación inicial

Elaboración: propia

3.8.2. Generación puntos de nube

Este paso aumenta la densidad de los puntos en el modelo 3D realizado previamente en la alineación de fotos, aumentando la precisión tanto para el DSM y el Ortomosaico. Se seleccionaron las configuraciones predeterminadas en el procesamiento de las imágenes (Figura 34), pues brindan resultados precisos y en un tiempo de procesamiento adecuado. El cuadro de multiescala fue seleccionado ya que calcula puntos 3D adicionales en áreas de vegetación y al mismo tiempo mantiene los detalles en áreas sin vegetación; es importante mencionar que se activó la opción de la clasificación de los puntos de nube, no obstante, la clasificación como tal no se realizó debido a que solo discriminan en grupos preestablecidos: tierra, superficie de camino, vegetación alta, edificaciones y objetos hechos por el hombre (Pix4D, 2020a).

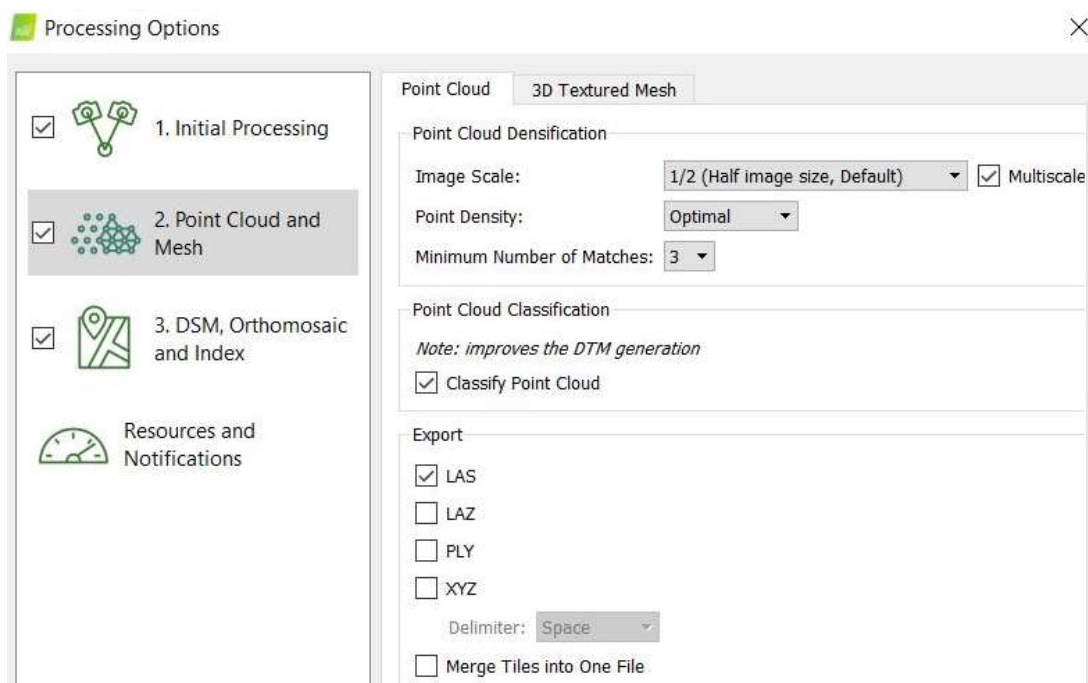


Figura 34 - Configuraciones empleadas en el procesamiento de la nube de puntos

Elaboración: propia

3.8.3. Generación del DSM y ortomosaicos

Para el caso de la generación de DSM y Ortomosaico se estableció la resolución original de las imágenes (1 GSD, *Ground Sample Distance*), configuración predeterminada. Además, se activaron los dos filtros para el DSM con el fin de corregir

puntos erróneos y el ruido producido en la generación de la nube de puntos. El método de “*Inverse Distance Weighting*” (IDW) se seleccionó para la generación del DSM, puesto que presenta los resultados más precisos. Los resultados finales establecen al DSM y Ortomosaico en dos archivos Geo TIFF unidos por sus cuadrantes. En la Figura 35, se muestran las configuraciones mencionadas para el tercer paso del procesamiento.

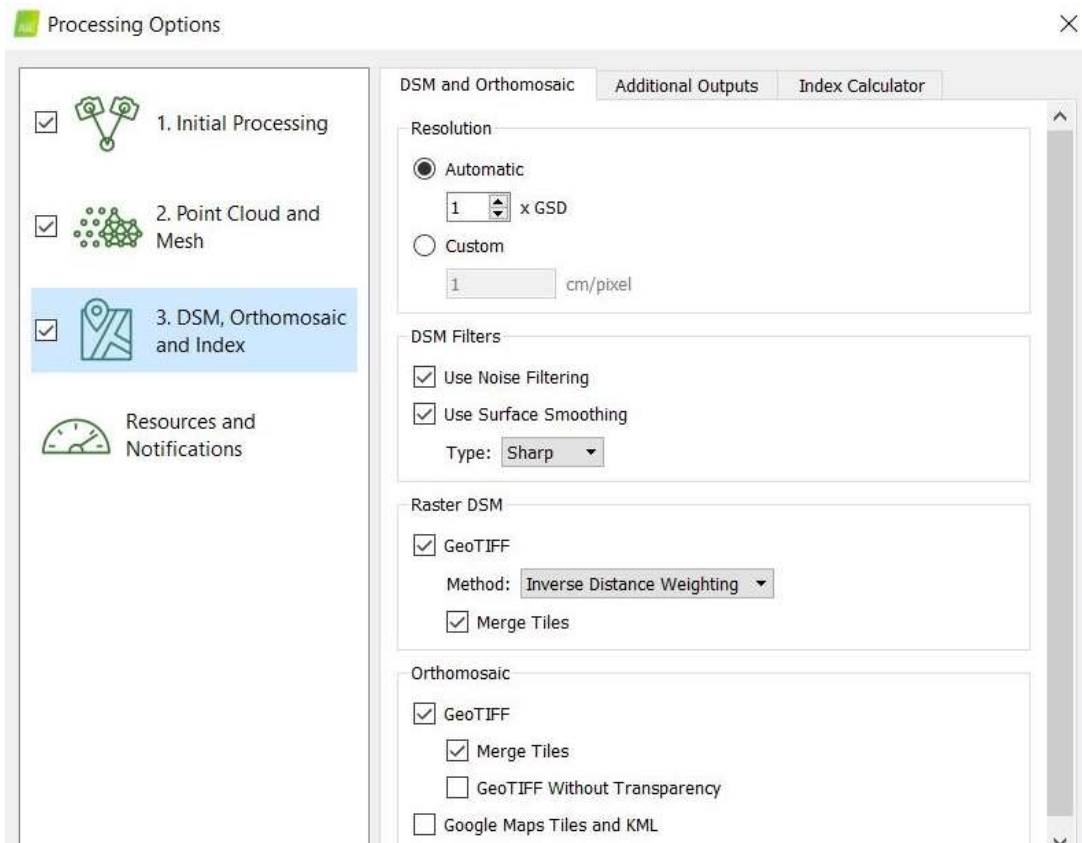


Figura 35 – Configuraciones empleadas en el procesamiento del DSM y ortomosaicos

Elaboración: propia

3.9.3.4. Calculador de índice

Como último paso, en la pestaña de “*Index Calculator*” se calibra y corrige la reflectancia de las imágenes tomando en consideración la influencia de la iluminación. En este sentido la Figura 36 muestra la selección de la corrección de la cámara e irradiación del sol “*Camera and Sun Irradiance*”, la corrección de reflectancia toma los valores registrados por el sensor de luz descendente o DLS, por sus siglas en inglés *Downwelling Light Sensor*, y las imágenes tomadas del panel de calibración (Figura

37). Además, en esta pestaña, se selecciona la generación de mapas de reflectancia utilizados para el cálculo de los índices espectrales. Los resultados principales del procesamiento de las imágenes en el software Pix4D se presentan en la Figura 38, los mapas de reflectancia para las 5 bandas mencionadas y el modelo digital de superficie (DSM).

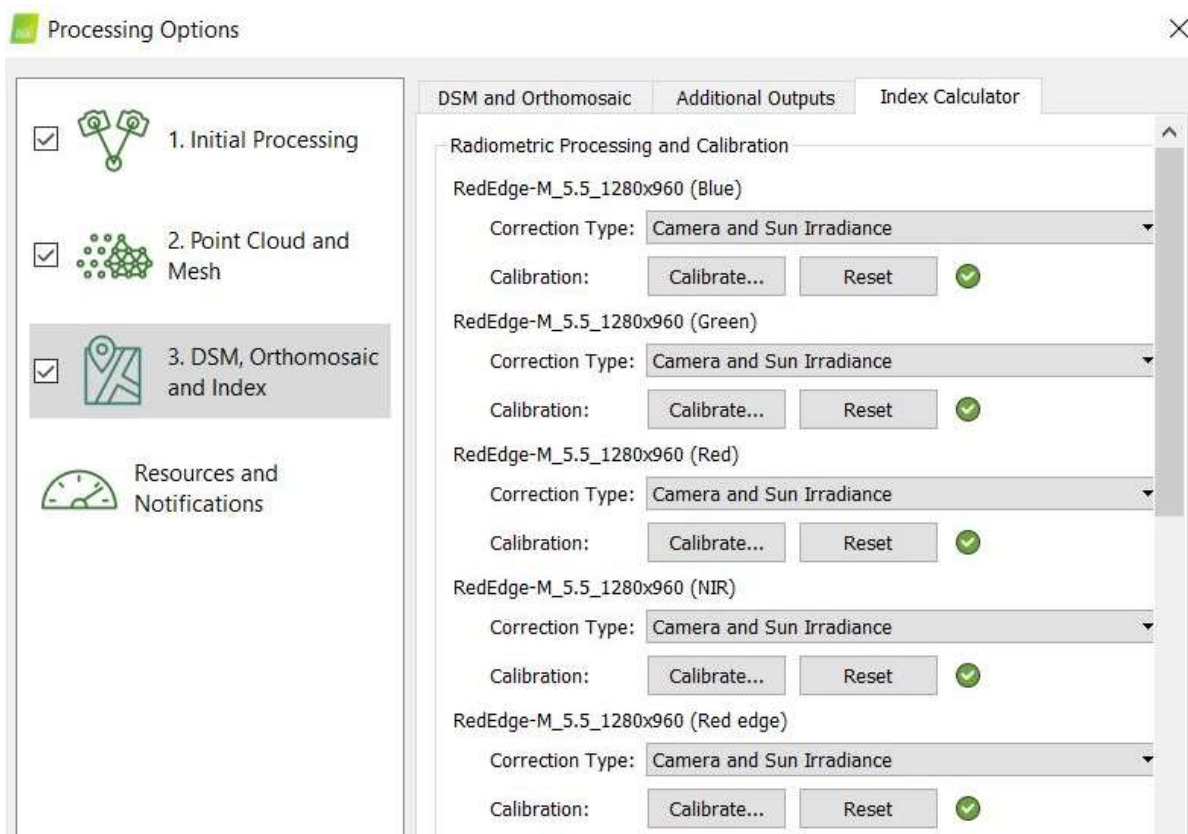


Figura 36 – Calibración de imágenes en la pestaña *Index Calculator*

Elaboración: propia

Prior to collecting data, head to our knowledge base at support.micasense.com for user manuals, integration guides, free software updates, and how-to videos.

MicaSense
Calibrated Reflectance Sensor (2017)
714 403-0246 US
P.O. Box 10000



Take panel picture *immediately* before flight
-Go to **(Start)**-

Take panel picture *immediately* after flight
-For more information, see user manual-
-Go to **(Start)**-

Start



Place panel on flat ground

Stand in front of panel with sun to your back
Take one large step to your right or left
Ensure no shadows or reflections are over panel

Position camera over panel

Use web interface or shutter button to capture image of panel
-Do **not** use the external trigger-
-Note the position of panel and QR code-

OR

RP04-1901237-SC

475-20	560-20	668-10	840-40	717-10
52.9	53.1	53.0	52.8	52.9



Figura 37 – Panel de reflectancia Micasense RedEdge- MX e instrucciones de uso

Elaboración: propia

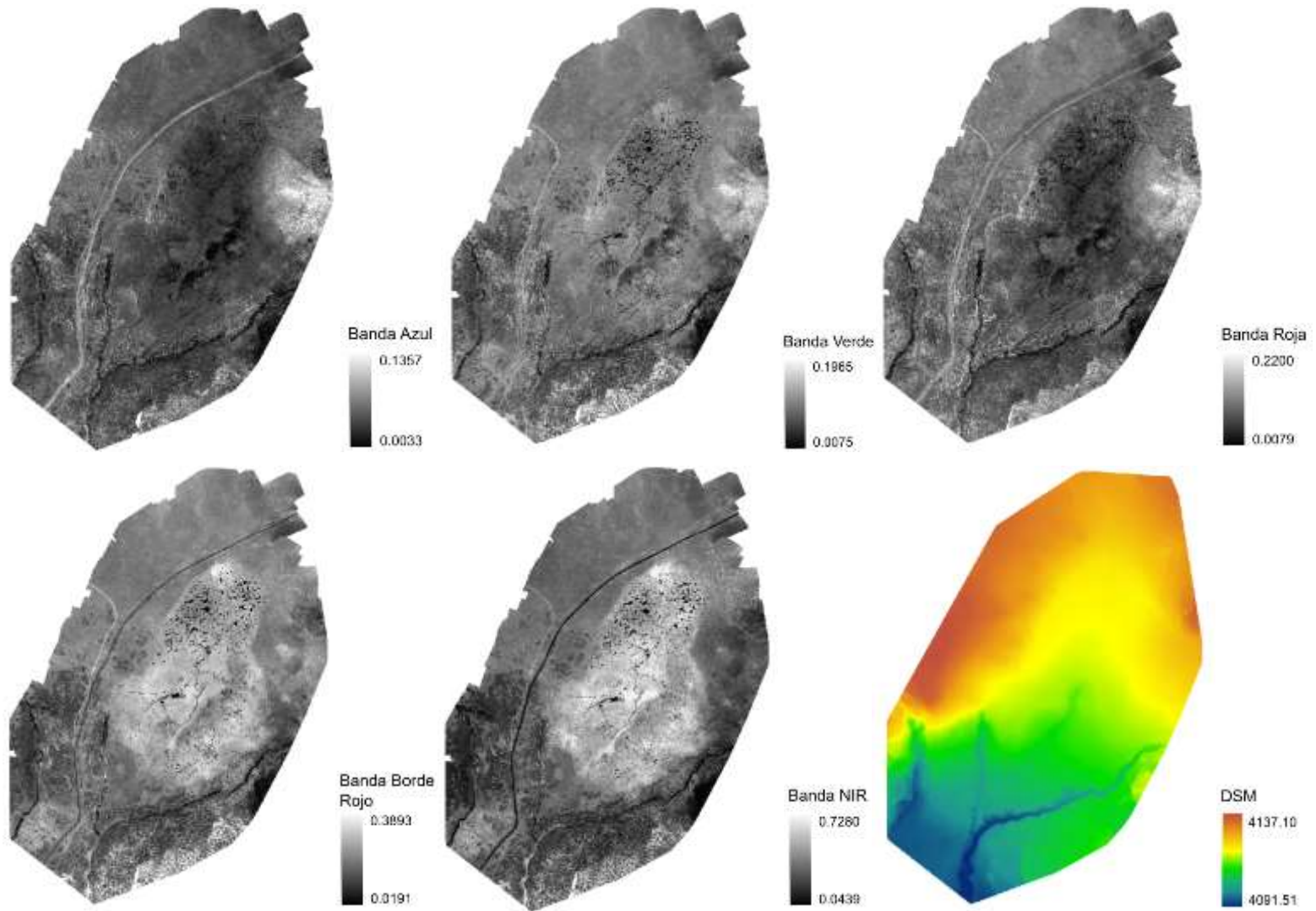


Figura 38 – Mapas de reflectancia (5 bandas) y DSM

Elaboración: propia

Como una nota importante, se optó por el software Pix4D para el procesamiento de las imágenes a diferencia del software “Agisoft Metashape” debido a que presenta mejores resultados y menor tiempo en el procesamiento; además, que posee mayores opciones en la configuración del procesamiento. Como evidencia, se presentan las siguientes imágenes RGB de los mapas obtenidos por Pix4D y Agisoft Metashape en las Figuras 39 y 40. Se puede verificar que las áreas son diferentes debido al número de encuentros que toman en consideración y su principal diferencia se da en la calibración de las imágenes.



Figura 39 – Ortomosaico RGB obtenido a través del software Agisoft Metashape



Figura 40 – Ortomosaico RGB obtenido a través del software Pix4D

Elaboración: propia

3.9. CALCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.

Una vez obtenidos los ortomosaicos y los diferentes mapas de reflectancia para las cinco bandas establecidas del sensor multiespectral, se procede a la obtención de los diversos mapas temáticos por medio del uso de un programa SIG. Se optó por el software ArcGis Pro, para la realización de los diversos mapas temáticos y el cálculo de los índices espectrales. Como primera fase en el procesamiento del Ortomosaico y los mapas de reflectancia se corrigió la geolocalización obtenida; debido a que no se

utilizaron puntos de control para corregir la ubicación exacta del humedal. Se ajustó su localización en base a una imagen georreferenciada con tres puntos de control, provista por el FONAG en el marco del proyecto CEPRA-XII-2018-12, Figura 41. Para la corrección geográfica de los diversos productos se implementó la herramienta “*Shift*”, en donde se corrigió 1.665 m en la posición X (Longitud) y 0.947 m en la posición Y (Latitud), Figura 42. Además, se recortan todos los mapas al área delimitada por el FONAG como el humedal Pugllohuma por medio de la herramienta “*Clip Raster*”, Figura 43.

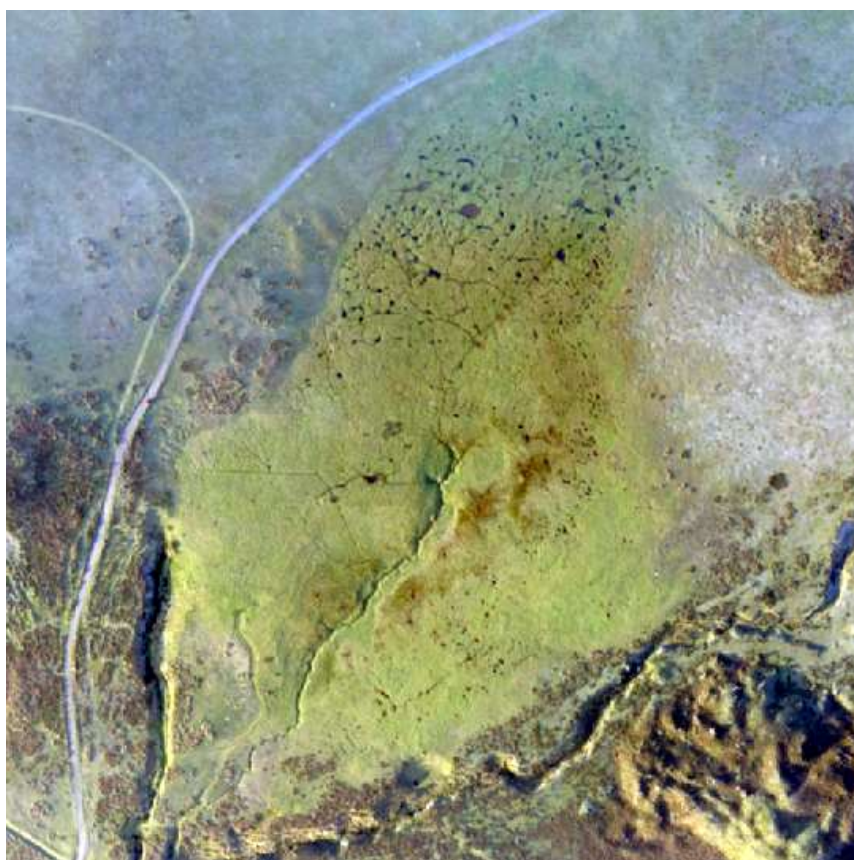


Figura 41 – Mapa RGB del humedal tomada por el FONAG

Elaboración: FONAG, s.f.

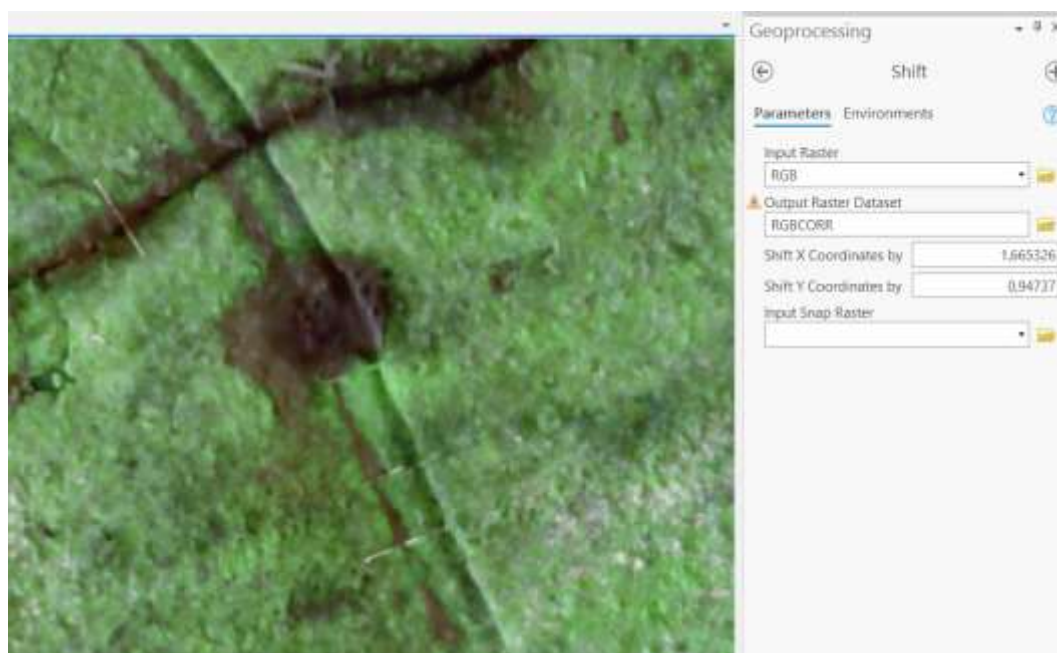


Figura 42 – Corrección de la geolocalización de los productos obtenidos

Elaboración: propia

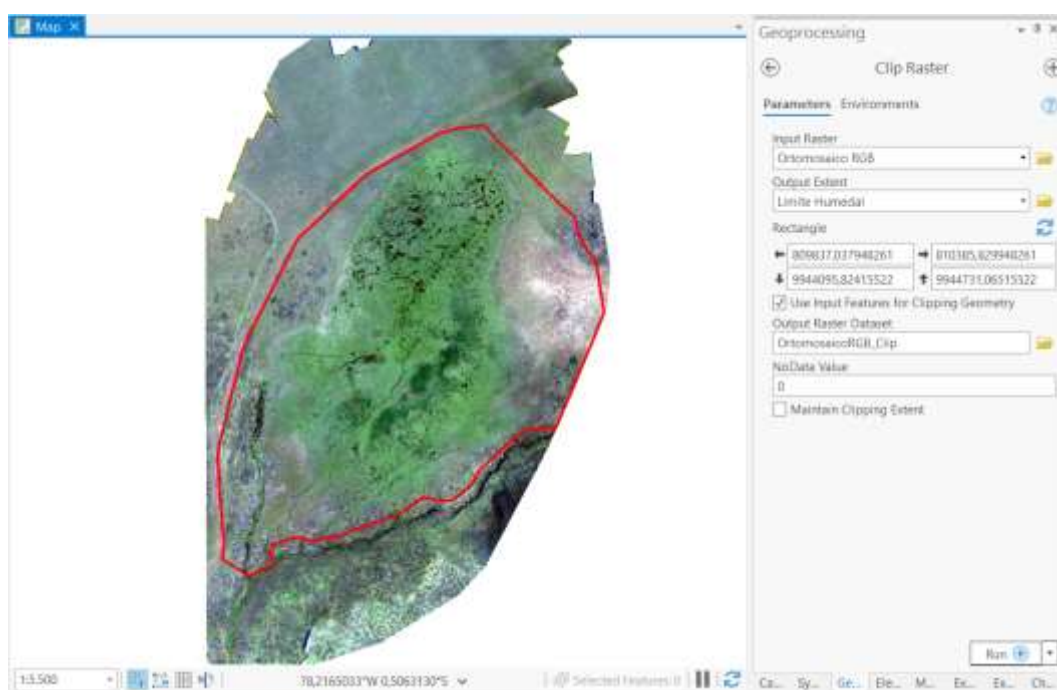


Figura 43 – Ejemplo de corte de raster por medio de la herramienta “*Clip Raster*”

Elaboración: propia

Al finalizar el corte de todos los mapas de reflectancia se calculó los diversos índices espectrales mediante la herramienta “*Raster Calculator*”. En la figura 44, se muestra un ejemplo en el cálculo del índice espectral NDWI.

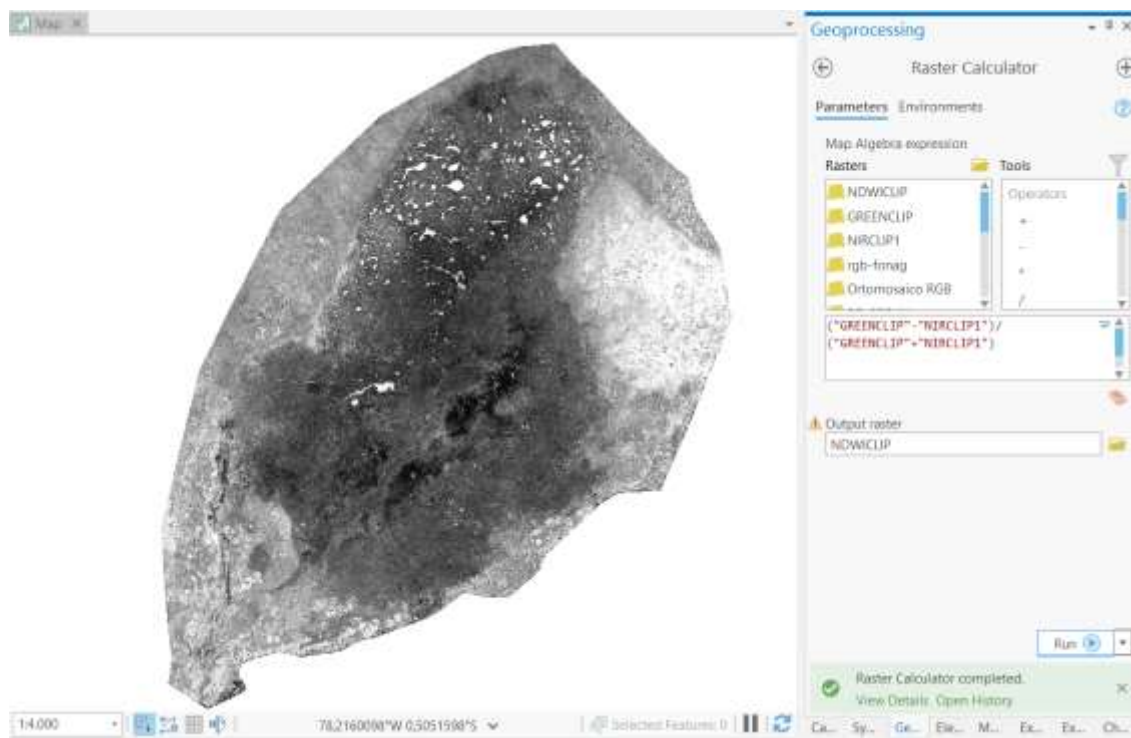


Figura 44 – Resultado del cálculo de NDWI con “*Raster Calculator*”

Elaboración: propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se detallan todos los productos obtenidos del procesamiento de las imágenes. Paralelamente se muestran los análisis tanto para los índices de vegetación como para los índices de agua con los datos medidos en campo. En este contexto, se consideran 4 análisis esenciales para la evaluación integral del humedal: las variables topográficas del humedal, índices de vegetación, índices de agua y datos de campo.

4.1. MAPA A COLOR VERDADERO

4.1.1. Ortomosaico RGB

El Ortomosaico RGB obtenido del procesamiento de imágenes abarca un perímetro de 1908.68 m y un área total de 224 313.44 m², Figura 45. Es una composición de bandas a color verdadero con una resolución espacial de 6.92 cm/pixel. El Ortomosaico RGB permite por simple inspección visual, reconocer las características básicas y principales del humedal como los cuerpos de agua abierta presentes, los canales de los drenajes artificiales y la vegetación.

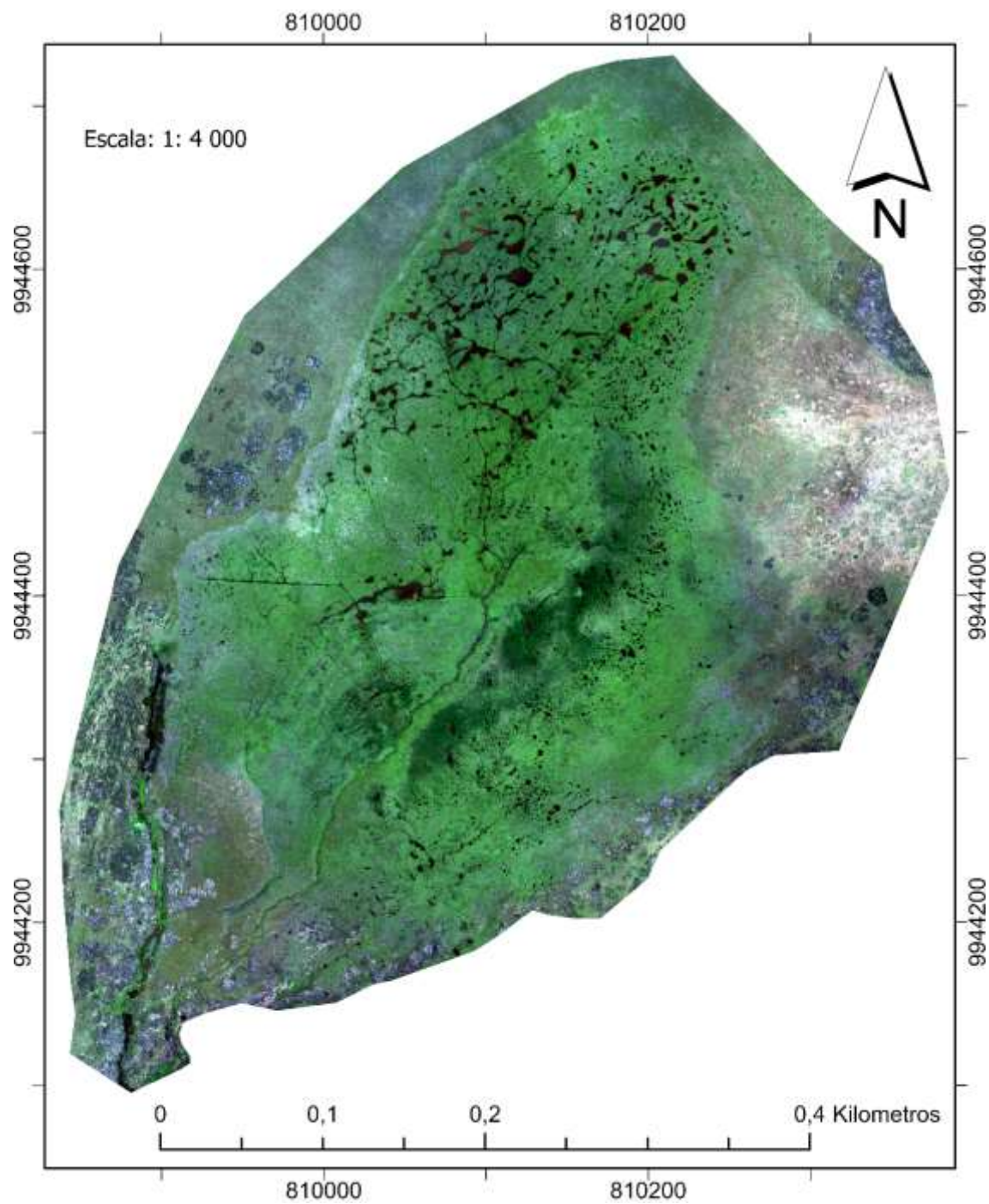


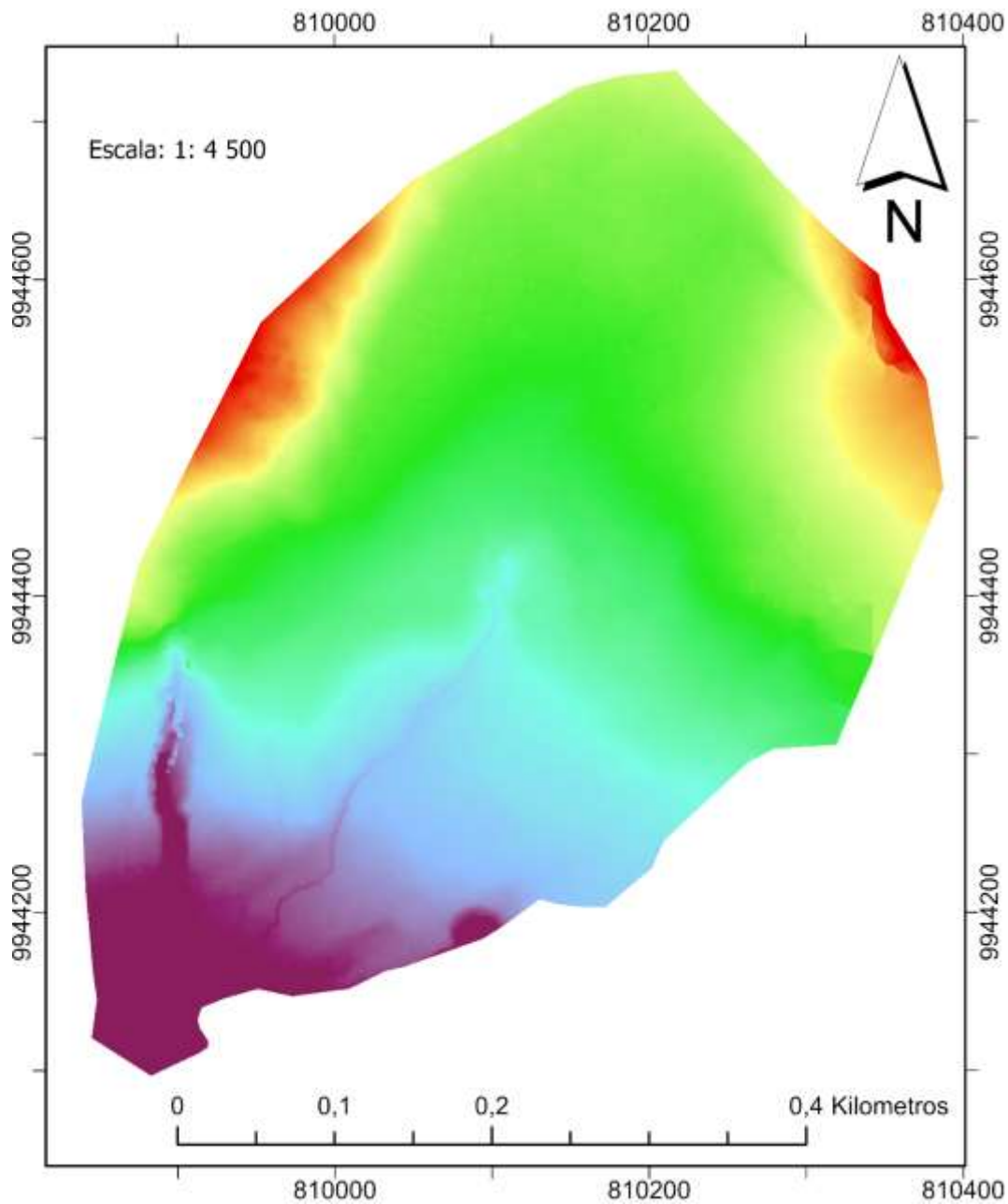
Figura 45 – Mapa RGB del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

4.2. MAPAS DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS

4.2.1. Modelo digital de superficie (DSM)

El DSM posee una resolución espacial de 6.92 cm/pixel igualmente que el mapa RGB. Su altura posee una variación de 33.16 m entre sus puntos de mayor y menor altura, el promedio de altura en la que se encuentra el humedal es de 4117.75m. La Figura 46 muestra el DSM de la zona de estudio, permite determinar la existencia de cunetas en la parte baja del humedal, además se puede identificar claramente el drenaje principal del humedal. El DSM es de suma importancia ya que permite realizar varios análisis topográficos del área de estudio como el cálculo de las curvas de nivel, pendientes, orientación del terreno y la representación 3D de los mapas, lo cual se detallará más adelante.



Leyenda

Mapa DSM - Altura (m)



Figura 46 – Mapa DSM del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

4.2.2. Mapa de pendientes

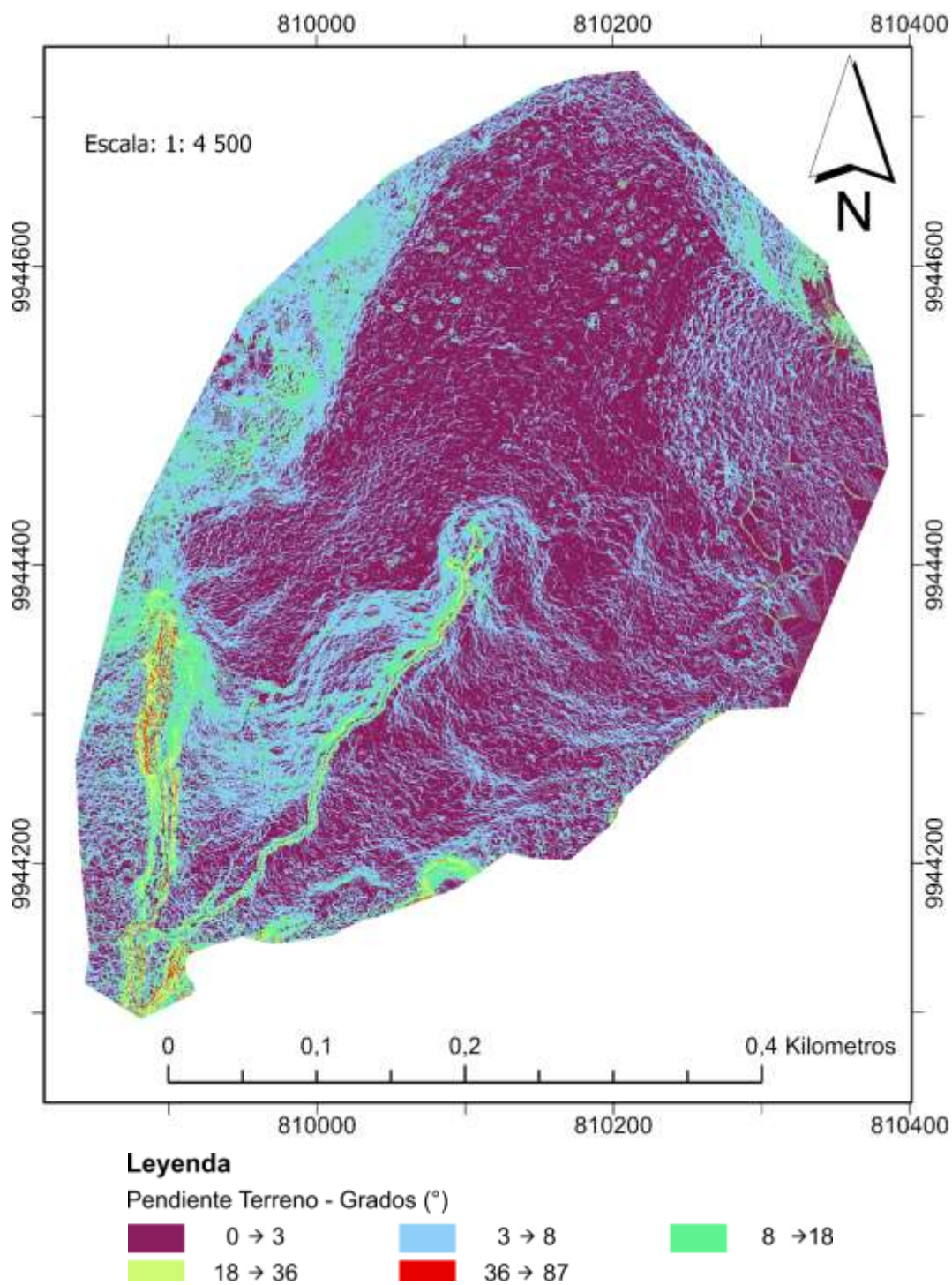


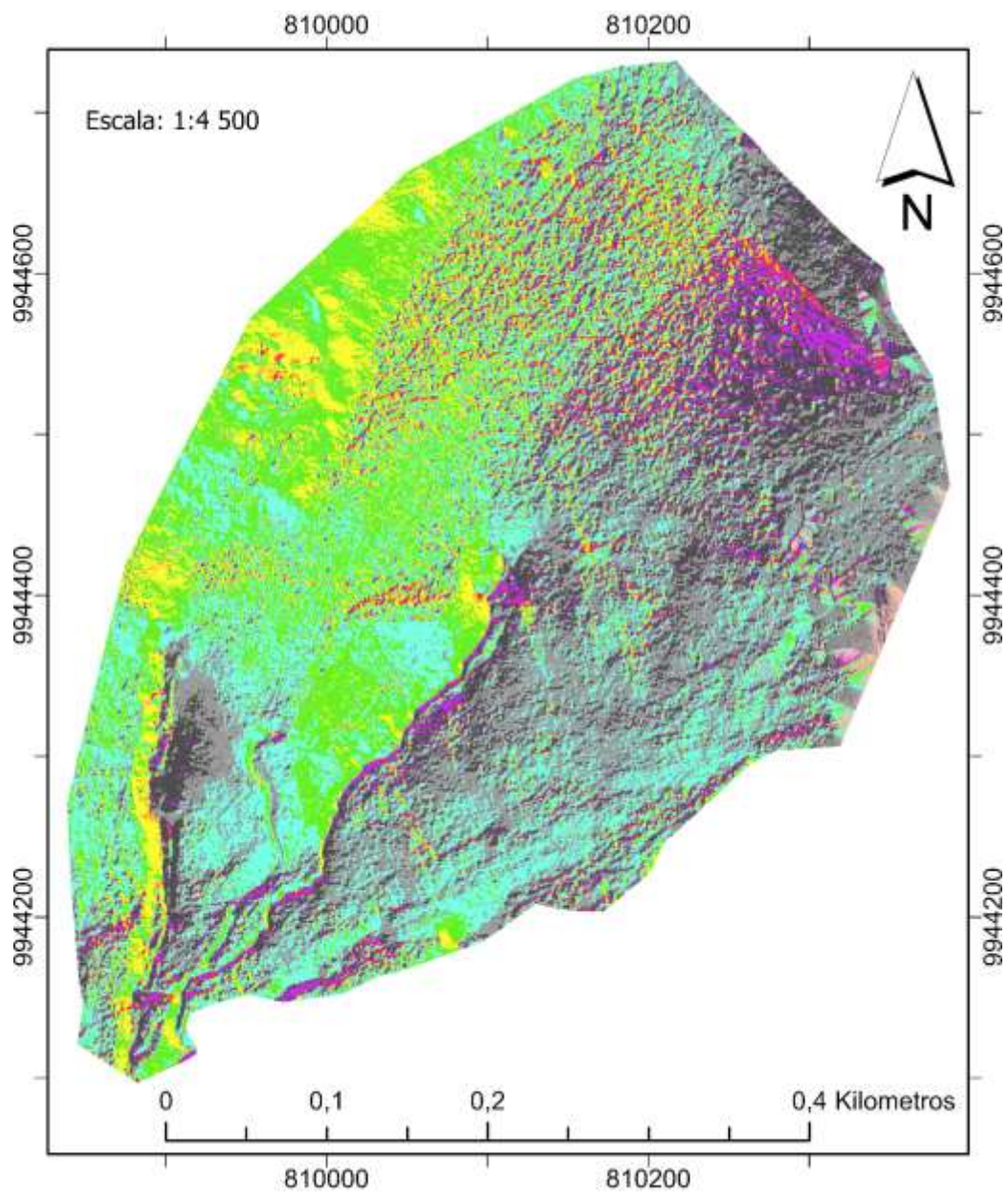
Figura 47 – Mapa de pendientes del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

La Figura 47, presenta el mapa de pendientes del terreno con un promedio general de pendiente del humedal de 4.07° lo cual lo cataloga como un “terreno suavemente inclinado” con alta capacidad de almacenamiento de agua. El terreno presenta una pendiente máxima de 87° , ubicado en la zona suroeste del terreno en las formaciones de cunetas y en el drenaje principal del humedal. En la mayor parte central del humedal se posee pendientes menores a los 2° catalogándolo como un “terreno plano o casi plano”, el bajo valor de la pendiente le provee de una alta capacidad de acumulación de agua. Las líneas entrecortadas en el mapa se deben a la irregularidad del terreno por la vegetación de almohadillas que genera estos relieves. Conforme se disminuye en altura dentro del humedal sus pendientes aumentan, debido a la formación del drenaje principal y cunetas. La denominación del tipo de pendiente se basada en la clasificación propuesta por (Van Zuidam, 1986).

4.2.3. Orientación del terreno

La Figura 48, presenta el mapa de orientación del terreno, el cual permite identificar dos patrones primordiales dentro del humedal: i) en la franja oeste del humedal su orientación apunta principalmente al sureste y este, lo cual genera el escurrimiento superficial hacia la parte central del humedal; ii) mientras que, la zona este del humedal se orienta al suroeste y sur principalmente, lo cual de igual manera genera que el escurrimiento superficial se dirija hacia la parte central y baja del humedal. El valor promedio de la orientación del terreno es $189,12^\circ$ (orientación sur) apuntado directamente hacia drenaje principal del terreno, cunetas y cotas de menor elevación.



Leyenda

Orientación terreno



Figura 48 – Mapa de orientación del terreno del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

4.2.4. Curvas de nivel

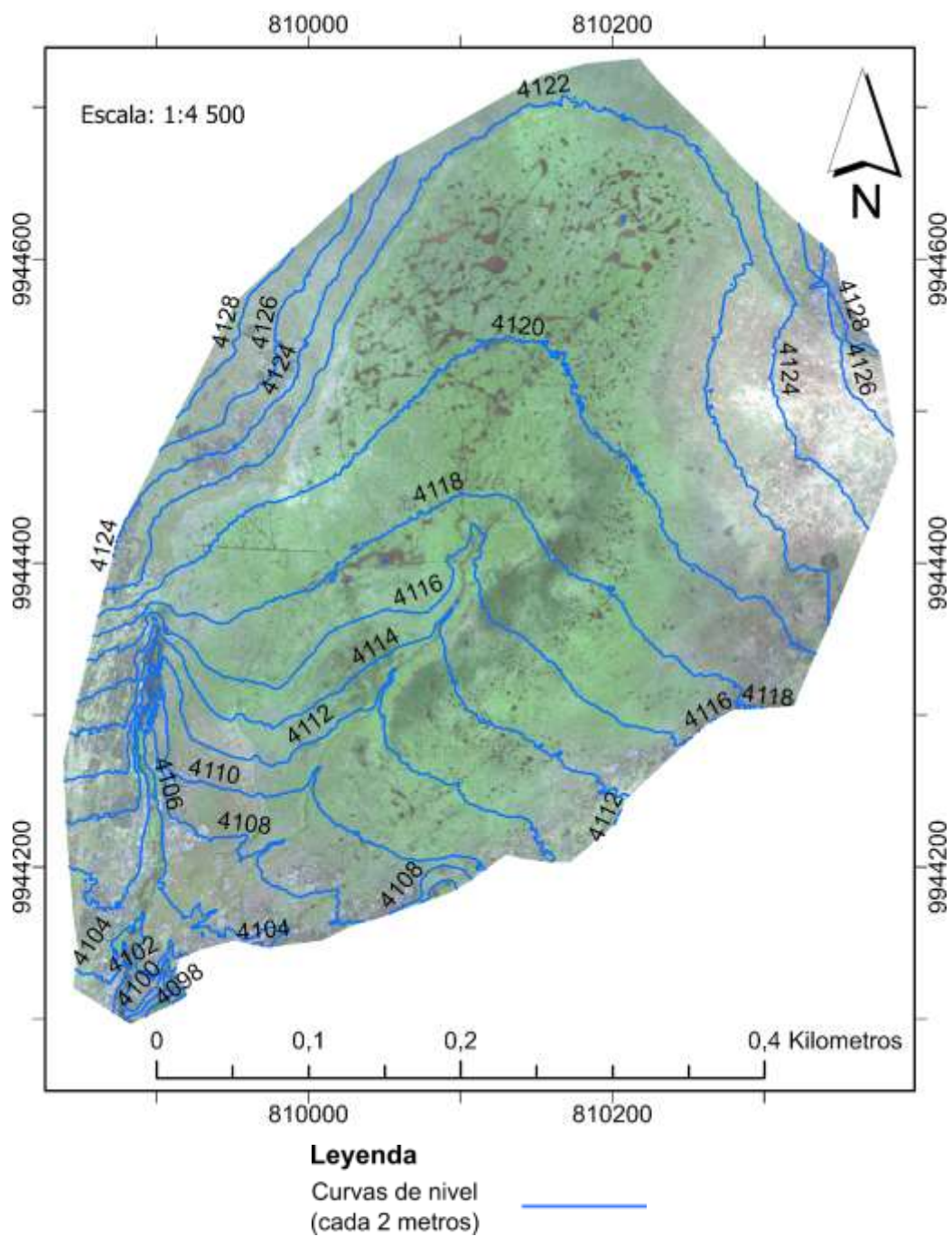


Figura 49 – Mapa de curvas de nivel del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

La Figura 49, muestra el mapa de curvas de nivel generadas cada 2 metros de altura. Las curvas de nivel son de suma importancia ya que nos permite analizar la

configuración altitudinal del humedal; por ejemplo, se identifica como las franjas periféricas del humedal permiten generar una cuenca en la parte central del humedal. Adicionalmente, las curvas de nivel permiten determinar zonas con bajo gradiente altitudinal, por ejemplo, para el área ubicada entre las cotas 4122m y 4120m presentan el menor gradiente altitudinal, lo cual favorece que esta área pueda mantener una alta capacidad de almacenamiento y lo cual se evidencia de igual manera en la existencia de los charcos.

4.2.5. Curvatura del terreno

La función de curvatura se emplea para visualizar la forma o curvatura de la pendiente del terreno, la función curvatura permite identificar los patrones de erosión y escorrentía en una cuenca de drenaje (Environmental Systems Research Institute, 2016d). La Figura 50 es el mapa de curvatura del terreno que no presenta mayor información o resultados significantes. Los rangos originales del mapa van de los 65356 hasta los -67193, con una desviación estándar sobre los 260. Por lo cual, se eliminaron los valores atípicos extremos, obteniendo un mapa de curvatura entre un rango de -196 a 263, no obstante, no se logra resaltar información característica del humedal, o relevante sobre la curvatura del humedal. Lo cual se debe a la alta resolución del DSM; no se recomienda el uso de la función curvatura en modelos digitales de elevación que posean una alta resolución y que posean una alta irregularidad en su superficie, ya que, con ello también aumenta la variabilidad del terreno y no permite identificar patrones de curvatura en el terreno. Cabe mencionar, que no se considera los resultados obtenidos por la función curvatura en el análisis topográfico del humedal.

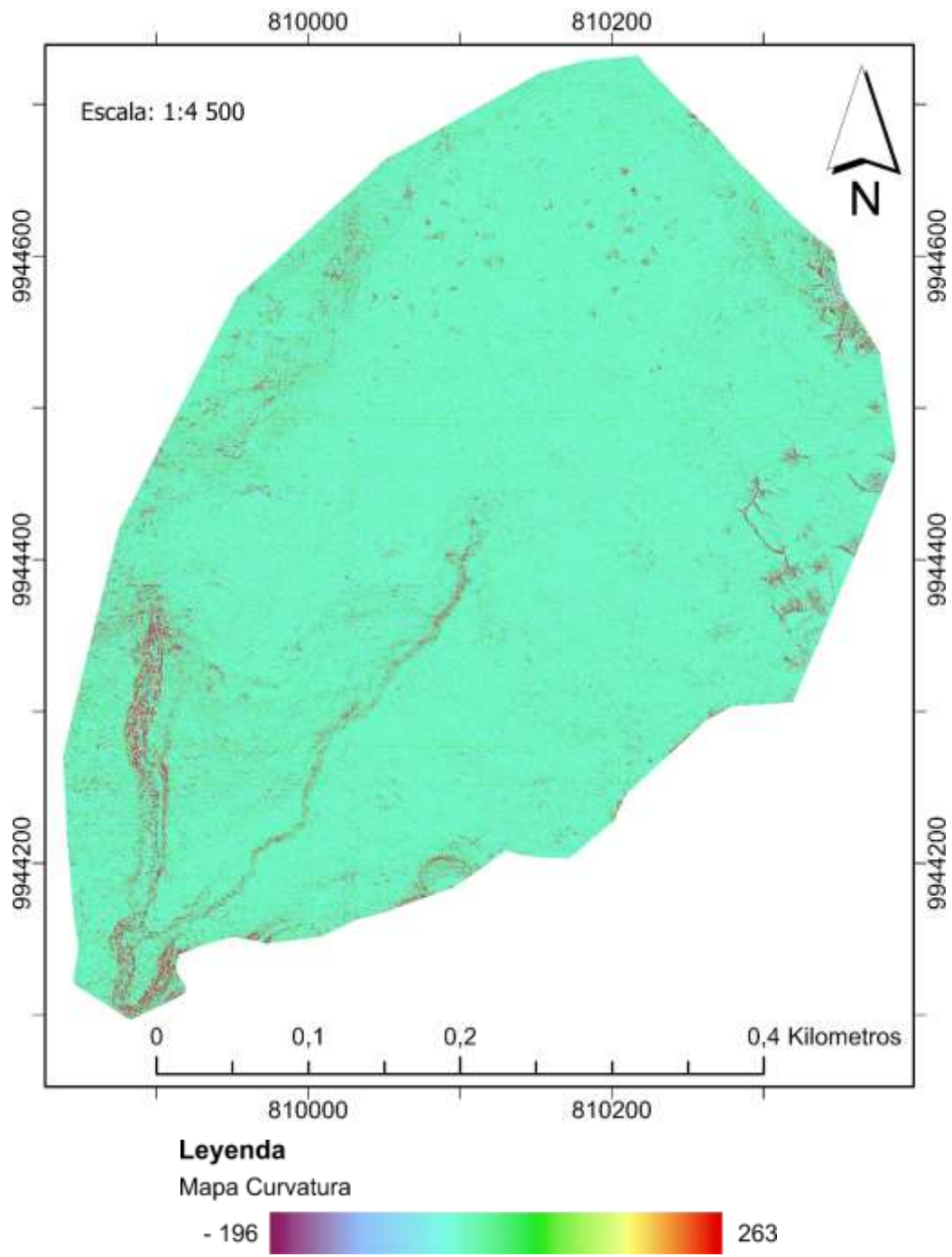


Figura 50 – Curvatura del terreno del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

4.2.6. Zonas de acumulación de agua

4.2.6.1. Ajuste de localización de piezómetros

Una vez cargada la información geográfica de los 18 piezómetros proporcionada por el FONAG, se evidenció que las ubicaciones reales de los piezómetros diferían en rangos de centímetros a un metro en todos los casos. Por ejemplo, se presenta en la Figura 51 al piezómetro número 2, ya que al poseer una franja circular sin vegetación se puede visualizar con mayor exactitud la localización del piezómetro. Cabe mencionar, que todos los 18 piezómetros tuvieron correcciones menores respecto a su geolocalización, como se muestra en la Figura 52. En el Anexo 2, se encuentran la ubicación ajustada de los 18 piezómetros y valores medidos en campo del nivel freático con sus respectivas alturas. El valor promedio de la profundidad del nivel freático obtenida a partir de los 18 piezómetros es de 19.3 cm, es decir, que el nivel freático se encuentra cercano a la superficie del suelo correspondiente a una estacionalidad lluviosa que se encontraba el humedal durante la medida de los piezómetros el 07 de noviembre 2019.



Figura 51 – Ajuste de geolocalización de piezómetro 2

Elaboración: propia

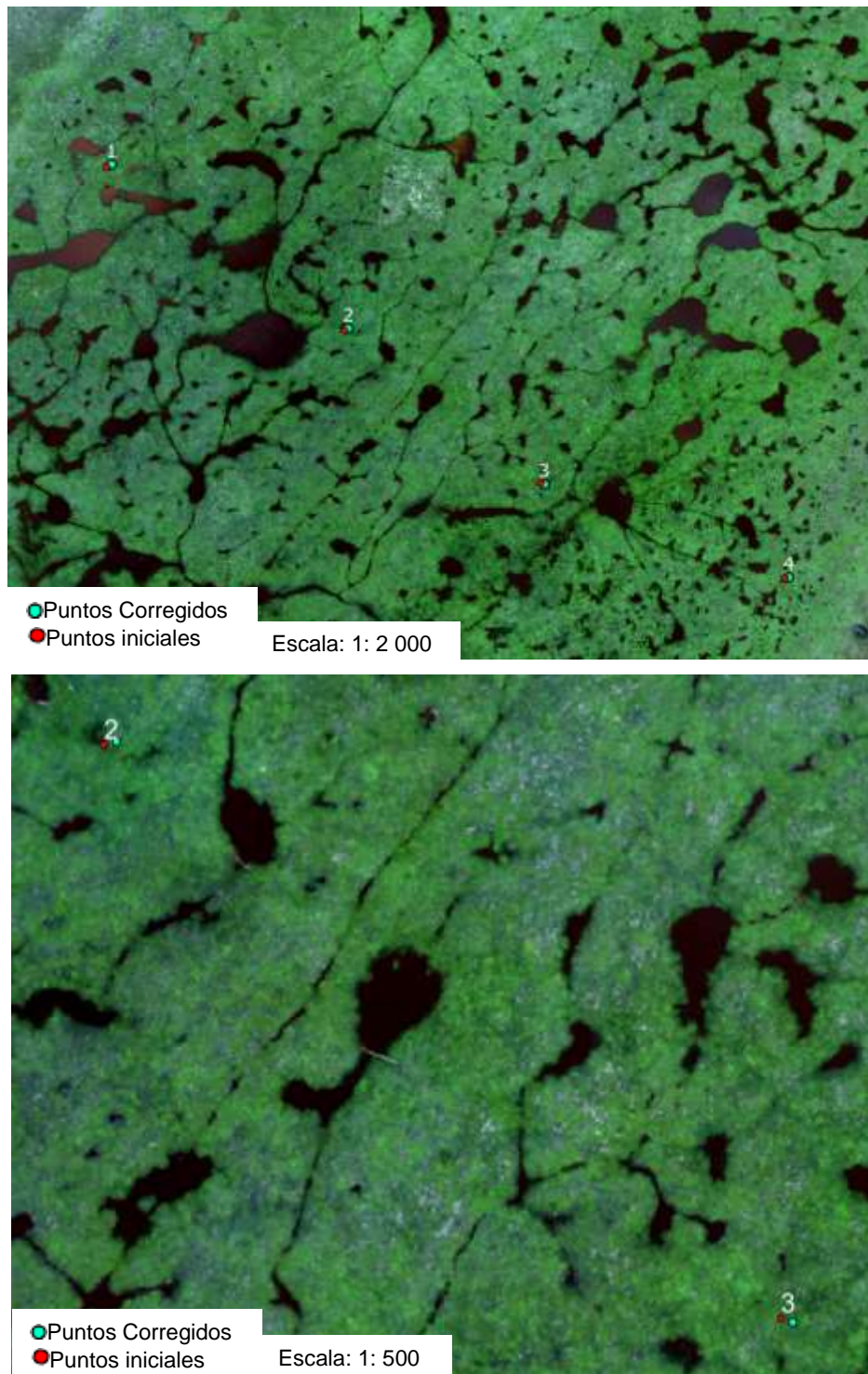


Figura 52 – Corrección de localización de los piezómetros

Elaboración: propia

4.2.6.2. Modelo digital de elevación del nivel freático

Los 18 piezómetros no abarcan al área total del humedal Puglllohuma, por lo que delimita el análisis de las zonas de acumulación de agua y el nivel freático a la parte central del humedal, como se muestra en la Figura 53. Para la elaboración del modelo digital de elevación (DEM) del nivel freático disponemos de varios métodos de interpolación en el software ArcGis Pro como: *Inverse Distance Weight (IDW)*, *Kriging*, *Tendency*, *Spline* y *Topo to raster*. Cada uno posee un diferente tipo de análisis de los valores de entrada y tienen diferentes aplicaciones. En este contexto, se analizaron las diferentes opciones y se verifica cual método de interpolación presenta los mejores resultados para la generación del nivel freático (Figura 54).

El método de interpolación IDW al priorizar los puntos de entrada genera una capa montañosa donde sobresalta los valores medidos, mientras que los métodos kriging y topo to raster brindan resultados similares sin embargo su gradiente de elevación no posee similitud con el DSM del terreno. La opción tendencia genera resultados lineales que pasan exactamente por los valores de entrada, sin embargo, no se asemeja a la topografía de la superficie. Mientras que, el método Spline se asemeja con mayor precisión al DSM del terreno. El método de interpolación "Spline" ajusta una superficie matemática por medio de los puntos de entrada minimizando las curvas cerradas, generando superficies que varían de manera uniforme, como las alturas de los niveles freáticos (Environmental Systems Research Institute, 2016c). Por lo cual, se seleccionó al método de interpolación "Spline" para la generación del DEM del nivel freático a partir de los datos tomados de los 18 piezómetros del humedal.

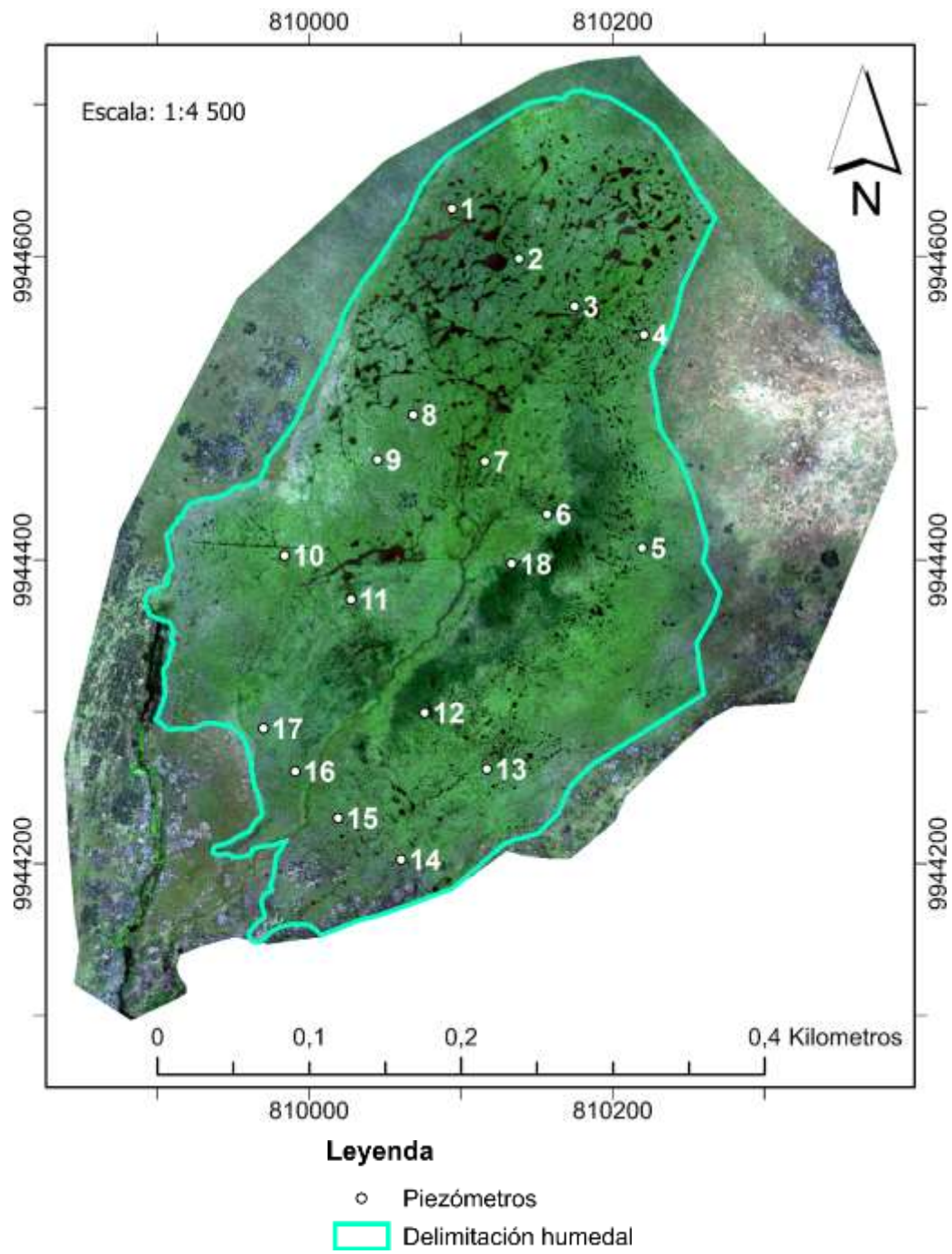


Figura 53 – Delimitación zona de estudio y ubicación de piezómetros

Elaboración: propia

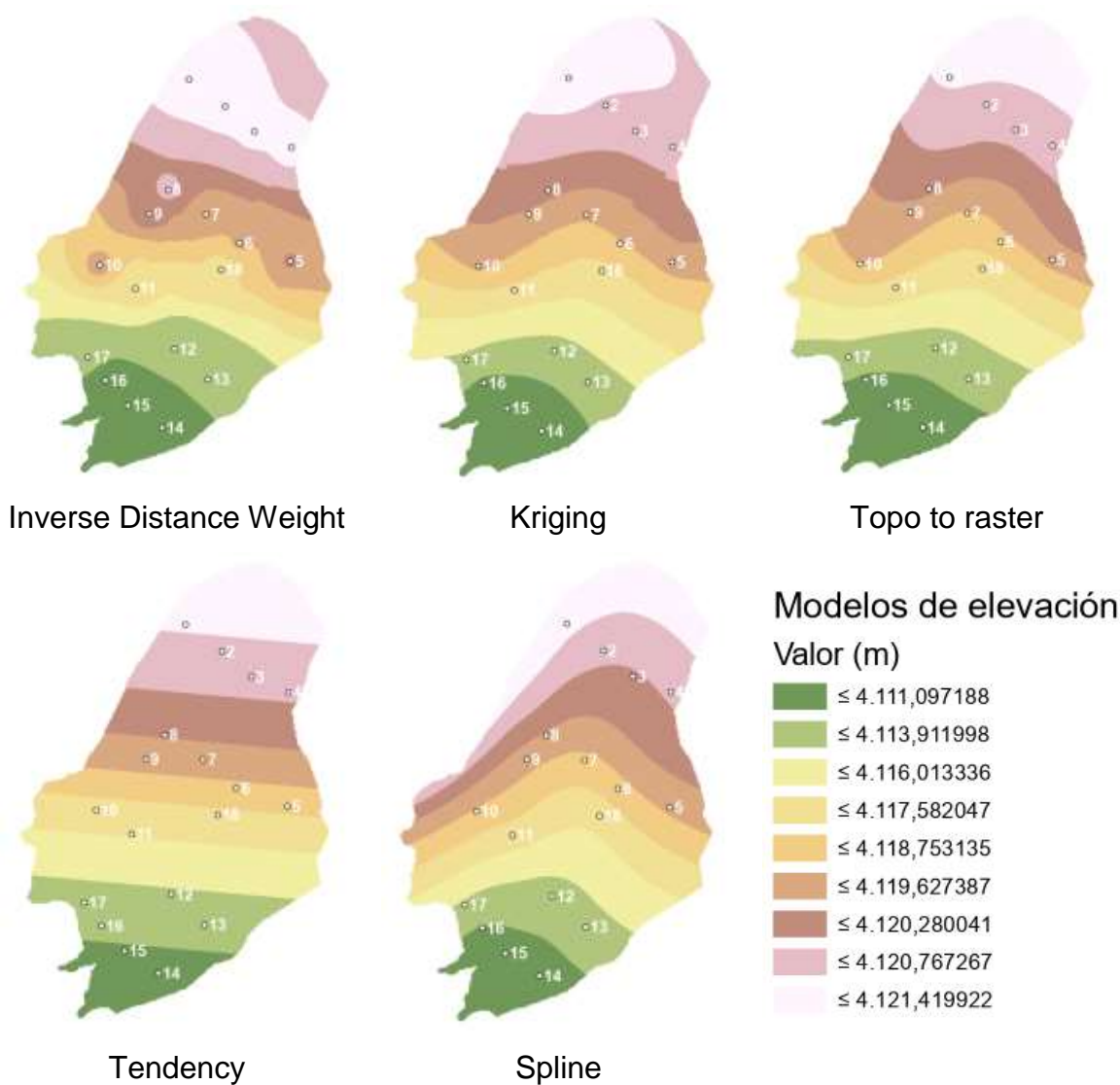
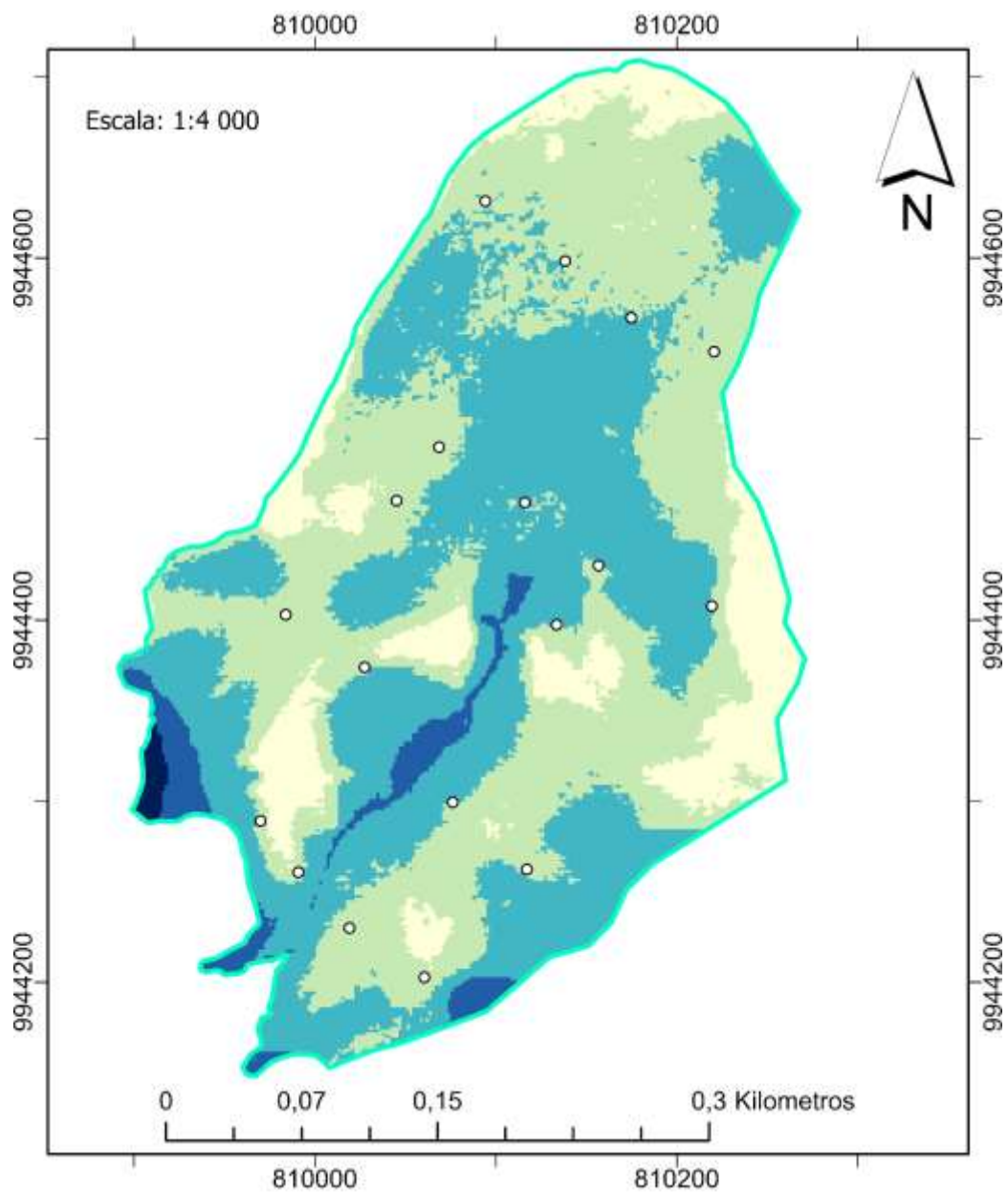


Figura 54 – Comparación de métodos de interpolación para generación de nivel freático

Elaboración: propia

4.2.6.3. Determinación de zonas de acumulación de agua

Con el fin de determinar las zonas de acumulación de agua, se calcula la diferencia entre el DEM del nivel freático obtenido mediante el método de interpolación Spline y DSM del humedal. Con la diferencia entre las dos superficies se determinarán las áreas con mayor proximidad entre el terreno y el nivel freático. Clasificando entre las zonas de menor y mayor capacidad de acumulación de agua en el DEM presentado en la Figura 55.



Leyenda

Zonas de acumulación de agua / DSM (Terreno) - DEM (Nivel Freático)

 1.34m → 0.50m (Baja acumulación)	 0.50m → 0.15m (Moderada acumulación)
 0.15m → 0.00m (Alta acumulación)	 0.00m → -4.00m (Sistema de drenajes)
 -4.00m → -7.00m (Quebrada)	 Delimitación humedal
	 Piezómetros

Figura 55 – Clasificación de zonas de acumulación

Elaboración: propia

Los resultados obtenidos se clasificaron en 5 categorías: i) 1.34m \rightarrow 0.50 m representa el 12.46% del área estudio y se define como áreas de baja capacidad del acumulación de agua; ii) 0.50m \rightarrow 0.15m representa el mayor porcentaje de cobertura 42.25% y posee una moderada capacidad de almacenamiento de agua; iii) 0.15m \rightarrow 0m con un porcentaje 41.62% de cobertura representa la zona con mayor capacidad de acumulación de agua en el terreno ya que el nivel freático se encuentra entre los 0.15m a 0m debajo de la superficie del terreno; las dos últimas categorías (0 m \rightarrow -4m y -4m \rightarrow -7m) poseen un 3.67% del área y representan a los sistemas de drenaje y quebrada o cunetas presentes en el humedal. La existencia de valores negativos se da a razón de dos motivos: la diferencia de alturas que posee el DSM del terreno (18.74m) y el nivel freático (10.32m) en el mismo tramo; y por la irregularidad del terreno que genera los valores negativos, por ejemplo, el drenaje principal del humedal y las cunetas existentes en los laterales de la parte baja del humedal generan los valores negativos.

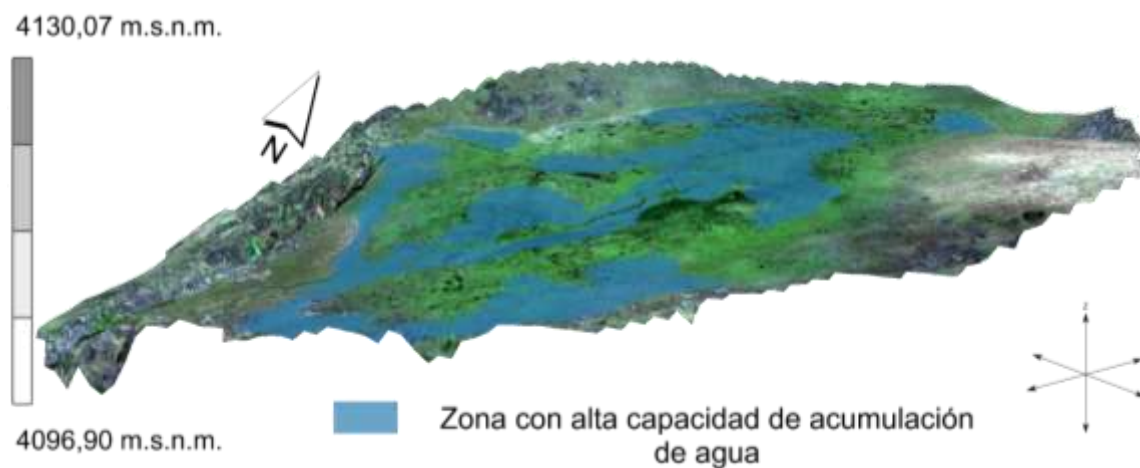


Figura 56 – Modelo 3D del humedal Pugllohuma y la zona de acumulación de agua

Elaboración: propia

La figura 56 se construyó a partir del DSM y el Ortomosaico RGB, obteniendo un modelo 3D del humedal Pugllohuma el cual se sobrepuso con la segunda categoría de zona de acumulación de agua (áreas donde el nivel freático se encuentra entre los 0.15m \rightarrow 0m). Se puede evidenciar que las zonas definidas de mayor acumulación se encuentran en la parte media alta del humedal, planicies y a lo largo del drenaje

principal. El porcentaje de cobertura para el caso de las zonas con alta acumulación de agua considerando el área total del humedal representa el 24,21%.

4.3. MAPAS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

4.3.1. Mapa NDVI

El índice espectral para la vegetación NDVI se define como la diferencia entre las bandas NIR y roja sobre la suma de las mismas como se muestra en la ecuación (1.1). Los valores estándar del índice varían teóricamente de 1 a -1, en donde valores bajos o negativos corresponden a vegetación muerta o suelo descubierto. La Figura 57 muestra el mapa NDVI en conjunto con el histograma ya que los valores obtenidos deben ser evaluados en función al histograma de píxeles para verificar la existencia de valores atípicos en el cálculo del NDVI que puedan alterar el verdadero rango del cálculo del índice espectral. Como se puede evidenciar, la mayoría de píxeles se encuentran a partir del valor 0.26 y existe un único valor negativo, el mismo que se considera como un valor atípico y se lo elimina del análisis cuantitativo. De igual manera se presenta de manera conjunta los histogramas de píxeles para todos los mapas y los mapas originales de todos los índices espectrales en el Anexo 3.

Adicionalmente, todos los mapas obtenidos del cálculo de los índices espectrales se ajustan a una clasificación de sus valores para realizar una evaluación cuantitativa del estado del humedal, en base a las clasificaciones obtenidas; se evalúa en la Figura 58 los diferentes métodos de clasificación de valores (cortes naturales Jenks, intervalos manuales, intervalos equivalentes, intervalos geométricos, cuantiles y desviación estándar) para el mapa NDVI. Los intervalos manuales nos permiten establecer clases estándar, aunque no resalta las puntos o áreas problema establecidos en salidas de campo previas; intervalos equivalentes y cuantiles al distribuir los datos en rangos de igual tamaño o igual área respectivamente no resaltan características propias del humedal; mientras tanto el método de desviación estándar no presenta mayor diferenciación entre la vegetación; los intervalos geométricos presentan buena diferenciación entre la vegetación sin embargo, no diferencia entre los drenes y vegetación de manera tan marcada como el método de cortes naturales Jenks. Mientras que, el método de cortes naturales Jenks, el cual identifica las rupturas de

clases considerando grupos con valores similares y maximiza las diferencias entre clases (Chen et al., 2013), facilita la diferencia entre la vegetación, drenes y áreas problema del humedal. En este sentido, se selecciona el método de cortes naturales Jenks para la clasificación de los valores en todos los mapas de índices espectrales calculados. Los rangos mencionados en cada mapa de índice espectral son los establecidos por el método de cortes naturales Jenks.

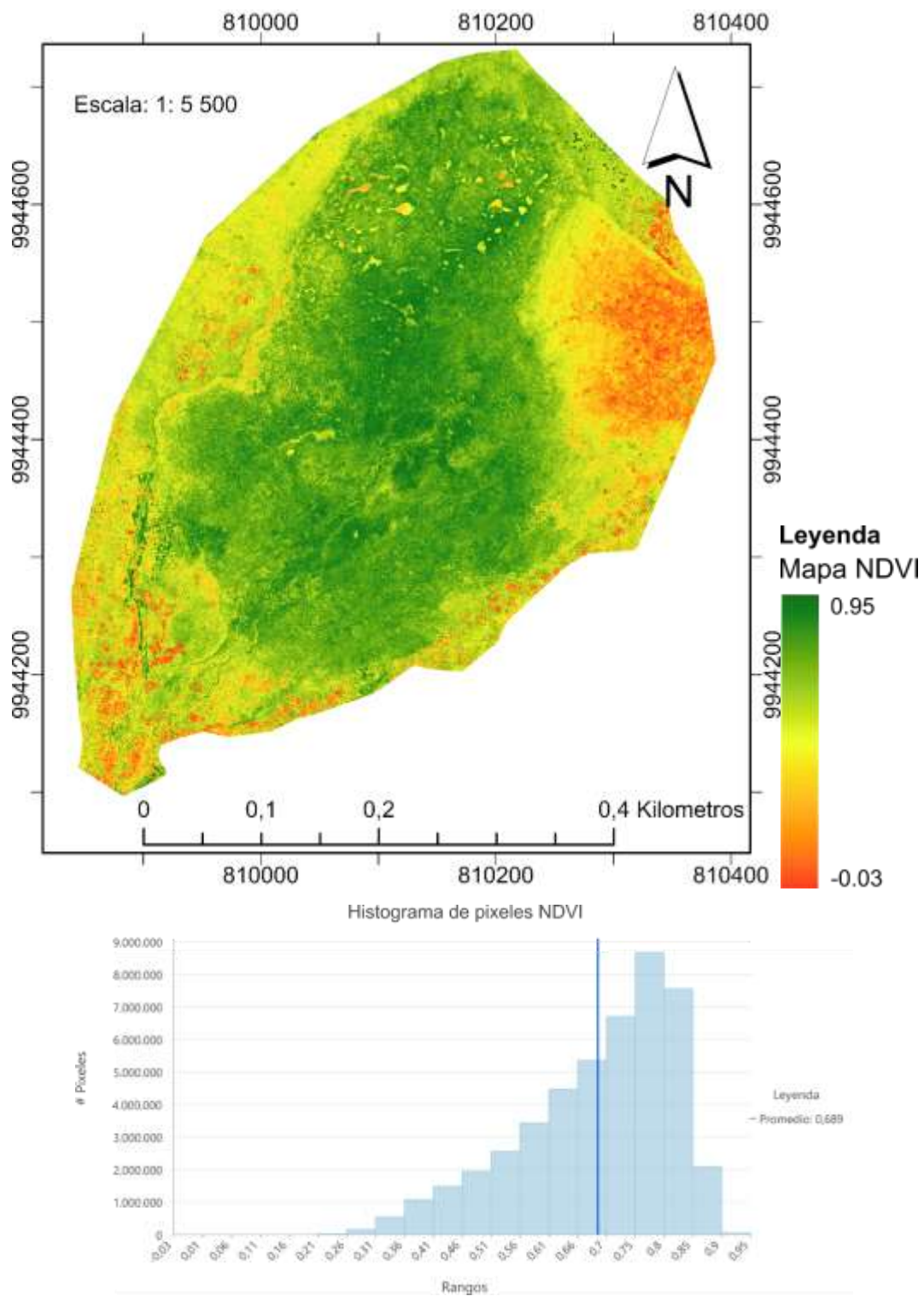


Figura 57 – Mapa e histograma de pixeles NDVI

Elaboración: propia

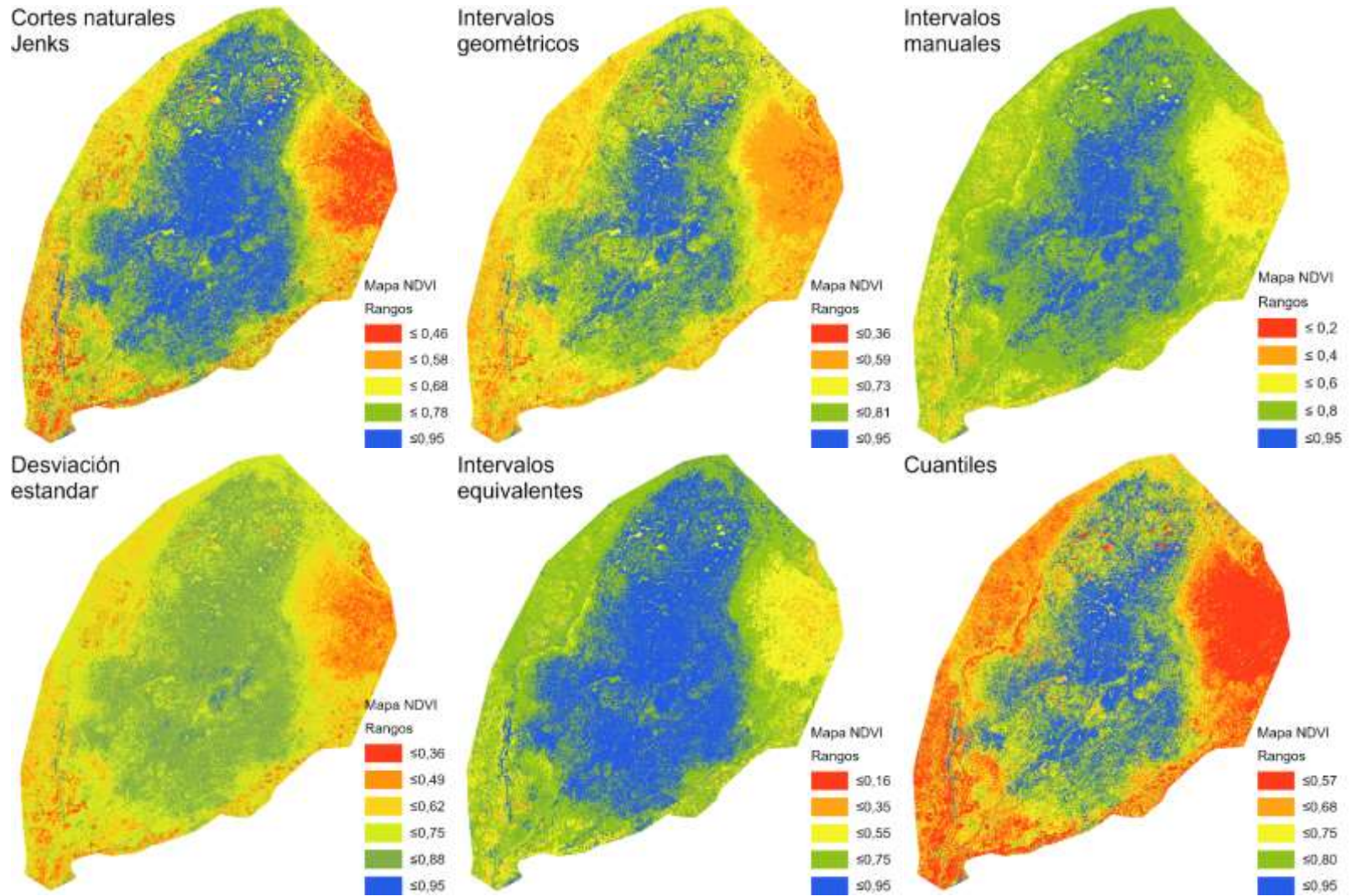


Figura 58 – Métodos de visualización de datos para el mapa

Elaboración: propia

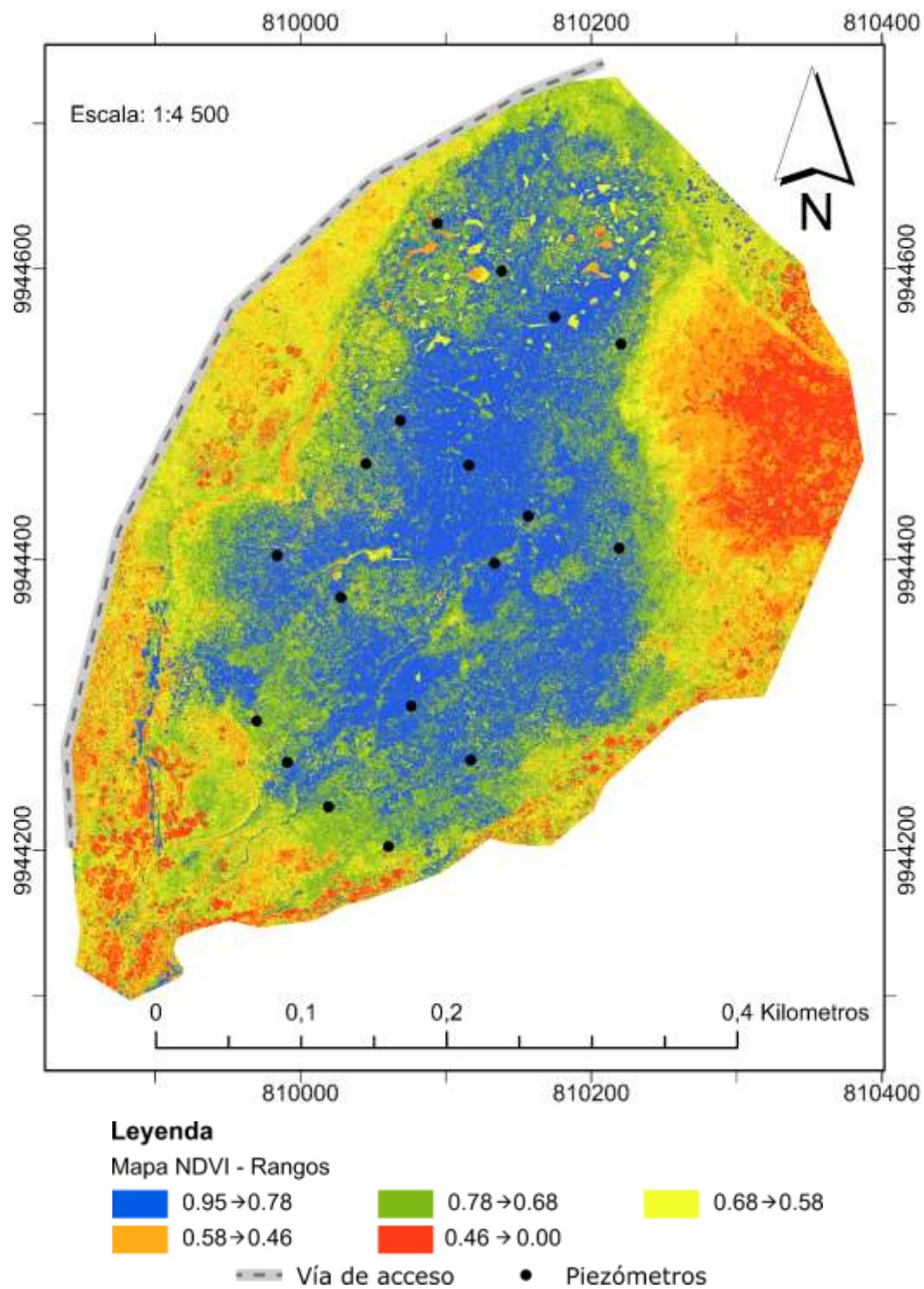


Figura 59 – Mapa NDVI por rangos del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Tabla 11 – Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa NDVI

Símbolo	Rangos	# Píxeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	0.95 → 0.78	14474707	68714.47	31.41	1
	0.78 → 0.68	12911028	61291.36	28.02	2
	0.68 → 0.58	9439058	44809.19	20.48	3
	0.58 → 0.46	5924900	28126.74	12.86	4
	0.46 → 0.00	3332454	15819.86	7.23	5
	Total	46082147	218761.63	100.00	

Elaboración: propia

La clorofila en una planta saludable absorbe la mayor parte de la luz visible roja, por lo cual su reflectancia es baja, y al mismo tiempo la estructura celular (células mesofílicas) de una planta saludable refleja en mayor parte la luz del infrarrojo cercano (NIR). Por lo tanto, la vegetación que posea un bajo valor de reflectancia de la luz roja y un alto valor de reflectancia en el NIR se considerara como vegetación en un buen estado de salud (Rubin, 2019). Esta relación es la que utiliza el NDVI para la determinación del estado de la vegetación. A mayores valores un mejor estado de la vegetación y viceversa. Adicionalmente al índice NDVI se lo considera como indicador de la estimación del verdor y de la densidad de la vegetación (Earth Observing System, 2019b). Esto quiere decir, que el NDVI en zonas con vegetación escasa tendrá valores bajos, mientras que a mayor densidad vegetativa se tendrá un mayor valor de NDVI. Figura 59, en las clases 1, 2 y 3 denotan una gran densidad vegetativa con valores mayores a 0.58 cubriendo el 79.43% del área total del humedal y de igual manera denotan un gran contenido de clorofila, es decir, que se encuentran en buen estado las plantas. Cabe indicar que el NDVI denota claramente la existencia de cuerpos de agua, sin embargo, la coloración del agua no es uniforme en todos los charcos. Teóricamente, el agua debería poseer valores negativos, en casos donde el agua posee bajos contenidos de sólidos totales, lo cual no corresponde al presente caso de estudio donde el agua posee una coloración marrón denotando la presencia de sólidos. La clase 4, cubre los alrededores del humedal en conjunto con la clase 5 que denotan una franja en la parte oeste del humedal de Werneria seca o en estado de estrés o

envejecimiento. La clase 5 corresponde en su mayoría a una vegetación dispersa de *Leprocaulon*, los bajos valores se deben al encontrarse en una zona de transición hacia la parte húmeda del humedal (Tabla 11).

4.3.2. Mapa GCI

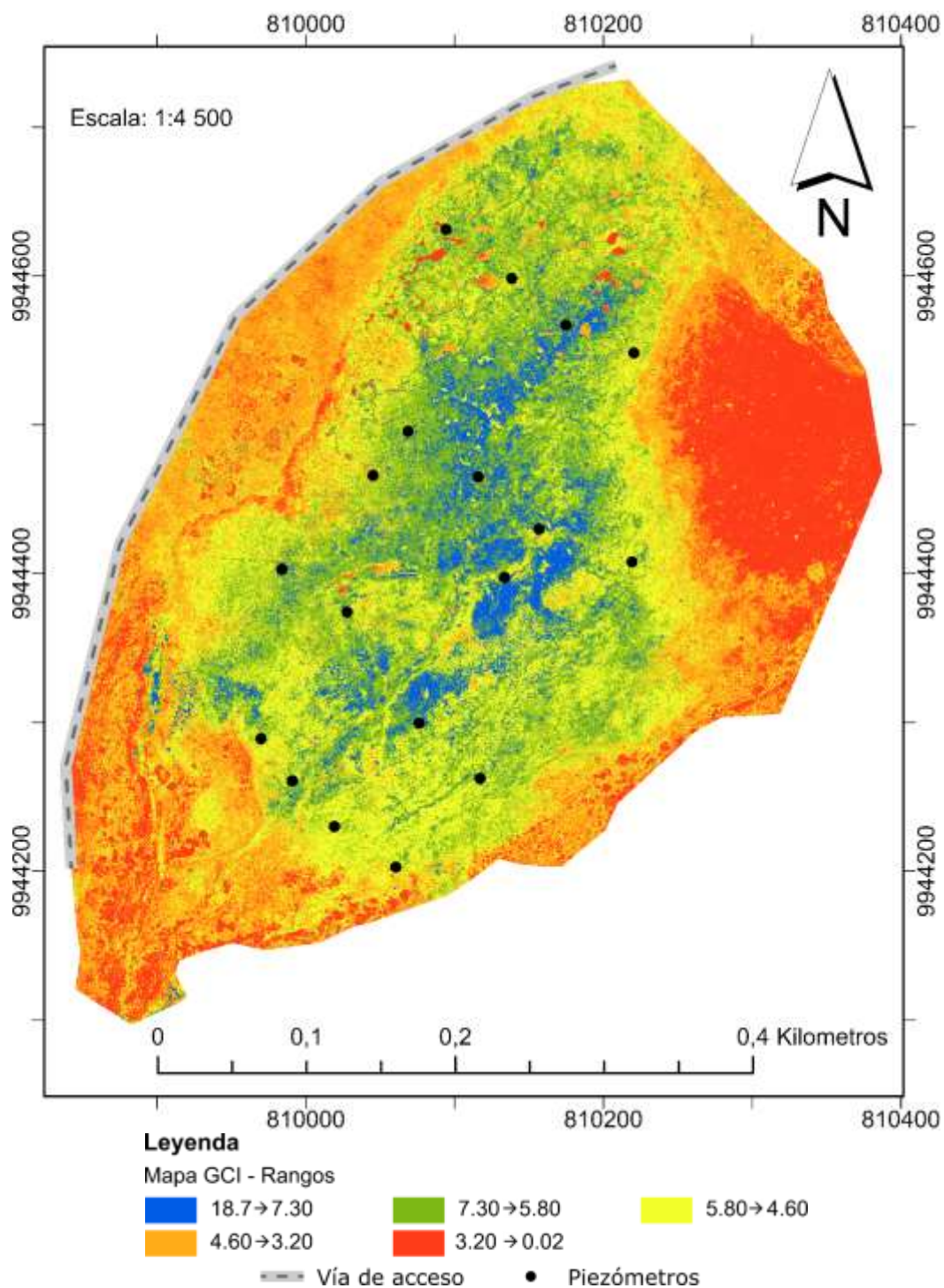


Figura 60 – Mapa GCI por rangos del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Tabla 12 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa GCI

Símbolo	Rangos	# Pixeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	18.7 → 7.30	2998422	14234.14	6.51	1
	7.30 → 5.80	10133529	48105.99	21.99	2
	5.80 → 4.60	13160916	62477.63	28.56	3
	4.60 → 3.20	11887984	56434.76	25.80	4
	3.20 → 0.02	7901310	37509.18	17.15	5
	Total	46082161	218761.70	100.00	

Elaboración: propia

El índice de clorofila verde (GCI) es implementado para estimar el contenido de la clorofila en las hojas y nitrógeno para varias especies de plantas (Schlemmera et al., 2013). Es un índice considerado muy sensible a las variaciones en el contenido de clorofila, se lo suele aplicar en estudios de monitoreo para evaluar el impacto de la estacionalidad, estrés ambiental o para evaluar la aplicación de pesticidas (Earth Observing System, 2019a). A diferencia del NDVI el GCI es mucho más sensible a la concentración de la clorofila ya que la luz verde no se absorbe fácilmente por la planta lo cual le permite tener una evaluación más precisa al contenido de clorofila. Los mayores valores se dan cuando la reflectancia del NIR es alta, lo cual se da cuando la planta se encuentra en un buen estado y la luz verde es escasamente reflejada.

Como se puede ver en la Figura 60, el GCI identifica de manera más precisa las zonas con mayor contenido de clorofila y por lo tanto las zonas con un mejor estado de salud. Mientras que la clase 1 del NDVI establece un área de 31,41% del humedal que se encuentra en buen estado, el GCI establece que la clase 1 posee un 6,51% del humedal, es decir, el GCI establece zonas más específicas con un alto contenido de clorofila que el NDVI. Cabe recalcar que la clase 1, corresponde a la vegetación más cercana a los drenajes (vegetación húmeda) y denota claramente a la vegetación *Distichia*. Además, diferencia notoriamente los cuerpos de agua dentro del humedal. Las clases 4 y 5 cubren las periferias del humedal (zona de transición), estableciendo al 42.95% del humedal con un bajo contenido de clorofila (Tabla 12).

4.3.3. Mapa NDRE

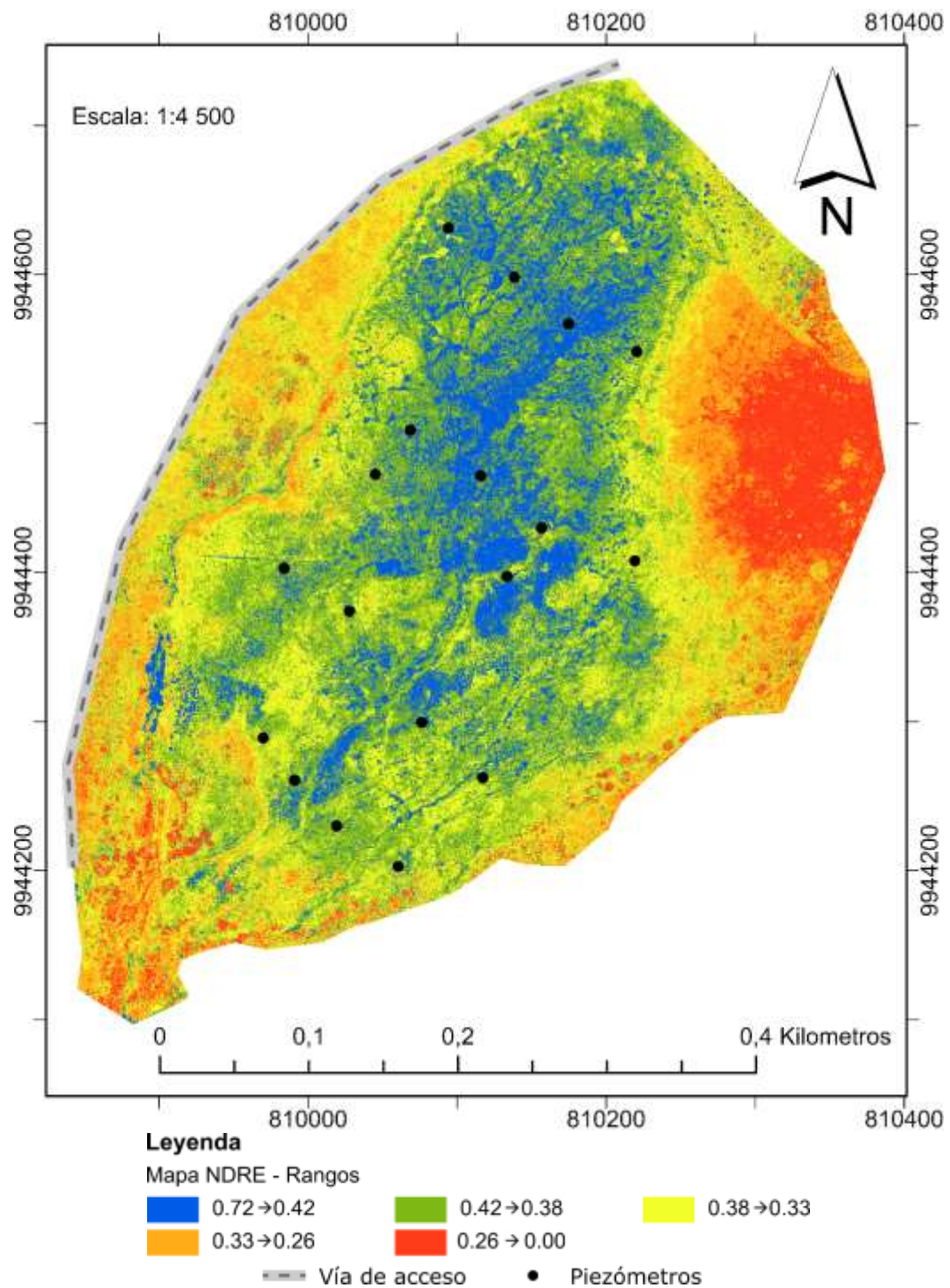


Figura 61 – Mapa NDRE por rangos del humedal Pugllahoma

Elaboración: propia

Tabla 13 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa NDRE

Símbolo	Rangos	# Píxeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	0.72 → 0.42	7172544	34049.57	15.56	1
	0.42 → 0.38	15016843	71288.11	32.59	2
	0.38 → 0.33	12777232	60656.20	27.73	3
	0.33 → 0.26	7264534	34486.27	15.76	4
	0.26 → 0.00	3850886	18280.96	8.36	5
	Total	46082039	218761.12	100.00	

Elaboración: propia

El NDRE se establece como la relación entre la diferencia de las bandas NIR y borde rojo (BR) sobre su suma, es un índice calculado en el infrarrojo. El uso de la banda del BR es una banda de transición en donde las plantas absorben una gran cantidad de luz en el espectro visible (banda roja) a la banda del infrarrojo (NIR) en donde la mayor parte de la luz se refleja debido a la estructura interna de la hoja. Como la luz del borde rojo no es absorbida por los pigmentos de la clorofila como la luz roja, esta puede penetrar más profundamente en la planta y nos brinda una idea más completa de la vegetación no solo de su capa externa (Rubin, 2019). Adicionalmente, el NDRE es menos propenso a la saturación en presencia de una vegetación densa, por lo cual puede dar una mejor muestra de la variabilidad en una misma área (Sentera, 2019).

El NDRE al igual que el GCI es más sensible que el NDVI al contenido de clorofila y denota en la Figura 61 una zona similar al GCI en los píxeles de mayor valor. A diferencia del GCI y el NDVI, el NDRE no define claramente los cuerpos de agua del humedal. Esto responde principalmente a los altos niveles de sólidos en el agua, que proveen a los cuerpos de un mayor valor de reflectancia en el borde rojo provocando que se confunda con la vegetación. En la Tabla 13, las clases superiores (1, 2 y 3) corresponden a la vegetación con mayor contenido de clorofila, con mayor humedad y los cuerpos de agua; mientras tanto, las clases 4 y 5 poseen gran similitud con las clases 4 y 5 del NDVI ubicadas en las periferias del humedal (zona de transición).

4.3.4. GNDVI

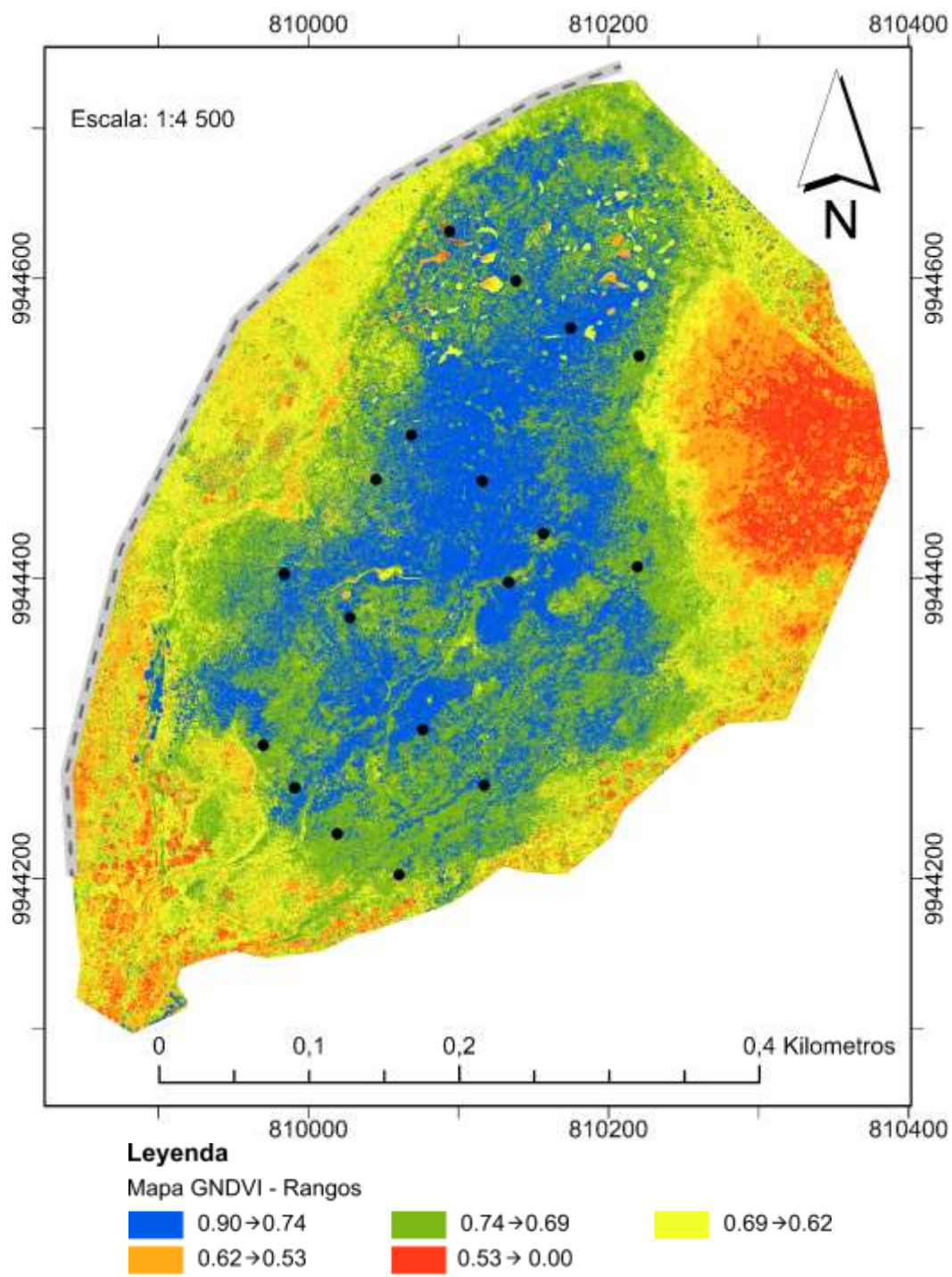


Figura 62 – Mapa GNDVI por rangos del humedal Puglllohuma

Elaboración: propia

Tabla 14 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa GNDVI

Símbolo	Rangos	# Píxeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	0.90 → 0.74	11473574	54467.47	24.90	1
	0.74 → 0.69	15928159	75614.32	34.56	2
	0.38 → 0.33	10201078	48426.66	22.14	3
	0.33 → 0.26	5665182	26893.81	12.29	4
	0.26 → 0.00	2814168	13359.45	6.11	5
	Total	46082161	218761.70	100.00	

Elaboración: propia

El GNDVI es más sensible a la variación del contenido de clorofila en la planta que el NDVI (Calo, 2018). Es similar al NDVI, pero al usar la banda verde la determinación en el contenido de clorofila es más precisa. En la Figura 62, se presenta el mapa GNDVI del humedal y presenta una gran similitud con el mapa del NDVI (Figura 59). Como se esperaba el GNDVI es más sensible al contenido de clorofila presente en las plantas, por lo cual, en la Tabla 14 la clase 1 del GNDVI (24.90%) es menos extensa que la clase 1 (31.41%) del NDVI. De igual manera que el NDVI se puede visualizar los cuerpos de agua, pero sus valores no son negativos como correspondería teóricamente.

4.3.5. Mapa de cobertura de suelo para vegetación

Como parte del análisis cuantitativo del humedal Pugllohuma se evalúa el valor promedio de cada índice de vegetación en función al tipo de cobertura del suelo. En este sentido, el FONAG brindó un mapa base del tipo de cobertura de suelo del humedal Pugllohuma, elaborado en el 2019. El mapa original provisto por el FONAG ha sido modificado con respecto al grupo de los cuerpos de agua puesto que en la clasificación original este grupo poseía una menor cobertura. Además, se creó una clasificación adicional denominada "Márgenes de agua" ya que en análisis previos se identificó que los valores de los márgenes de agua y los cuerpos de agua diferían notoriamente en la mayoría de los casos (Figura 63). La Tabla 15 señala cada tipo de cobertura de suelo, su área y porcentaje de cobertura dentro del humedal.

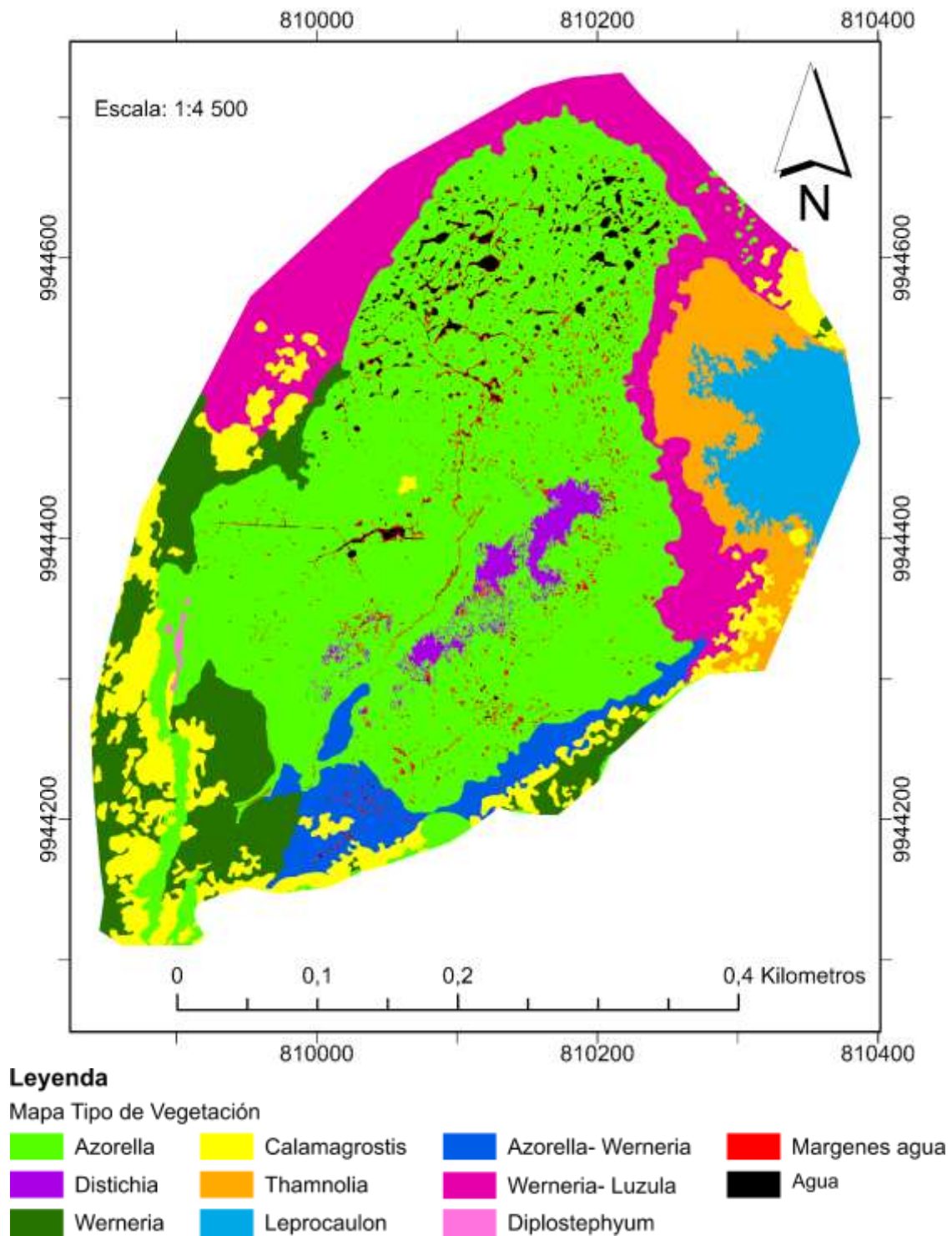













Figura 63 – Mapa de cobertura suelo del humedal Pugllohuma

Modificado de: (Ortiz & Toapanta, 2019)

Tabla 15 – Tipos de vegetación en el humedal Pugllohuma y su cobertura de área

Simbología	Tipo vegetación	Área (m²)	Porcentaje
	Azorella	107 768.13	49.33%
	Werneria - luzula	29 575.80	13.54%
	Werneria	19 736.44	9.03%
	Calamagrostis	18 339.63	8.39%
	Thamnolia	11 876.70	5.44%
	Leprocaulon	10 973.09	5.02%
	Azorella- Werneria	8 619.97	3.95%
	Distichia	3 810.95	1.74%
	Diplostephyum	234.64	0.11%
	Márgenes agua	4 567.31	2.09%
	Agua	2 964.88	1.36%
	Total	218 467.538	100.00%

Elaboración: propia

Para el análisis cuantitativo de cada índice en función de cada tipo de cobertura se recortó cada mapa de los índices espectrales por el tipo de cobertura mediante la herramienta “Clip raster” y se obtuvo el valor promedio y la desviación estándar de cada tipo de cobertura. Como se muestran en la Figura 64, ejemplos de los recortes de los índices por el tipo de cobertura. En Tabla 16, se presentan los valores promedio de cada índice y desviación estándar para cada tipo de cobertura y posterior se muestran gráficos de columnas por cada índice (Figura 65 → Figura 68).

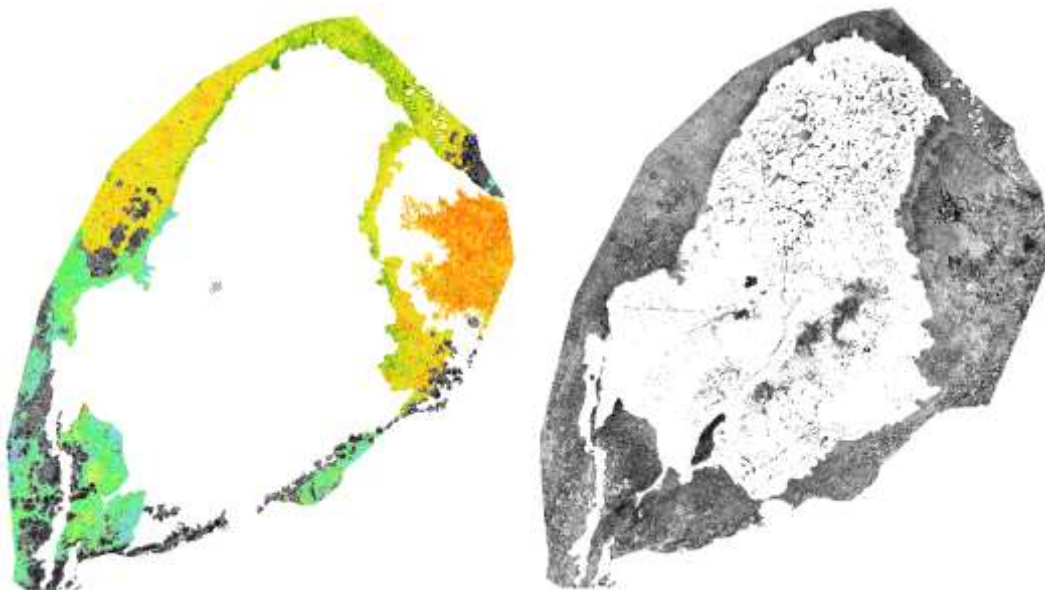


Figura 64 – Recorte de índices espectrales de vegetación por tipo de cobertura

Elaboración: propia

Tabla 16 – Valores medios y desviación estándar de los índices de vegetación por tipo de cobertura

Tipo Vegetación	Área (m ²)	Características	NDVI		GCI		NDRE		GNDVI	
			\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²
Humedal	223,967.54	-	0.689	0.131	4.859	1.642	0.365	0.064	0.690	0.082
Azorella	109,768.13	Almohadilla Densamente agrupada	0.769	0.076	5.815	1.195	0.394	0.039	0.737	0.045
Werneria - Luzula	30,575.80	Formación mixta Sin suelo desnudo	0.647	0.077	4.145	0.830	0.350	0.039	0.669	0.044
Werneria	20,736.44	Dispersa Resistente	0.632	0.095	3.910	0.896	0.346	0.046	0.653	0.055
Calamagrostis	19,339.63	Pajonal Resistente	0.557	0.133	3.543	1.118	0.321	0.062	0.625	0.074
Thamnolia	12,376.70	Resistente Suelo arcilloso	0.542	0.074	2.839	0.615	0.283	0.037	0.580	0.051
Leprocaulon	10,973.09	Liquen folioso Suelo arcilloso	0.438	0.077	2.089	0.527	0.226	0.036	0.504	0.057
Azorella- Werneria	8,619.97	Formación mixta Cojines	0.700	0.087	4.900	1.049	0.374	0.041	0.703	0.049
Distichia	3,810.95	Bien drenada Musgo	0.829	0.053	7.730	1.165	0.436	0.039	0.789	0.036
Diplostephyum	234.64	Quebrada Forma cuerpo de agua	0.705	0.122	5.668	1.650	0.410	0.059	0.726	0.062
Margen agua	4,567.31	Húmedo Almohadilla Azorella	0.763	0.054	6.307	1.200	0.445	0.037	0.754	0.036
Agua	2,964.88	Poca profundidad Rodeado por Azorella	0.630	0.067	4.013	0.923	0.443	0.046	0.659	0.054

Elaboración: propia

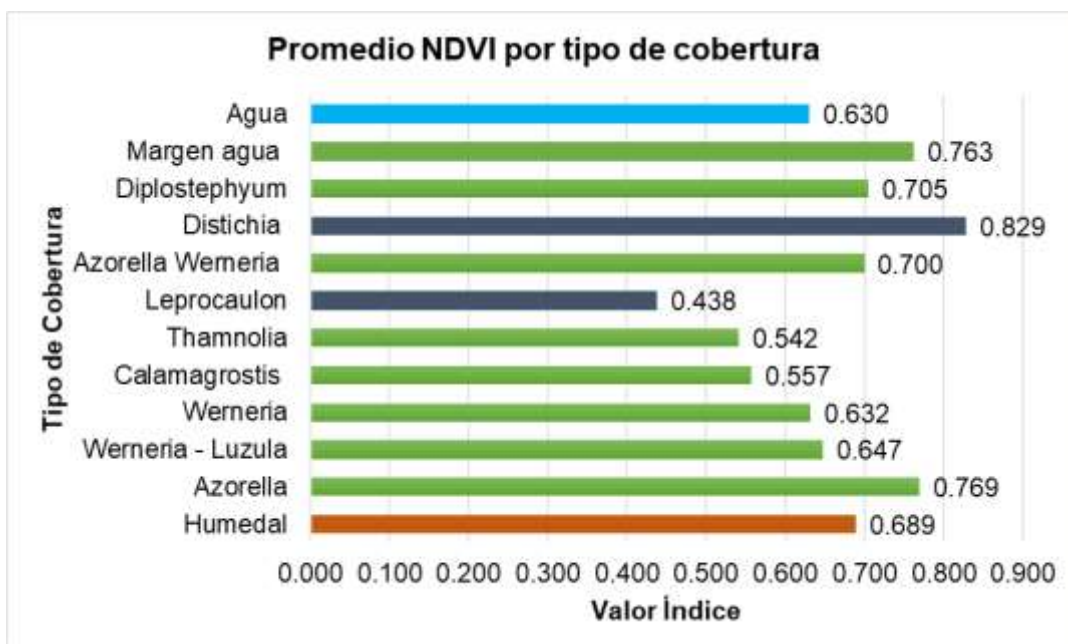


Figura 65 – Valores NDVI por tipo de cobertura

Elaboración: propia



Figura 66 - Valores GCI por tipo de cobertura

Elaboración: propia

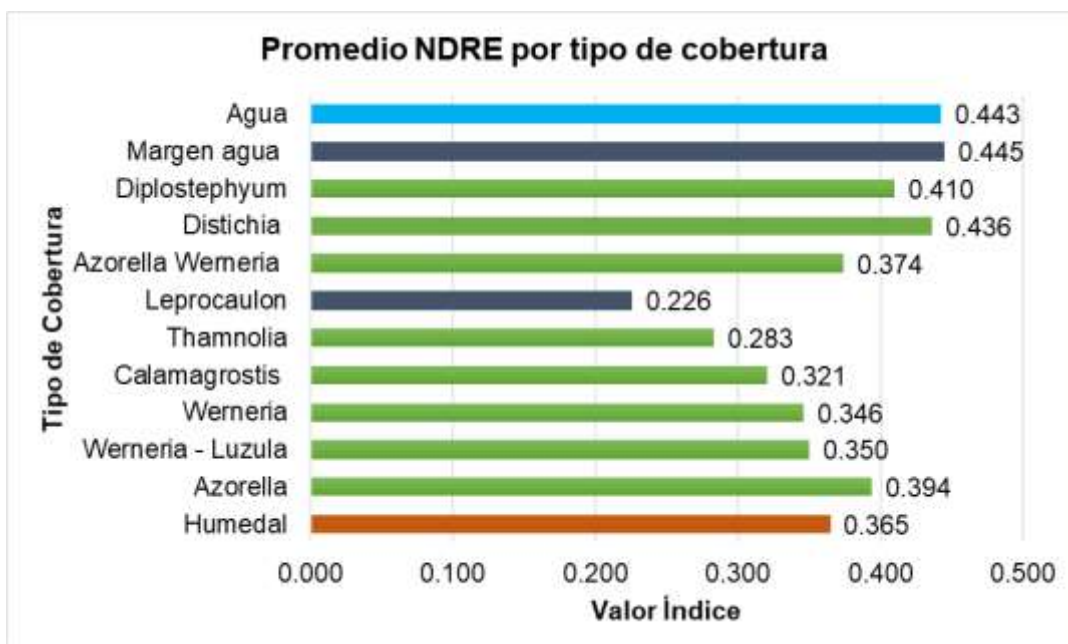


Figura 67 - Valores NDRE por tipo de cobertura

Elaboración: propia

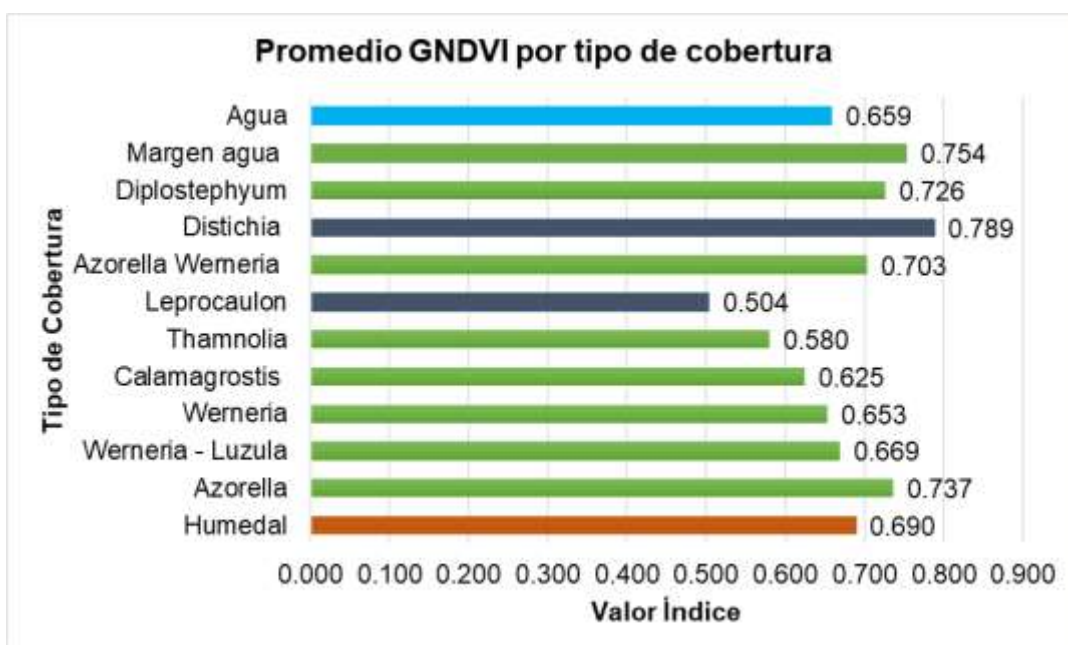


Figura 68 - Valores GNDVI por tipo de cobertura

Elaboración: propia

Figura 65, los mayores valores del NDVI corresponden a la zona central del humedal (Azorella, Distichia y márgenes de agua) mientras que el menor valor se da para el Leprocaulon; los cuerpos de agua poseen valores cercanos al tipo de vegetación Werneria. Para la Figura 66, se presentan los valores del GCI resaltando al tipo de vegetación Distichia con mayor contenido de clorofila y de la misma manera determina al Leprocaulon como la vegetación con menor contenido de clorofila; el agua presenta valores similares a vegetación dominada por Werneria y se resalta una diferencia importante entre el agua y sus márgenes. A diferencia del GCI y NDVI, en la Figura 67, los valores del NDRE para el agua superan al tipo de cobertura Azorella y Distichia; sin embargo, se mantiene al Leprocaulon como el tipo de cobertura con el valor más bajo. Los valores del GNDVI, Figura 68, presenta un comportamiento similar al NDVI con sus más altos valores a la zona central del humedal (Distichia, margen de agua y Azorella) y al Leprocaulon como su tipo de cobertura con el menor valor; de igual manera el agua presenta mayor similitud a la vegetación dominada por Werneria y una diferencia marcada con Distichia y Leprocaulon.

Concluyendo, el tipo de cobertura Distichia se presenta como la vegetación con mejor estado de salud para todos los índices, con excepción del NDRE. Para todos los casos se obtuvo que la cobertura de márgenes de agua posee mayores valores que la cobertura Azorella, es decir, que a mayor humedad se tendrá un mayor valor del índice espectral. Mientras tanto, el tipo de cobertura Leprocaulon presento los valores más bajos para todos los índices seguido por Thamnolia. Con respecto los cuerpos de agua estos presentan valores altos en todos los casos y poseen valores muy cercanos al tipo de vegetación Werneria. La diferencia marcada en los valores obtenidos por el NDRE se debe principalmente, al uso de la banda de borde rojo y los cuerpos de agua con alto contenido de sólidos totales lo cual provoca los valores elevados en el agua y márgenes de agua.

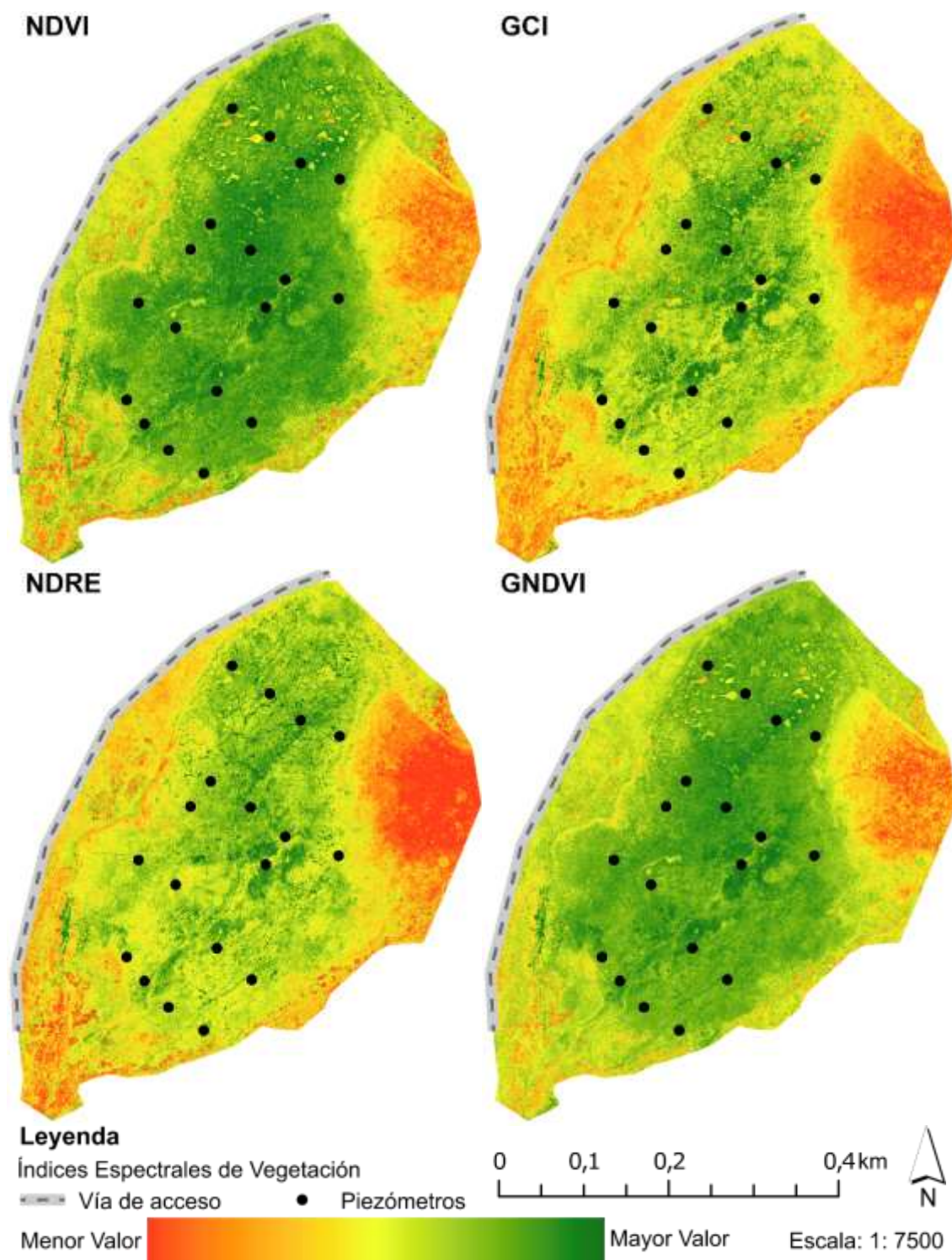


Figura 69 – Comparación de índices de vegetación sin ajuste para el humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Se presenta en la Figura 69, una comparación entre los mapas originales de los índices espectrales de vegetación calculados. El NDVI permite diferenciar de manera más clara los cuerpos de agua y el estado de la vegetación que el GNDVI, a pesar de presentar valores similares. Mientras que el GCI y NDRE al ser dos índices especializados en estimar el contenido de clorofila, presentan mejores resultados en distinguir la diferencia de clorofila en la zona central del humedal que el NDVI O GNDVI, sin embargo, el NDRE no distingue los cuerpos de agua de manera adecuada debido al uso de la banda del borde rojo. Adicionalmente, la Figura 70 expone a mayor detalle las diferentes respuestas de los índices espectrales en relación al mapa RGB del humedal. Los índices espectrales permiten evaluar características imperceptibles a simple vista sobre el estado del humedal, sin embargo, los cuerpos de agua pueden llegar a tomar valores similares de la vegetación circundante. En general, los índices NDVI (Figura 70B) y GCI (Figura 70C) resaltan de mejor manera los diferentes tipos de cobertura y su estado. A pesar que el NDVI en zonas con una alta densidad vegetativa no diferencia en gran detalle el estado de la vegetación. Mientras que, el GCI nos ayuda a identificar a mayor detalle el estado de salud entre la vegetación. Por su parte el NDRE (Figura 70D) brinda los mayores valores a los cuerpos de agua y genera confusión entre la determinación de la vegetación y los sistemas de drenaje. El GNDVI (Figura 70E) presenta similar respuesta que el NDVI (Figura 70B), sin embargo, el NDVI presenta una mayor diferenciación entre su superficie que el GNDVI.

La Figura 71, presenta las superficies con mayores valores (clases 1 y 2 de la categorización de datos presentado en las tablas 11, 12, 13 y 14) para cada índice espectral de vegetación. Las dos clases superiores representan la vegetación con mejor estado de salud, mayor verdor y/o mayor contenido de clorofila. Para el caso del NDVI y GNDVI se obtienen las superficies de mayor cobertura (130 005 m² y 130 081 m² respectivamente), las cuales cubren en su mayoría a la parte central del humedal y periferias del humedal excluyendo a las zonas cubiertas por *Thamnia* y *Leprocaulon*. El NDRE presenta similar distribución de superficie que el NDVI y GNDVI, pero con una menor extensión (105 337 m²) y la principal diferencia que incluye a los cuerpos de agua presentes en la parte central del humedal. Para el caso

del GCI se obtiene la menor área (62 340 m²), localizada específicamente dentro de la parte central del humedal debido a que discrimina sus mayores valores a las superficies con mayor contenido de clorofila.

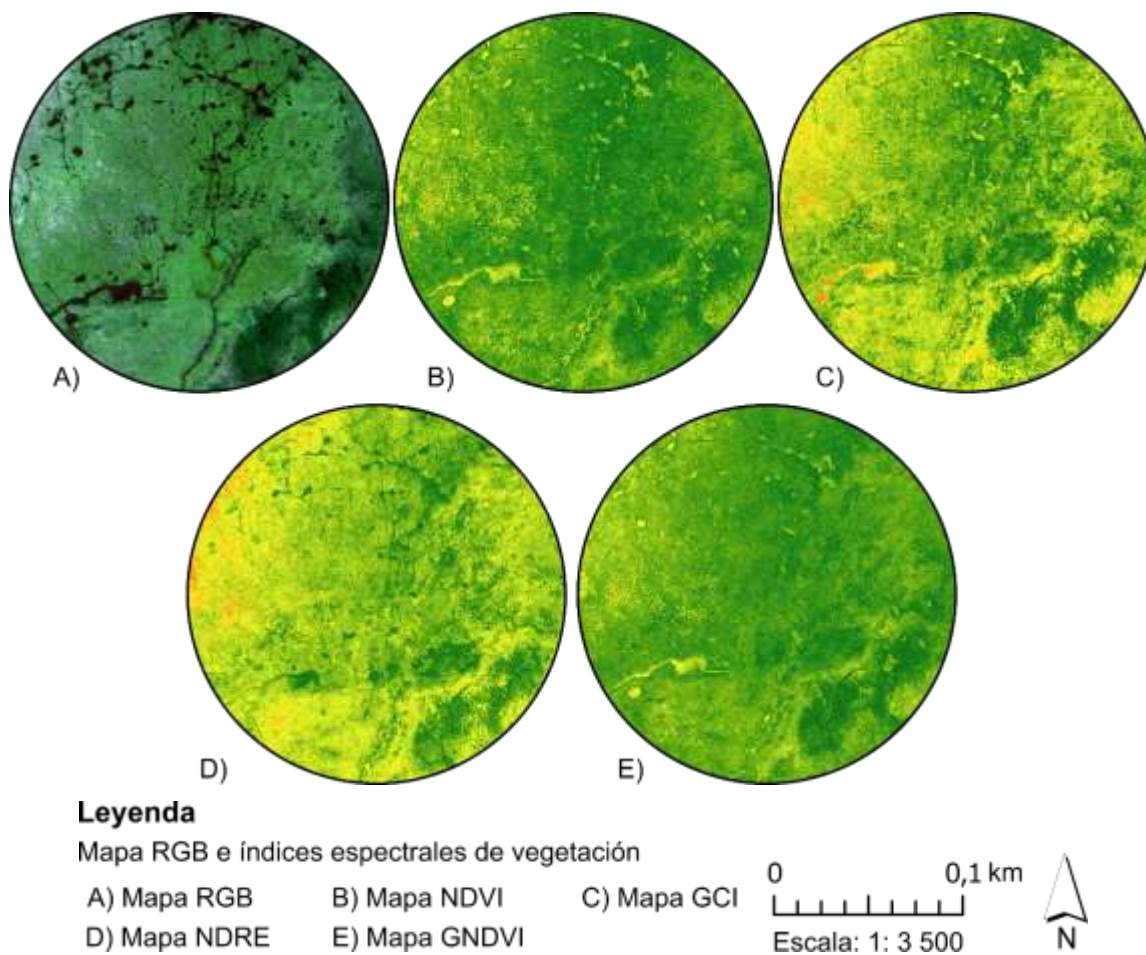


Figura 70 - Comparación de detalles específicos de índices de vegetación y mapa RGB

Elaboración: propia

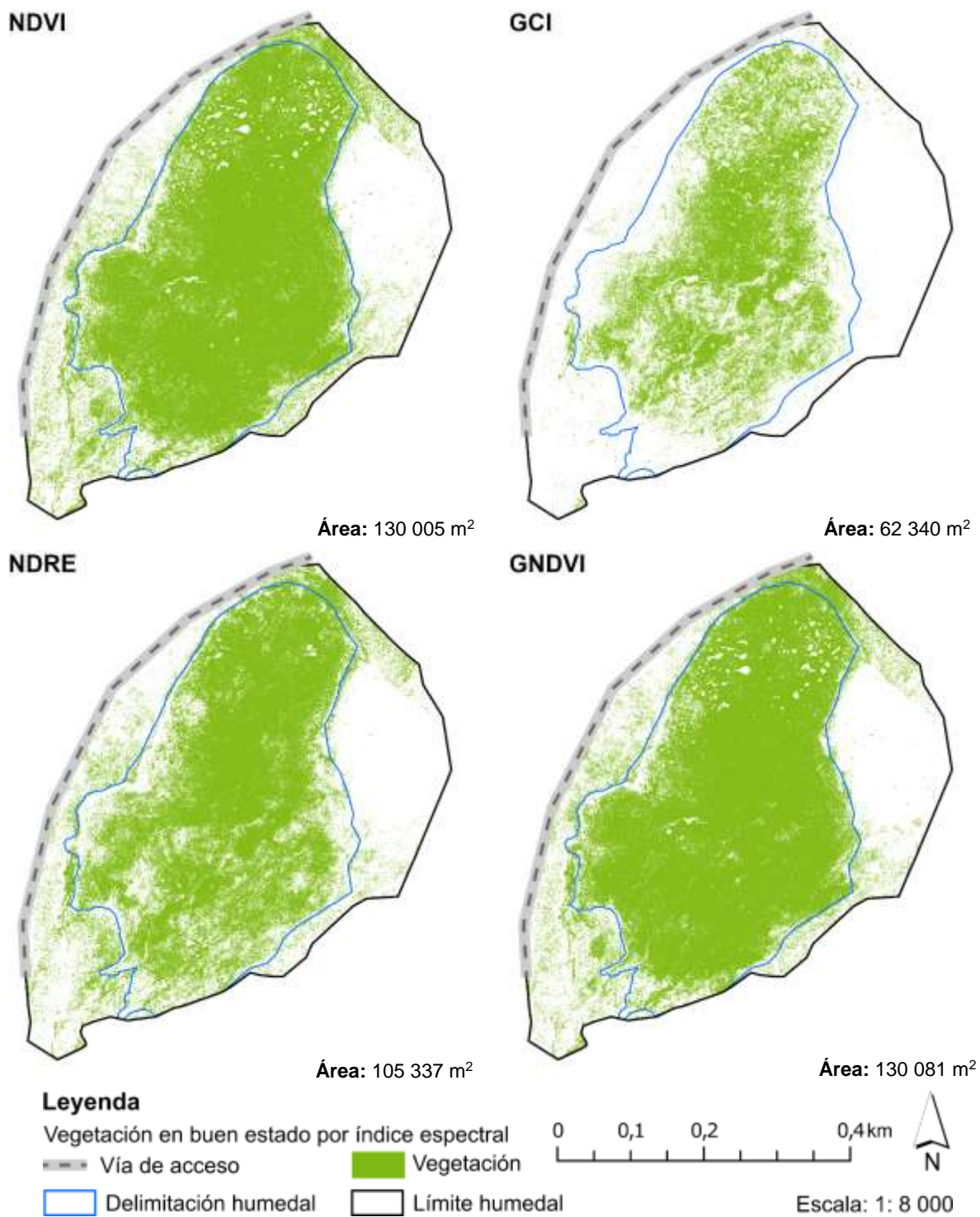


Figura 71 – Área de vegetación en buen estado por índice espectral

Elaboración: propia

4.3.6. Mapa de Transectos de vegetación

El FONAG en el año 2016, realizó un estudio de línea base sobre la abundancia, riqueza diversidad y dominancia a través de 6 transectos de vegetación ubicados a lo largo del humedal. Los 6 transectos están divididos en dos grupos principales: i) 3 transectos de 50 metros de longitud con metodología de punto intercepto “método empleado para determinar la estructura y composición de una formación vegetal y está basado en la posibilidad de registrar las plantas presentes o ausentes sobre un punto del suelo” (Mostacedo & Fredericksen, 2000, p.16). ii) 3 transectos de 30 metros con 5 cuadrantes de (1x1) m² en cada transecto. Cada tres años el FONAG realiza el monitoreo de dichos transectos de vegetación para observar la variabilidad a nivel de especie en el humedal. Con el objetivo de verificar si especies con mayor tolerancia a la humedad van aumentando o disminuyendo en el humedal, y constatar si las prácticas de restauración empleadas están siendo efectivas.

En este contexto, se plantea evaluar dichas variables obtenidas en campo (abundancia, riqueza, diversidad y dominancia) con los índices espectrales de vegetación calculados en el presente proyecto. En los 3 primeros transectos de 50 m la recolección de datos se obtuvo por medio de la metodología, punto intercepto, la cual establece puntos específicos de registro de plantas y no un área definida con la cual se pueda evaluar los índices espectrales. A diferencia de los tres transectos de 30 m en donde la recolección de datos se dio en cuadrantes definidos de 1m² de área, en la cual se puede evaluar los índices espectrales de vegetación. Por lo cual, la evaluación de los datos en campo (abundancia, riqueza, diversidad y dominancia) y los índices espectrales de vegetación se establece solamente para los transectos de 30m.

En la Figura 72, se presentan las ubicaciones de los tres transectos de 30 m y la disposición de sus cuadrantes de 1m² cada uno. Además, en la Tabla 17, se presenta los valores obtenidos el 18 de mayo del 2019 por el FONAG de abundancia, riqueza, diversidad y dominancia para los tres transectos de vegetación de 30m. La Figura 73, grafica los valores de riqueza, abundancia, dominancia y diversidad por transecto, en donde el T3 presenta mayor riqueza y abundancia a los demás transectos ya que no existe dominancia de una sola especie como se encontró en T1 y T2 con *Plantago*

rigida (Chimbolema & Ramírez, 2019); por otra parte, la diversidad presente en los transectos T1 y T2 es considerada baja, mientras que el T3 posee una diversidad media según el índice de Shannon, lo cual de igual manera se debe a la dominancia en los transectos T1 y T2 de *Plantago rigida*.

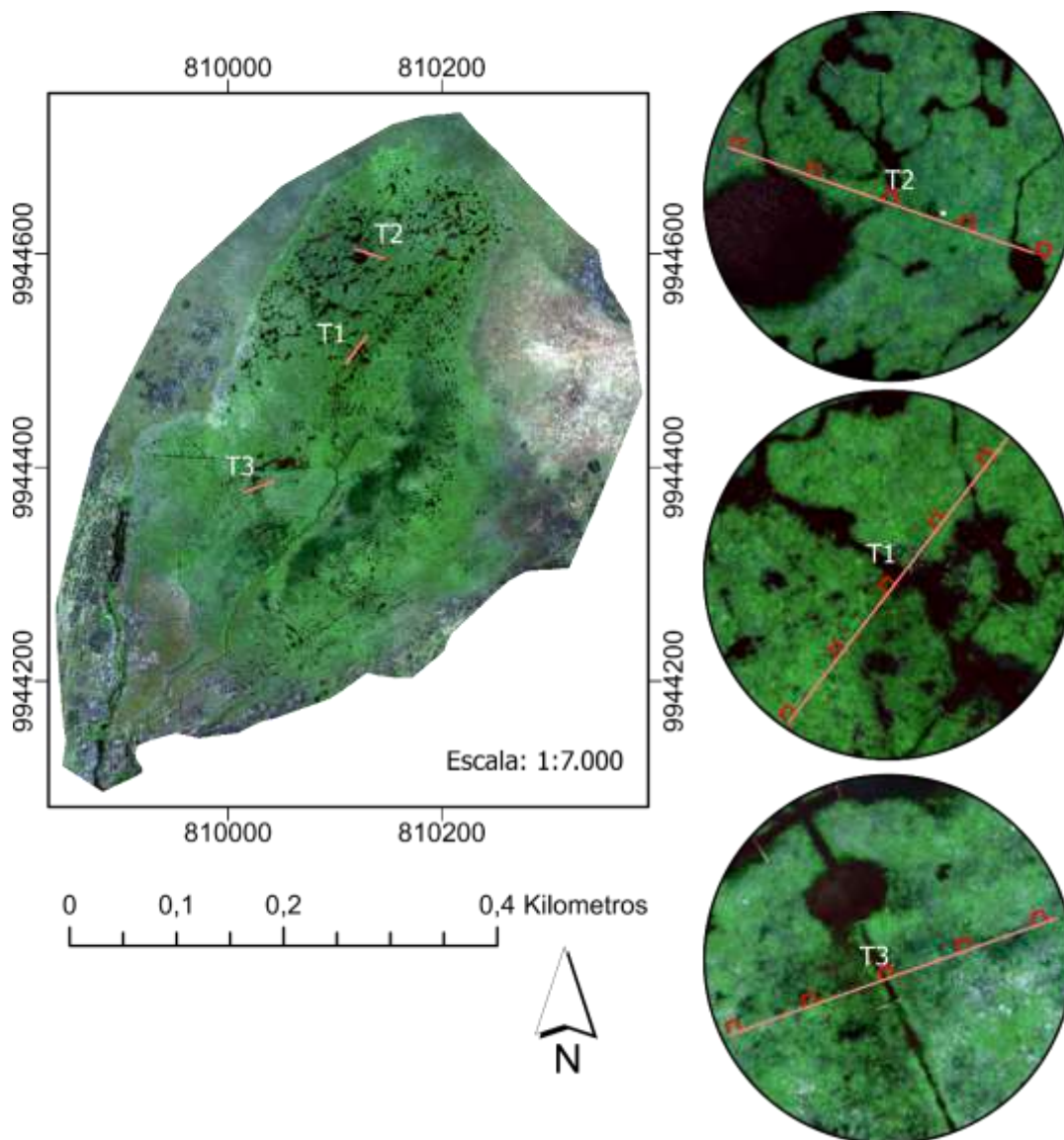


Figura 72 – Mapa RGB con Transectos de vegetación

Elaboración: propia

Tabla 17 – Valores obtenidos en los transectos de vegetación en campo

Parámetros	Cuadrantes de 1m x 1m		
	T1	T2	T3
Transecto	T1	T2	T3
Riqueza	21	19	23
Abundancia	53	44	56
Dominancia (Índice Simpson)	0.71	0.8	0.14
Diversidad (Índice de Shannon)	0.82	0.6	2.61

Elaboración: (Chimbolema & Ramírez, 2019)

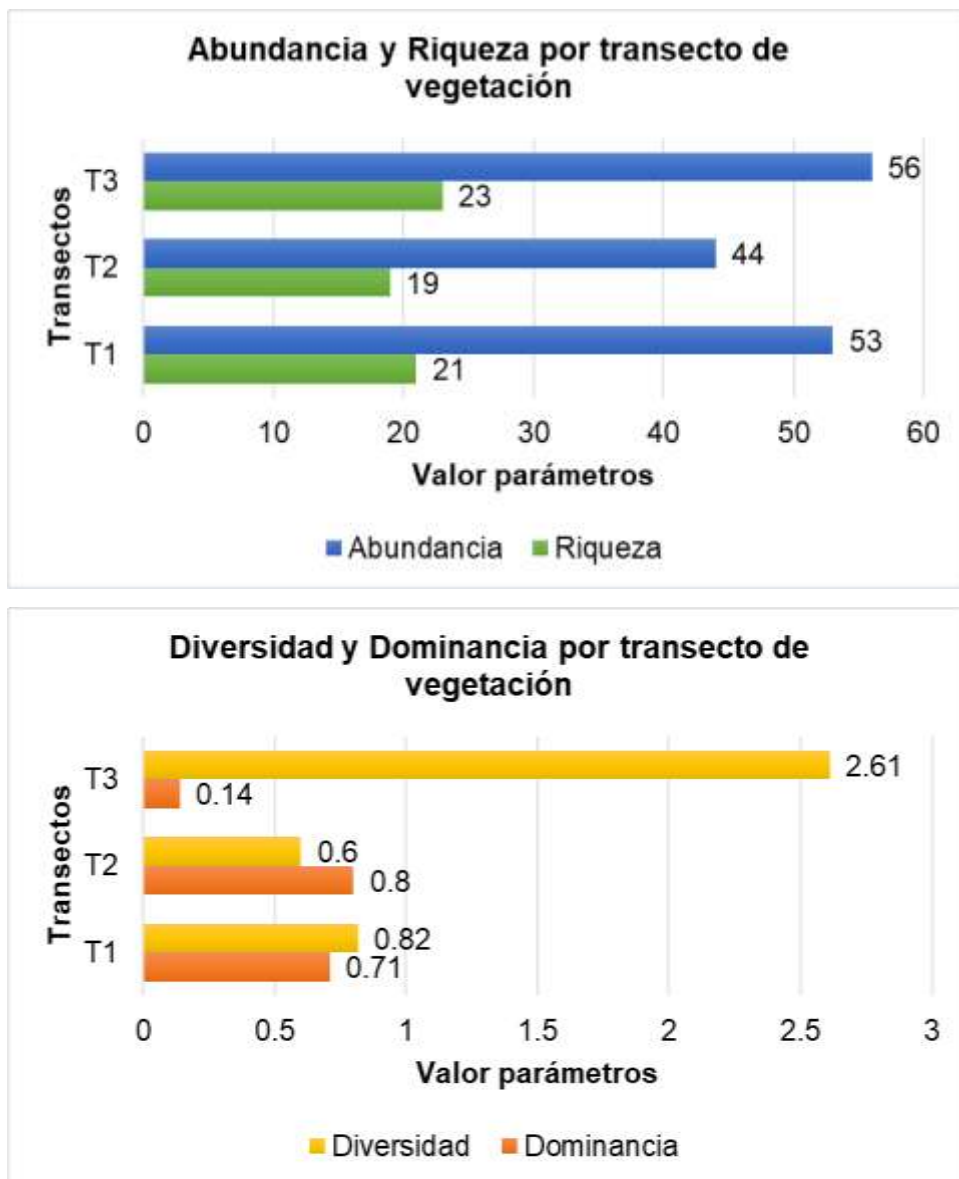


Figura 73 – Riqueza, abundancia, diversidad y dominancia por transecto de vegetación

Modificado de: (Chimbolema & Ramírez, 2019)

Una vez identificado la relación entre los valores de abundancia, riqueza, dominancia y diversidad en cada transecto de vegetación se calcularon los valores promedio y desviación estándar de cada índice espectral de vegetación para los cuadrantes de cada establecidos de cada transecto (Tabla 18). Los valores obtenidos de desviación estándar y promedio de cada índice espectral se compararon con los valores obtenidos en campo, con el fin de establecer una relación entre los mismos. Se determinó, que

todos los índices espectrales poseen la misma relación de variación con respecto a los transectos, por lo cual se presenta como ejemplo los valores de desviación estándar (Figura 74) y promedio (Figura 75) del NDVI obtenidos vs la riqueza, abundancia, dominancia y diversidad de los transectos.

En la Figura 74, se determinó que la desviación estándar obtenida de cada índice espectral posee una relación directamente proporcional con la abundancia, riqueza y diversidad, es decir, a mayor riqueza, abundancia o diversidad en el transecto de vegetación mayor será la desviación estándar del transecto; mientras que para el caso de la dominancia posee una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor desviación estándar menor dominancia. La desviación estándar cuantifica la variación del conjunto de datos, por lo cual, si existe una mayor abundancia, riqueza o diversidad de especies en consecuencia existiría una mayor variación en la respuesta espectral de la superficie lo cual provoca estas relaciones. Mientras tanto, en la Figura 75, se determinó que los valores promedio de los índices espectrales no poseen una relación definida con los parámetros medidos en campo.

Tabla 18 – Valores promedio y desviación estándar de índices espectrales de vegetación por transecto de vegetación

Parámetros		Cuadrantes de 1m x 1m		
		T1	T2	T3
NDVI	Promedio	0.84	0.79	0.77
	Desviación estándar	0.04	0.03	0.06
GCI	Promedio	7.45	6.28	6.06
	Desviación estándar	0.96	0.63	1.07
NDRE	Promedio	0.44	0.43	0.38
	Desviación estándar	0.027	0.02	0.034
GNDVI	Promedio	0.79	0.76	0.75
	Desviación estándar	0.02	0.019	0.035

Elaboración: propia

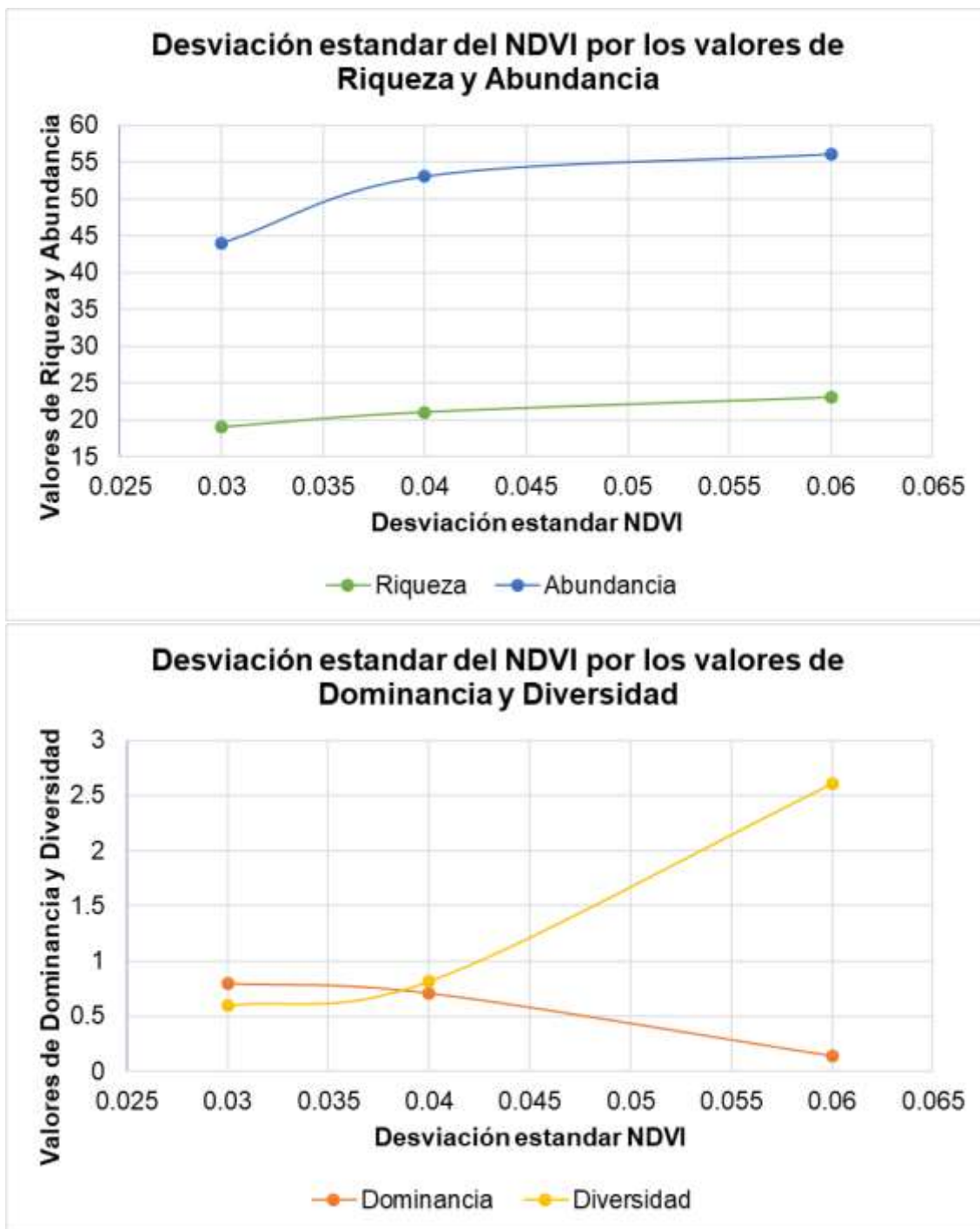


Figura 74 – Desviación estándar de NDVI vs abundancia, riqueza, diversidad y dominancia

Elaboración: propia

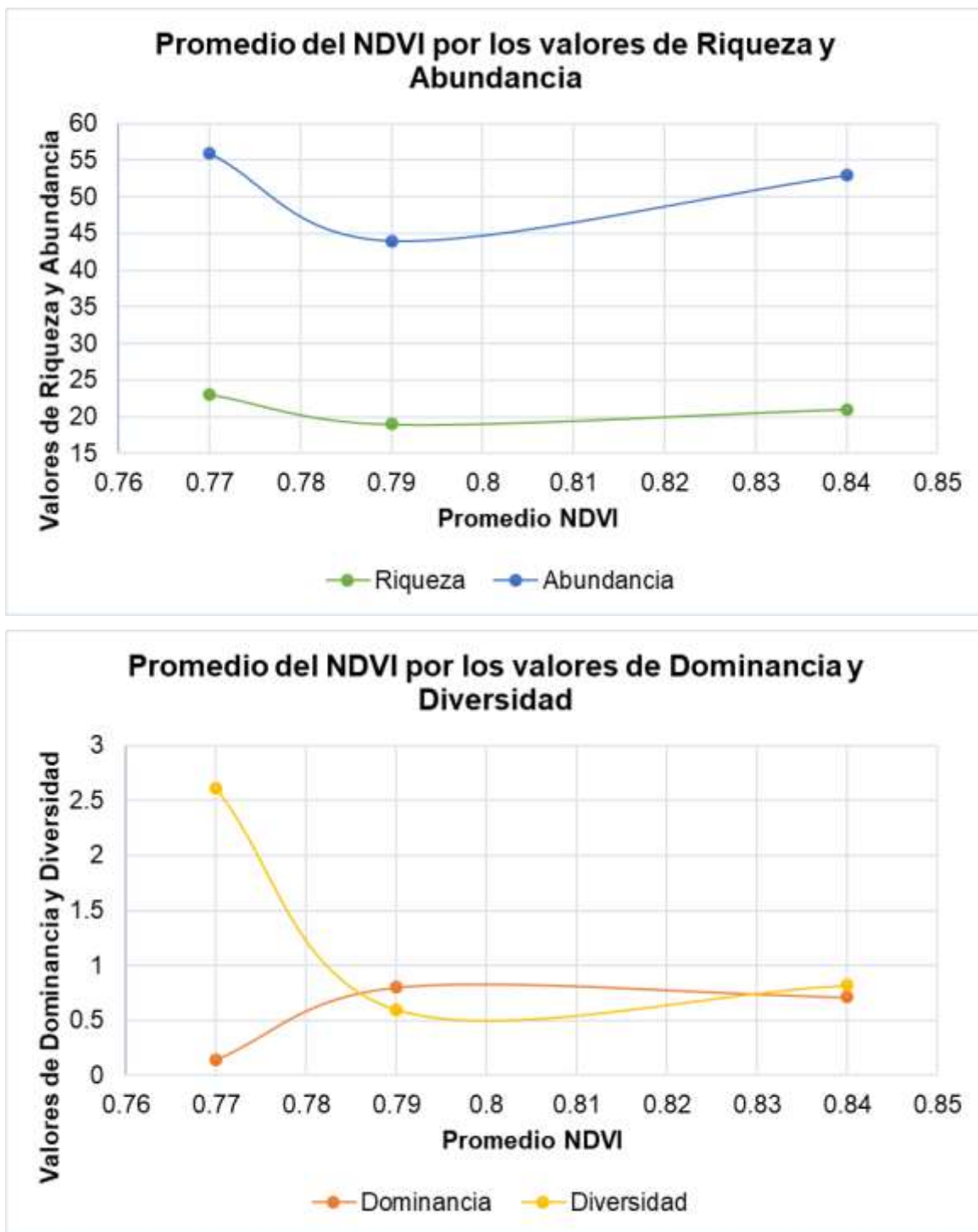


Figura 75 – Promedio de NDVI vs abundancia, riqueza, diversidad y dominancia

Elaboración: propia

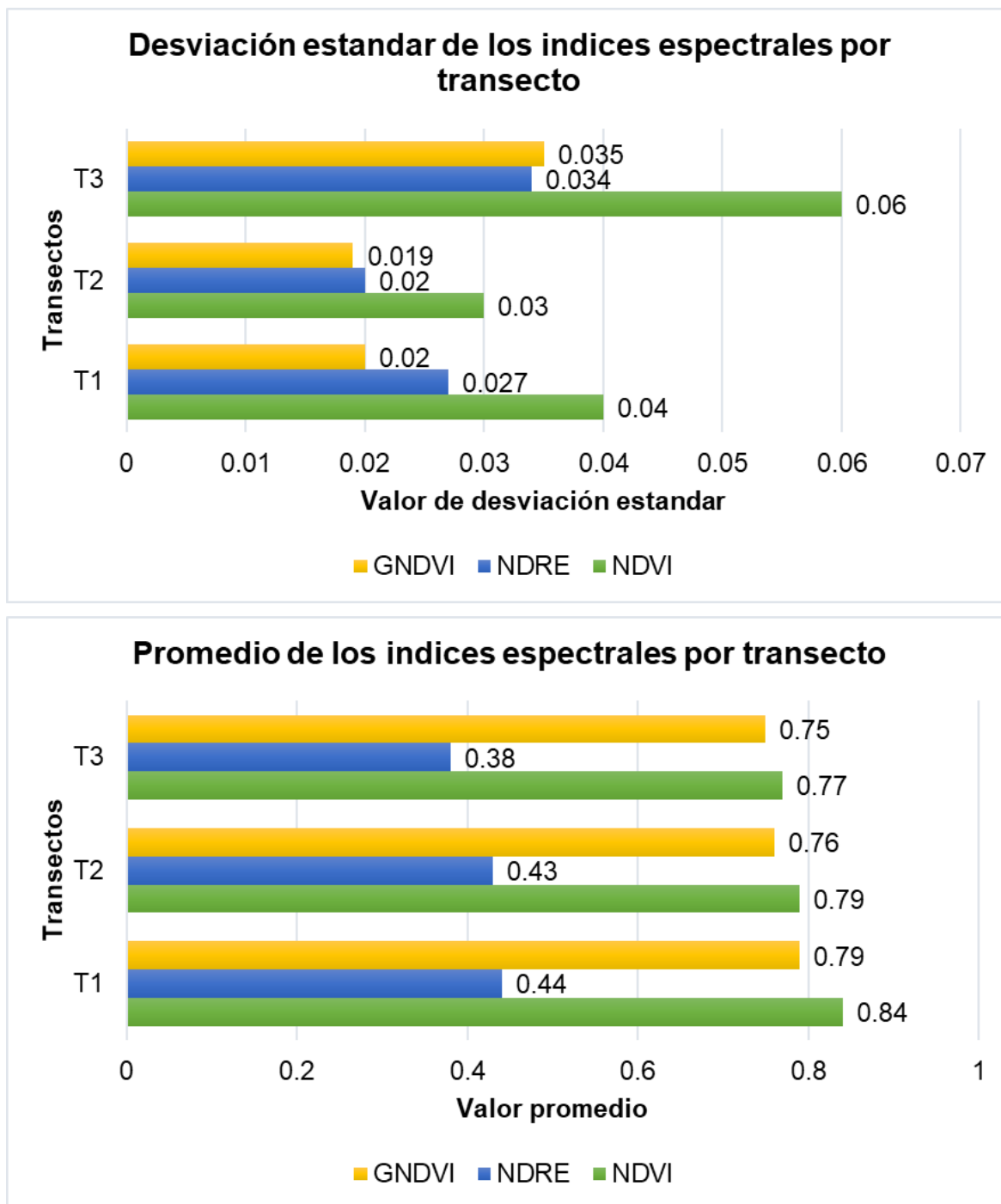


Figura 76 – Promedio y desviación estándar de los índices de vegetación por transecto

Elaboración: propia

En la Figura 76, se muestra los valores obtenidos de desviación estándar de los índices espectrales de vegetación por número de transecto; para el presente caso, el T3

presenta los mayores valores de variabilidad en las muestras, lo cual corrobora con los valores de mayor diversidad y baja dominancia obtenidos en campo. Mientras tanto, para el caso de los valores promedio de los índices espectrales se obtiene pequeñas diferencias entre los tres transectos, sin embargo, se puede concluir que la dominancia de *Plantago rigida* en los transectos T1 y T2 genera que sus superficies obtengan mayores valores promedio en cada índice evaluado; el tipo de especie de *Plantago rigida* se presenta a lo largo de todo el humedal con formas de almohadilla, la cual se caracteriza por encontrarse en zonas húmedas y por presentar altos valores en los índices espectrales de vegetación evaluados.

4.4. MAPAS DE ÍNDICES DE AGUA

4.4.1. Mapa NDWI

El índice NDWI se establece como la diferencia entre las bandas verde y NIR dividido para la suma de las mismas como se muestra en la ecuación (2.2). La selección de las dos bandas se debe a tres motivos principales mencionados por (McFeeters, 1996): i) maximizar la reflectancia típica de los cuerpos de agua al utilizar la banda verde del espectro electromagnético; ii) minimizar la baja reflectancia de los cuerpos de agua en la banda NIR y iii) aprovechar la alta reflectancia de la vegetación y suelo en la banda NIR. En este sentido, los cuerpos de agua se pudieran diferenciar de una manera notable y adoptarían los valores positivos. Sin embargo, para el presente caso los cuerpos de agua no se definen de una manera notoria y poseen en todos los casos valores negativos al igual que la vegetación. Esto se debe a que los cuerpos de agua presentes en el humedal poseen una mayor reflectancia en la banda NIR que en la banda verde, lo cual ocurre cuando existe una cantidad considerable de sólidos totales que alteran la respuesta espectral del agua como se indica en la Figura 11. Adicionalmente la baja profundidad de los charcos o cuerpos de agua se presume que afecten a la respuesta espectral de las mismas. En varias salidas en campo se ha constatado de manera visual que el agua de los charcos presenta una coloración oscura y baja profundidad como se indican la Figura 77.

La alta concentración de sólidos totales en el agua de los charcos del humedal respondería a la alta concentración de material orgánico presente en el suelo de páramo. Como mencionan (Mena, Josse, & Medina, 2000), las características comunes de los suelos de páramo son su coloración negra y alto nivel de humedad; debido a su alto contenido de humedad y clima frío, provoca que su descomposición sea lenta y genera que se acumule una gruesa capa de material orgánico. La gran capacidad de material orgánico es de suma importancia para el suelo del páramo debido a que el alto contenido de materia orgánica determina su porosidad siendo el caso que los suelos de páramo pueden tener hasta el 90% de su volumen como espacio poroso (Llambí et al., 2012).



Figura 77 – Charcos del humedal Puglllohuma en época seca y lluviosa

Elaboración: propia

Para el caso de los índices espectrales de agua, la clasificación de los valores se establece en cuatro categorías, de igual manera, por el método de cortes naturales Jenks. La Tabla 19, establece la clase 1 para el mapa NDWI (Figura 78), la cual corresponde en su mayoría al tipo de vegetación *Leprocaulon* y pequeñas superficies cubiertas de *Werneria* y agua; la clase 2 cubre gran parte de las periferias del humedal y pocos charcos de agua. La clase 3 se ubica alrededor de la parte central del humedal principalmente, mientras la clase 4, contiene el mayor porcentaje de área y se ubica específicamente en la parte central del humedal. Por lo tanto, los valores más bajos corresponden a la vegetación con mejor estado de salud, lo cual se debe a una alta reflectancia en el NIR y baja reflectancia en la banda verde. En este contexto, las

plantas con mejor estado de salud tendrán un mayor nivel de clorofila y de igual manera su nivel de humedad será mayor. Por lo cual se debe considerar a la vegetación que posea los valores más bajos como la vegetación con mayor contenido de agua, como un indicador de la saturación del agua en el humedal.

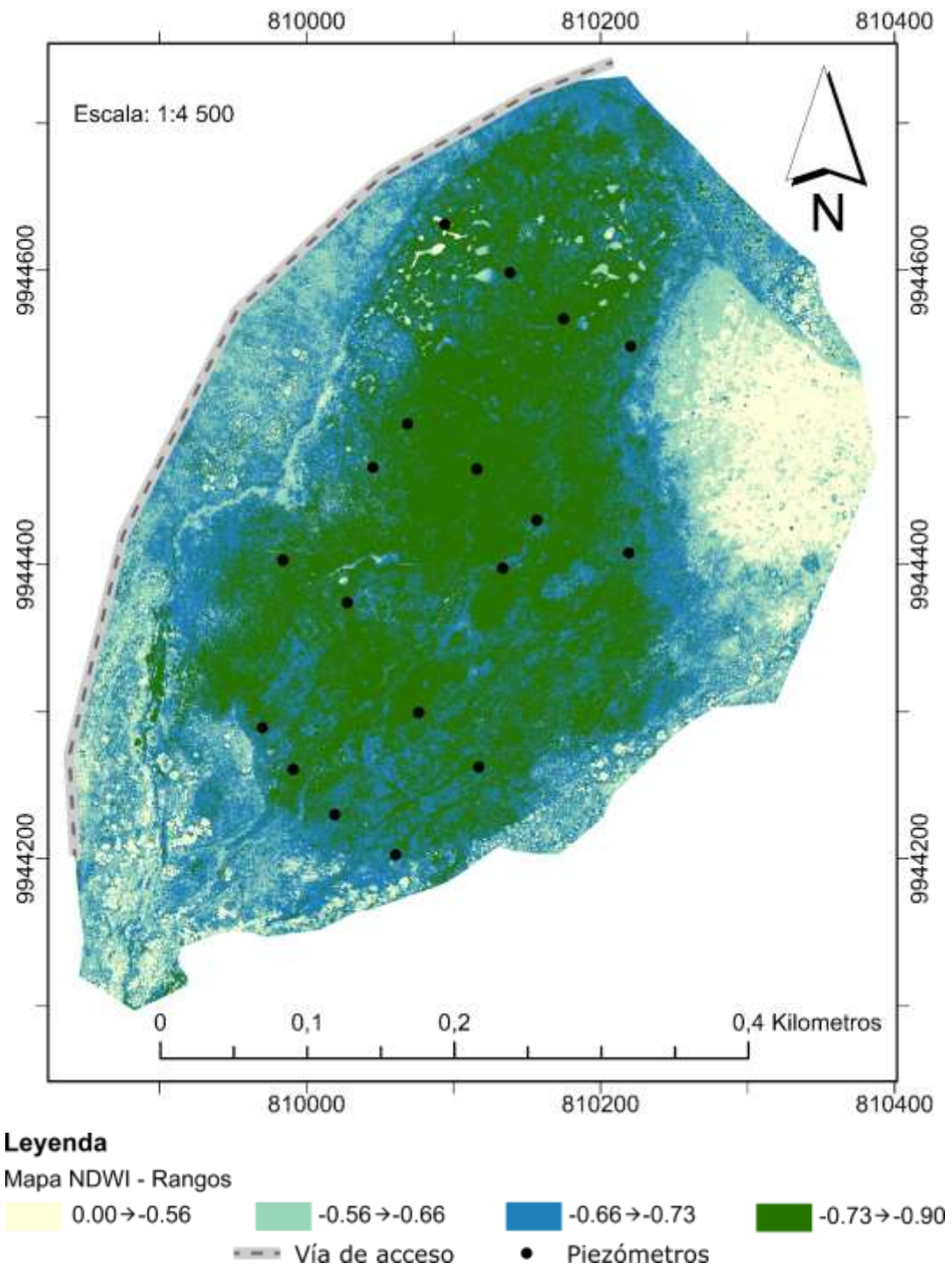






Figura 78 – Mapa NDWI por rangos del humedal Puglllohuma

Elaboración: propia

Tabla 19 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa NDWI

Símbolo	Rangos	# Píxeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	0.00 → -0.56	4397690	20876.76	9.54	1
	-0.56 → -0.66	8881954	42164.50	19.27	2
	-0.66 → -0.73	15751194	74774.23	34.18	3
	-0.73 → -0.90	17051323	80946.21	37.00	4
	Total	46082161	218761.70	100.00	

Elaboración: propia

4.4.2. Mapa $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$

En este contexto, donde el agua del humedal presenta altos valores de sólidos totales, lo cual cambia la configuración típica de la firma espectral del agua; se propone el estudio de un índice análogo al NDWI donde se evalúe en cambio la banda del borde rojo en lugar de la banda NIR con el fin de maximizar la reflectancia del cuerpo de agua y minimizar la baja reflectancia de la vegetación en la banda verde. Por lo cual se presenta la siguiente fórmula para la evaluación de los cuerpos de agua del humedal:

$$FÓRMULA = \frac{\text{VERDE} - \text{BORDE ROJO}}{\text{VERDE} + \text{BORDE ROJO}} \quad (2.3)$$

En la Figura 79, se muestra el mapa obtenido de la fórmula (2.3), el mapa presenta un mejor delineamiento de los cuerpos de agua que el NDWI. En la Tabla 20, se puede evidenciar que el mapa propuesto ubica a los cuerpos de agua solo en la clase 1 a diferencia del NDWI que ubica a los cuerpos de agua en la clase 1, 2 y 3, además que su visualización no es tan clara. Los valores obtenidos para el agua sin embargo siguen siendo negativos, pero corresponden a los valores más altos del índice calculado. De igual manera que en el caso anterior a la zona de vegetación saludable corresponde a los menores valores obtenidos (clase 4), y se ubica específicamente en la parte central del humedal cercano a los drenajes y zonas con alta acumulación de agua. El porcentaje de cobertura de la clase 1, representa el 12.76% del área del humedal, no obstante, se debe considerar que la mayoría corresponde a los exteriores del humedal (Leprocaulon y Werneria) y no a los cuerpos de agua como tal.

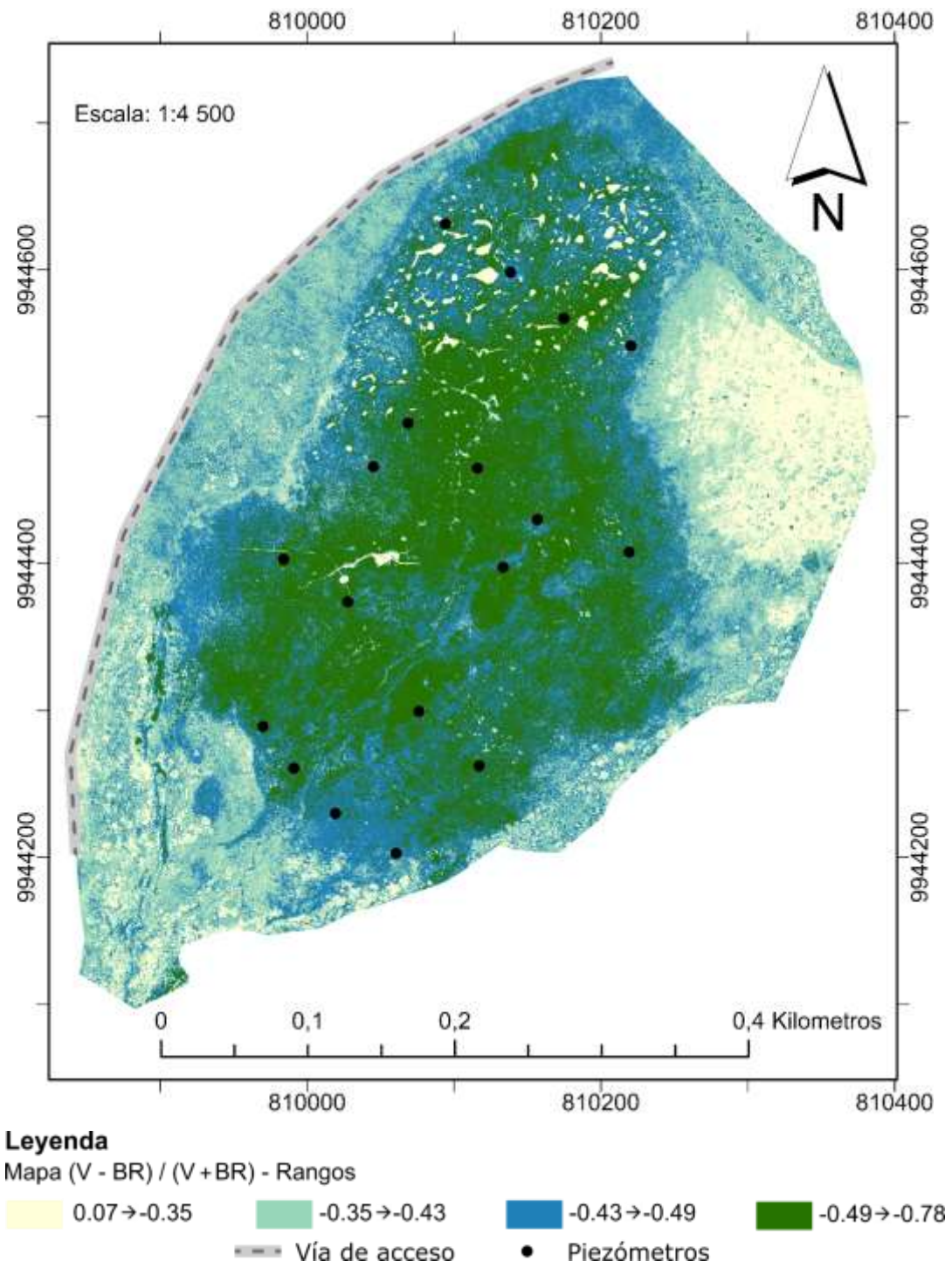






Figura 79 – Mapa $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$ por rangos del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Tabla 20 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$

Símbolo	Rangos	# Pixeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	0.07 → -0.35	5881775	27922.02	12.76	1
	-0.35 → -0.43	11900720	56495.22	25.83	2
	-0.43 → -0.49	14835355	70426.55	32.19	3
	-0.49 → -0.78	13464080	63916.82	29.22	4
	Total	46081930	218760.60	100.00	

Elaboración: propia

4.4.3. Mapa $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$

La banda azul del espectro electromagnético posee la característica única, que independientemente del tipo de agua, sea pura, de océanos, o con un alto valor de sólidos totales su valor de reflectancia se mantiene aproximadamente en el 4%. Adicionalmente la banda azul presenta la mayor diferencia en respuesta espectral del agua con el borde rojo considerando las otras bandas de estudio (verde, rojo y NIR). Tomando en consideración estos dos puntos, de igual manera se plantea la evaluación del siguiente índice. El cual maximizara la alta reflectancia del agua en el borde rojo y minimizara la baja reflectancia del agua en la banda azul. El resultado obtenido se presenta en la Figura 80, el cual presenta configuraciones de distribución de valores muy similar al mapa obtenido anteriormente, en donde se utilizó la banda verde en lugar de la banda azul. La fórmula utilizada para el cálculo del índice mencionado se presenta a continuación:

$$FÓRMULA = \frac{AZUL - BORDE ROJO}{AZUL + BORDE ROJO} \quad (2.4)$$

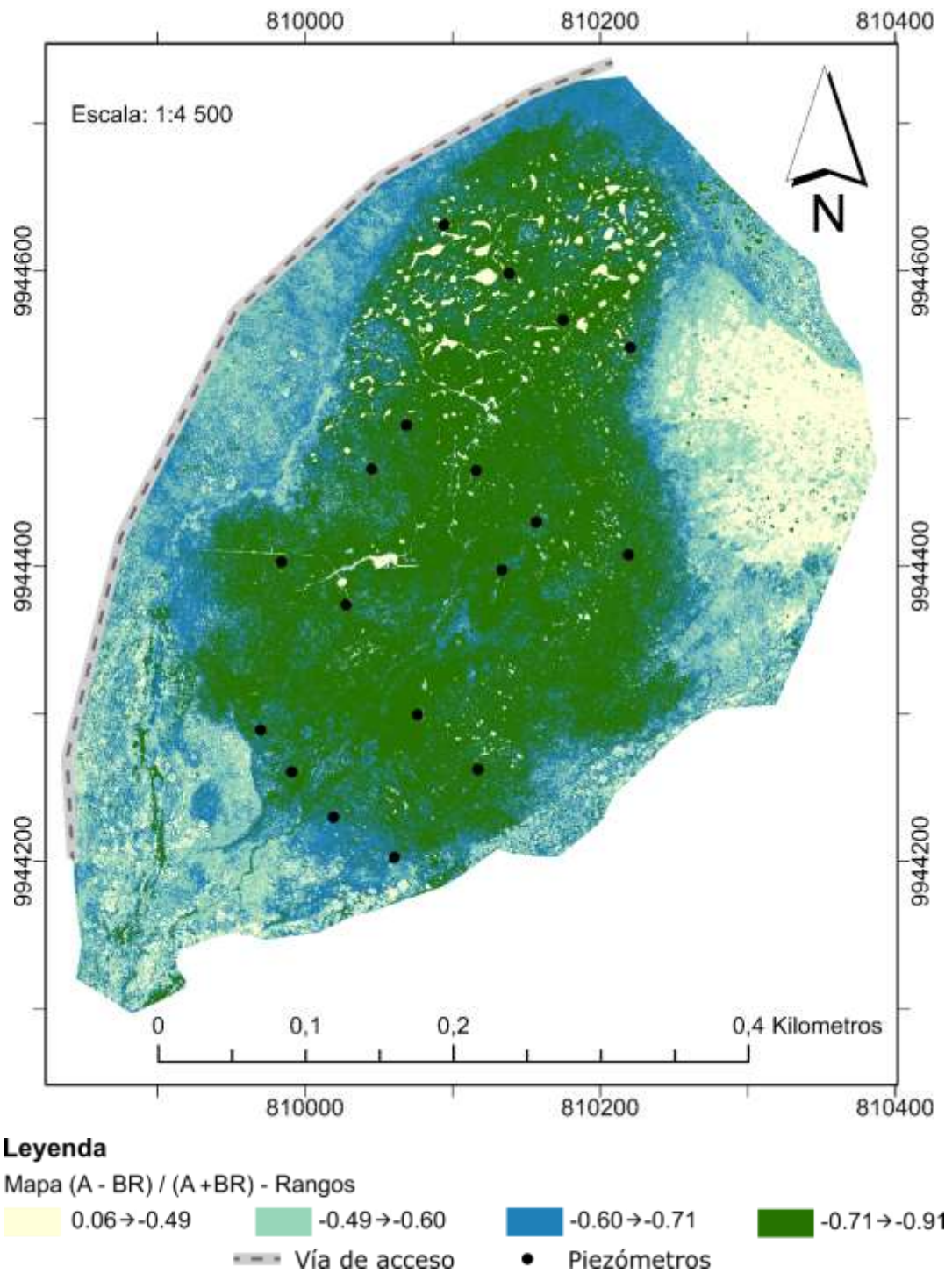






Figura 80 - Mapa $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ por rangos del humedal Pugllhuma

Elaboración: propia

Tabla 21 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$

Símbolo	Rangos	# Pixeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	0.06 → -0.49	4828784	22923.25	10.48	1
	-0.49 → -0.60	10114774	48016.96	21.95	2
	-0.60 → -0.71	12717739	60373.78	27.60	3
	-0.71 → -0.91	18420632	87446.61	39.97	4
	Total	46081929	218760.59	100.00	

Elaboración: propia

En la Tabla 21, se presentan las clases del presente mapa; a diferencia de los índices análogos calculados anteriormente, se puede identificar pequeñas zonas de agua en la parte sureste de la parte central del humedal. También se puede observar que el valor de porcentaje de cobertura para la clase 1 (10.48%) es menor que el valor de la clase 1 (12.76%) del índice anterior (Tabla 20), es decir, que se aumenta la cobertura de cuerpos de agua y se reduce el porcentaje de cobertura para la vegetación de los exteriores del humedal. Mientras que, para el caso de la vegetación, se puede visualizar que posee un comportamiento similar al NDVI ya que la banda azul como la banda roja se caracterizan por absorber en su mayoría la luz proveniente de estas dos bandas, es decir, la banda azul para el caso de vegetación posee reflectancia muy baja, lo cual ubica a la vegetación en mejor estado con los menores valores, clase 4.

4.4.4. Mapa – $\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$

Bajo el mismo sentido de análisis, se propone el cálculo del radio entre las dos bandas que presentan mayor diferenciación para la reflectancia del agua (azul y borde rojo). La fórmula utilizada para el cálculo del índice mencionado se presenta a continuación en la Ecuación 2.5, la razón por la cual el índice es multiplicado por (-), es porque se pretende mantener la misma relación que se ha presentado en los anteriores índices espectrales de vegetación (valores más altos caracterizan cuerpos de agua, y valores más bajos representan la vegetación en mejor estado).

$$FÓRMULA 3 = - \frac{BORDE ROJO}{AZUL} \quad (2.5)$$

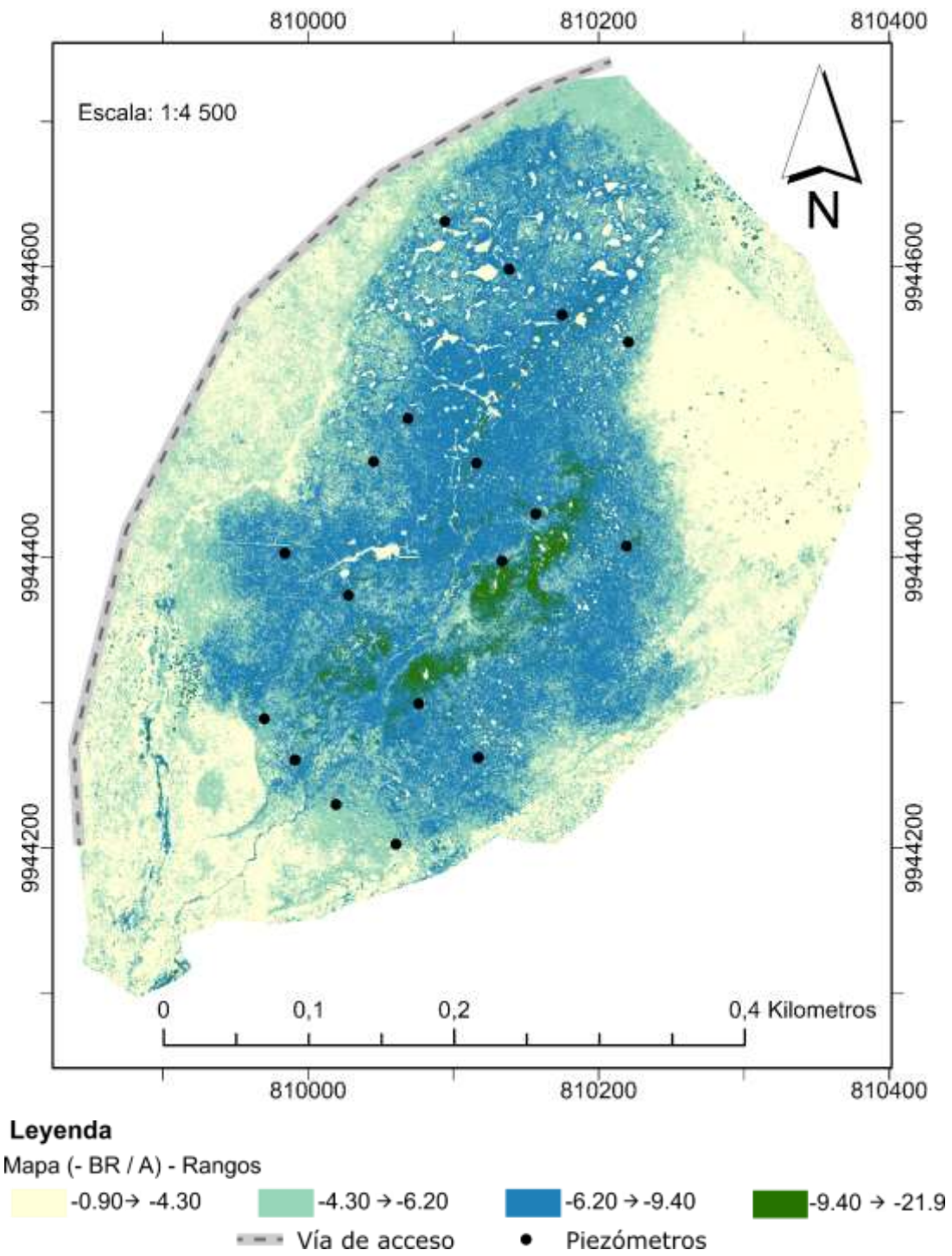






Figura 81 - Mapa $\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$ por rangos del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Tabla 22 - Clasificación de rangos y porcentajes de cobertura mapa – $\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$

Símbolo	Rangos	# Pixeles	Área (m ²)	Porcentaje (%)	Clase
	-0.90 → -4.30	16974309	80580.61	36.84	1
	-4.30 → -6.20	13594222	64534.63	29.50	2
	-6.20 → -9.40	14536234	69006.56	31.54	3
	-9.40 → -21.9	977164	4638.80	2.12	4
	Total	46081929	218760.59	100.00	

Elaboración: propia

La Figura 81, muestra los resultados obtenidos del índice calculado; la vegetación posee una mayor diferencia entre los valores de la reflectancia de la banda azul y borde rojo, ya que la banda azul es absorbida en su mayoría por la vegetación saludable y el borde rojo es una zona de transición con una alta reflectancia de la vegetación. Por lo cual, para el presente índice, si se puede diferenciar los cuerpos de agua, no obstante, también considera en mayor parte al tipo de vegetación Leprocaulon, Thamnolia y gran parte de Werneria dentro de la clase 1. Mientras que para el caso de la vegetación en mejor estado discrimina, específicamente la vegetación Distichia en la clase 4.

4.4.5. Mapa de cobertura de suelo para agua

De manera similar, al análisis realizado para los índices de vegetación el punto (4.3.5.). Se evalúa los índices espectrales de agua en función de cuatro tipos de coberturas: zona de transición que abarca a toda la vegetación de los exteriores del humedal (Werneria, Werneria- Luzula, Azorella-Werneria, Leprocaulon, Thamnolia y Calamagrostis); zona central en donde se consideran las coberturas de vegetación con mayor valor en los índices de vegetación (Distichia y Azorella); zona de aledaña a los cuerpos de agua y con mayor humedad (Margen de agua); y la zona de cuerpos de agua (Agua). La Figura 82 presenta el mapa dividido por las cuatro zonas mencionadas. La Tabla 23 presenta el promedio y de desviación estándar para los índices de agua evaluados. Además, se presentan desde la Figura 83 a la Figura 86, los gráficos con los valores promedios obtenidos en cada índice por cobertura.

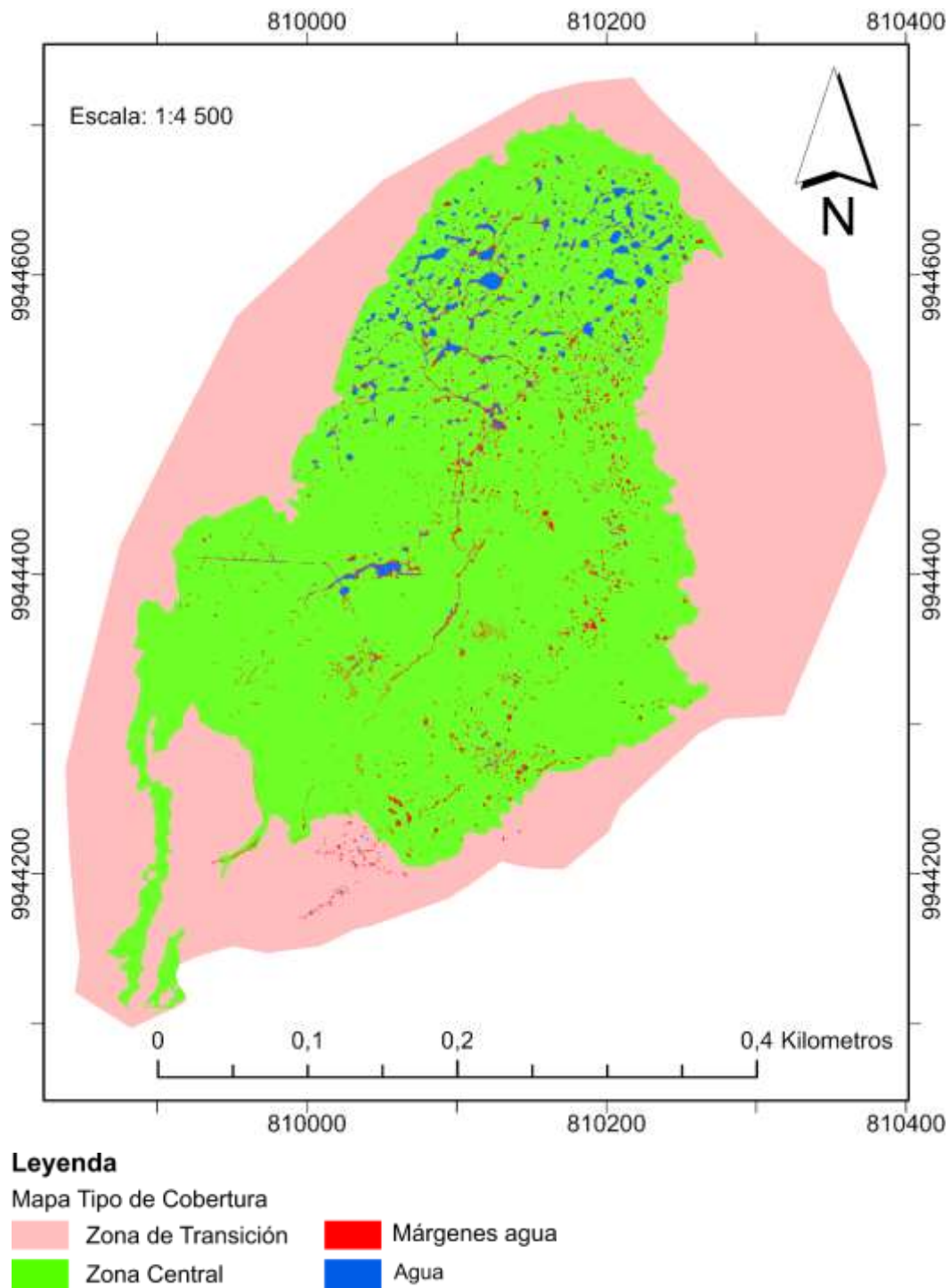


Figura 82 – Mapa por zonas del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Tabla 23 – Valores de índices espectrales de agua por tipos de cobertura

Tipo Cobertura	Área (m ²)	Características	NDWI		$\frac{\text{VERDE} - \text{BORDE ROJO}}{\text{VERDE} + \text{BORDE ROJO}}$		$\frac{\text{AZUL} - \text{BORDE ROJO}}{\text{AZUL} + \text{BORDE ROJO}}$		$-\frac{\text{BORDE ROJO}}{\text{AZUL}}$	
			\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²
Humedal	224,313.44	-	-0.689	0.082	-0.442	0.071	-0.650	0.113	- 5.310	2.000
Zona de transición	99,828.70	Vegetación de transición	-0.631	0.078	-0.392	0.056	-0.572	0.089	- 3.887	1.082
Zona central	116,952.56	Azorella y Distichia	-0.74	0.044	-0.489	0.043	-0.727	0.062	- 6.675	1.652
Margen Agua	4,567.31	Almohadilla Azorella	-0.754	0.036	-0.466	0.060	-0.640	0.108	- 5.073	1.840
Agua	2,964.88	Poca profundidad rodeado Azorella	-0.659	0.054	-0.308	0.058	-0.382	0.084	- 2.313	0.592

Elaboración: propia

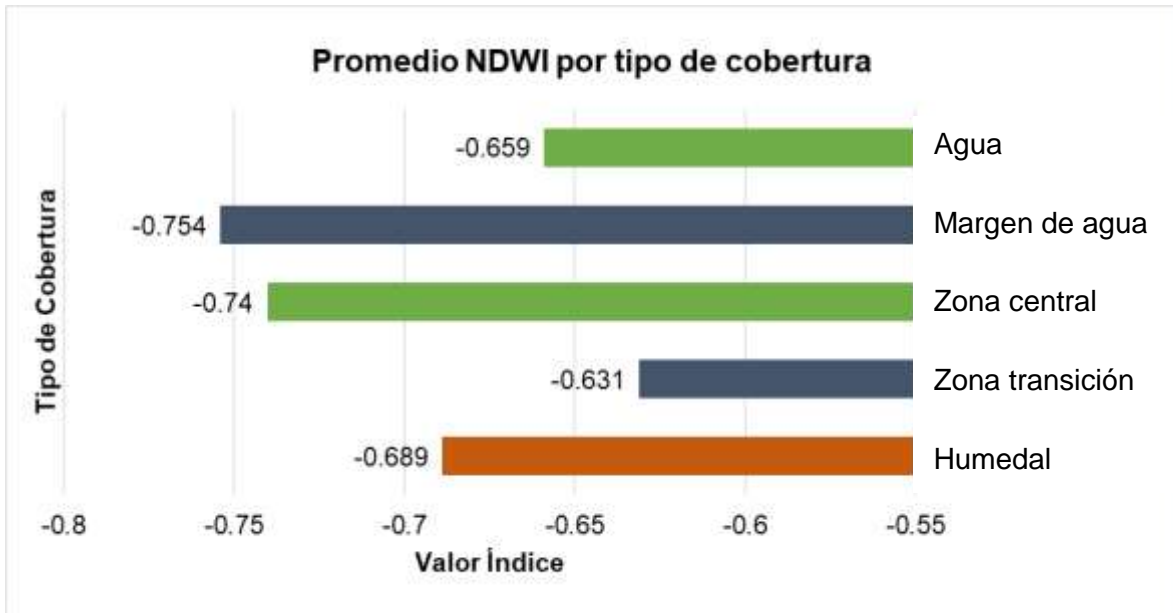


Figura 83 - Valores NDWI por tipo de cobertura

Elaboración: propia

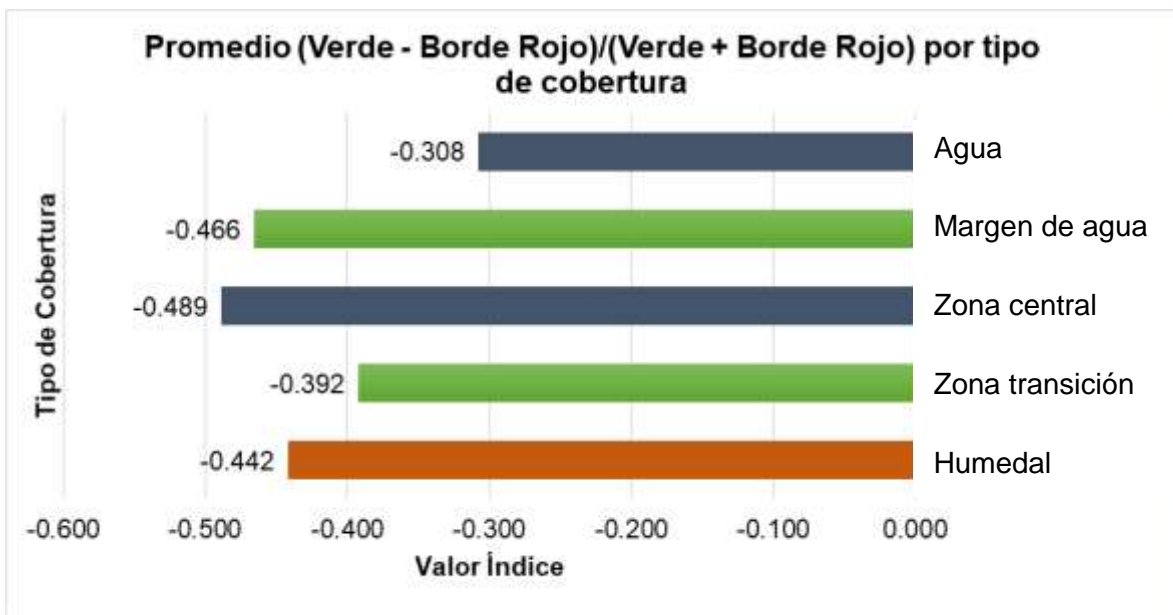


Figura 84 - Valores $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$ por tipo de cobertura

Elaboración: propia

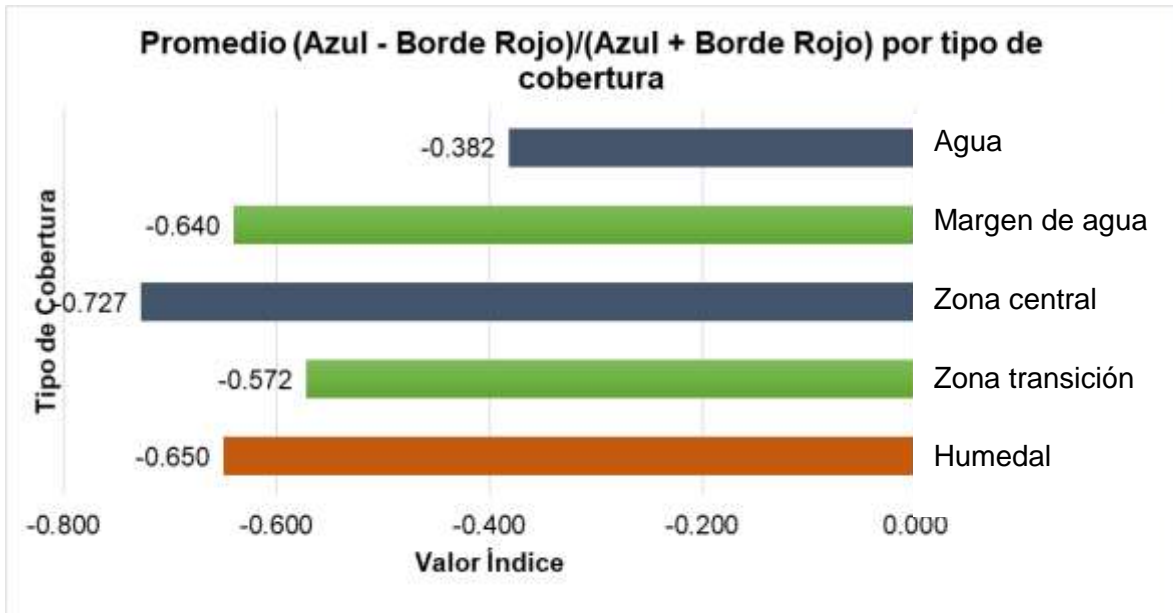


Figura 85 - Valores $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ por tipo de cobertura

Elaboración: propia

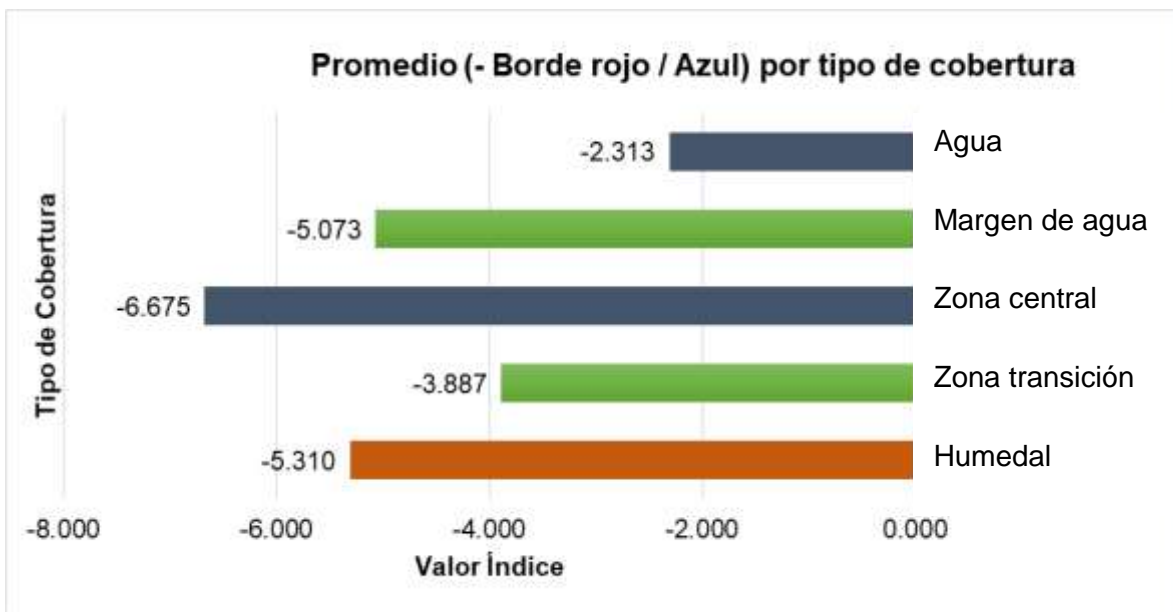


Figura 86 - Valores $-\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$ por tipo de cobertura

Elaboración: propia

La Figura 83, presenta la distribución de valores con respecto al tipo de cubierta del NDWI, con los valores más bajos para la zona central y márgenes de agua; mientras la zona de transición presenta los valores más altos de la distribución. En general los valores del NDWI no presentan una gran diferencia entre los diversos tipos de

coberturas. Para el caso de los índices $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$, $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ y $-\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$ se presentan la distribución de sus valores por tipo de cubierta en las Figuras 84, 85 y 86 respectivamente, en donde, poseen la característica que la zona central y márgenes de agua poseen los valores más bajos de los índices, mientras que, los cuerpos de agua poseen los valores más altos. En general las zonas de mayor humedad de vegetación (zona central y margen de agua) presentan los valores más bajos en todos los índices espectrales de agua.

Complementariamente, se presentan los mapas originales de los índices espectrales de agua en la Figura 87; como se puede evidenciar el NDWI no identifica claramente los cuerpos de agua en la parte central del humedal, lo cual se debe principalmente al alto contenido de sólidos totales presentes en el agua y la baja profundidad de los mismo que alteran la respuesta de la firma espectral del agua. Mientras tanto los índices propuestos, basados en el análisis de la banda del borde rojo ($\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$, $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$, $-\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$) presentaron una mejor diferenciación para las masas de agua. Adicionalmente, la Figura 88 presenta una comparación a menor escala entre el mapa RGB y los índices espectrales de agua calculados; el NDWI (Figura 88B) en comparación con el mapa RGB (Figura 88A) no delinea los sistemas de drenajes o charcos ubicados dentro del humedal. Mientras que en los índices que utilizan la banda de Borde rojo (Figura 88C, 88D y 88E) diferencian los diversos tipos de cubierta y se presentan como una herramienta eficaz para la identificación de cuerpos de agua sobre cubiertas de vegetación oscura como "Distichia", lo cual no se puede visualizar simplemente con el mapa RGB (Figura 88A). Con un especial énfasis, el índice $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ (Figura 88D) presenta resultados más exactos al identificar pequeñas formaciones de agua que los otros índices no pueden visualizar, debido a la gran diferencia entre los valores de reflectancia de la banda azul y del borde rojo.

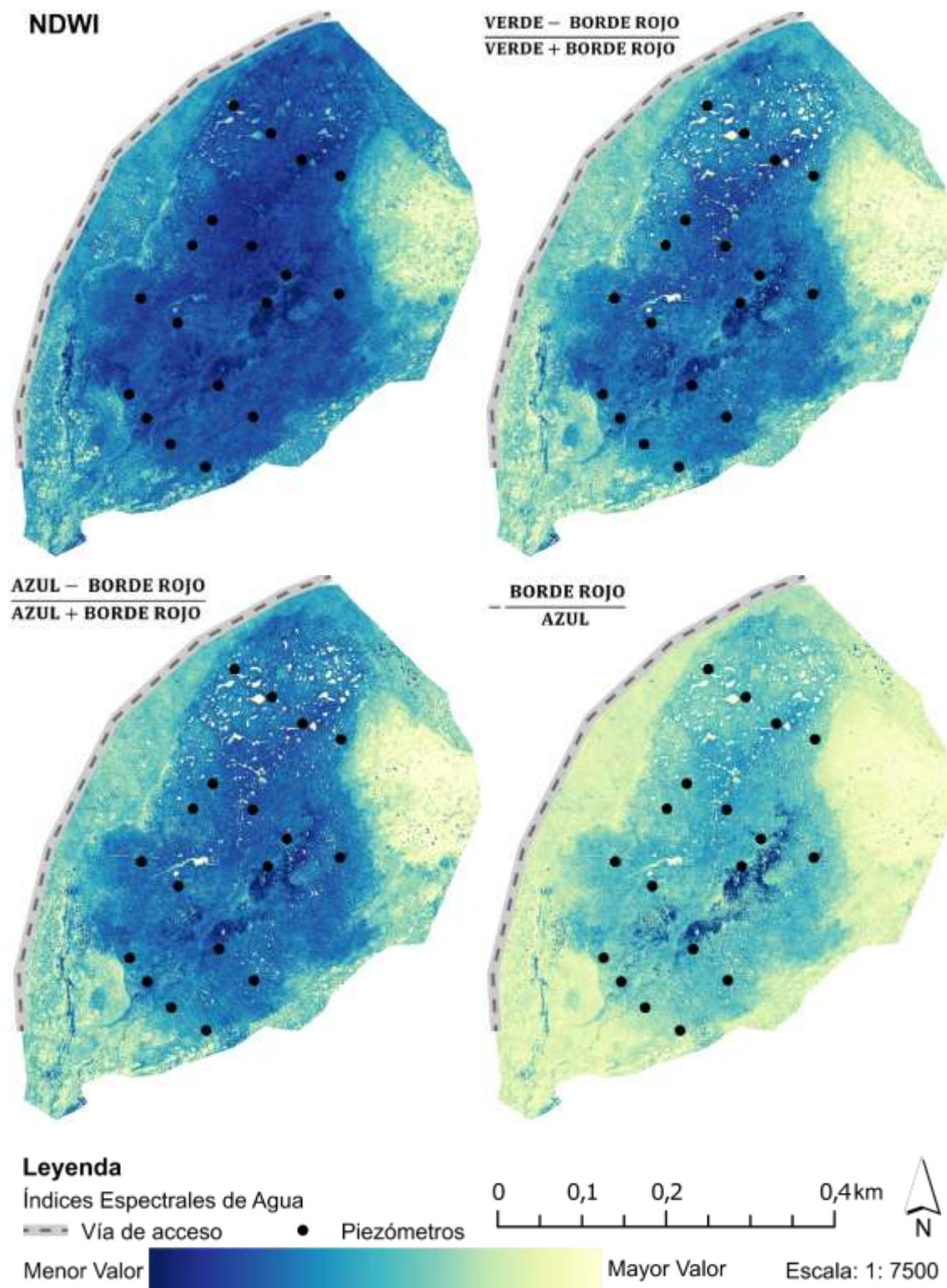


Figura 87 - Comparación de índices de agua sin ajustes para el humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

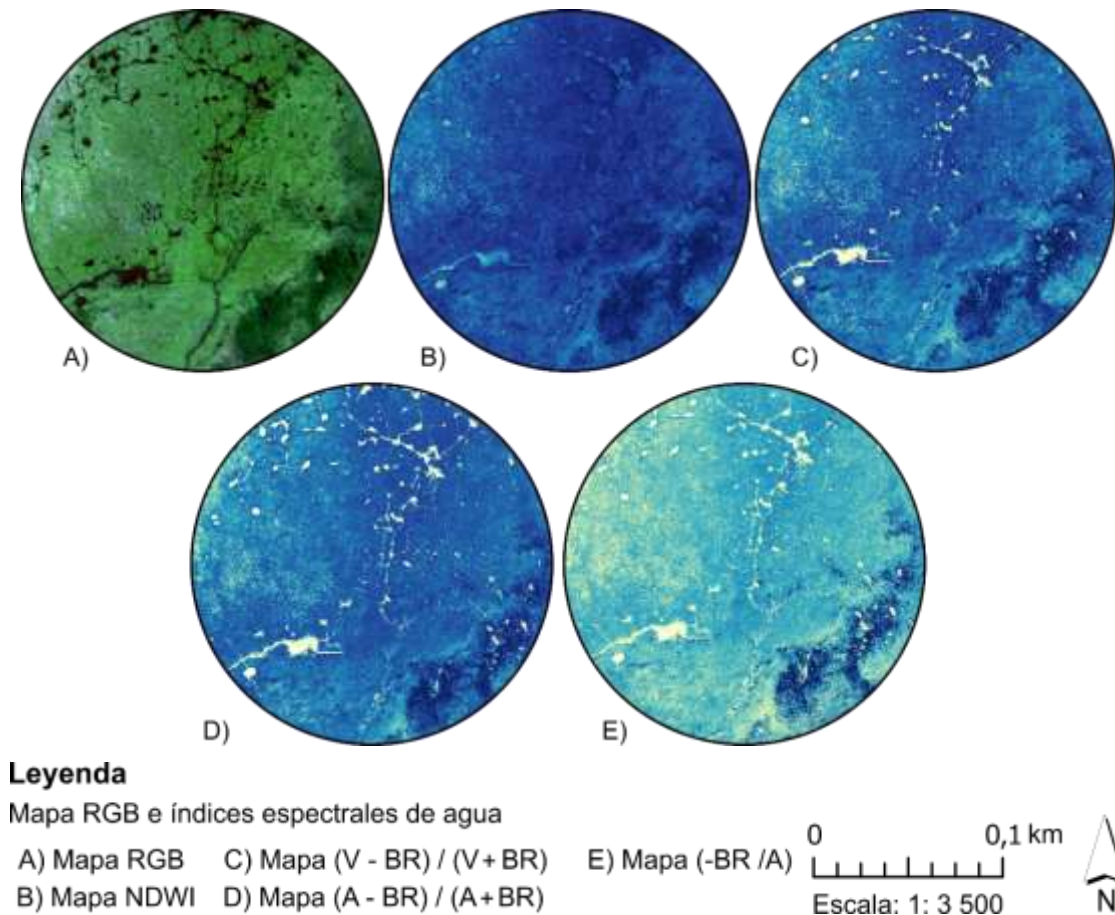


Figura 88 – Comparación de detalles específicos de índices de agua y mapa RGB

Elaboración: propia

Respecto al análisis cuantitativo de los cuerpos de agua en el humedal. La Figura 89, presenta el agua superficial del centro del humedal por índice espectral evaluado. En este contexto, el índice $\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$ con un área total de 5680 m², posee la mayor cobertura para cuerpos de agua, no obstante, gran parte del área obtenida corresponde a vegetación en mal estado. El NDWI con un área de 2100 m², escasamente logra delinear charcos en la zona norte. El índice $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$ con un área de 2657 m², define los sistemas de drenaje y charcos al igual que el índice $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ con un área mayor de 3226 m², identifica pequeñas formaciones de agua, que los anteriores índices no definieron. Cabe mencionar que el FONAG en su informe de tipos de cobertura de suelo para el humedal Pugllohuma (Ortiz & Toapanta, 2019) obtiene un área de 3943 m², para cuerpos de agua.

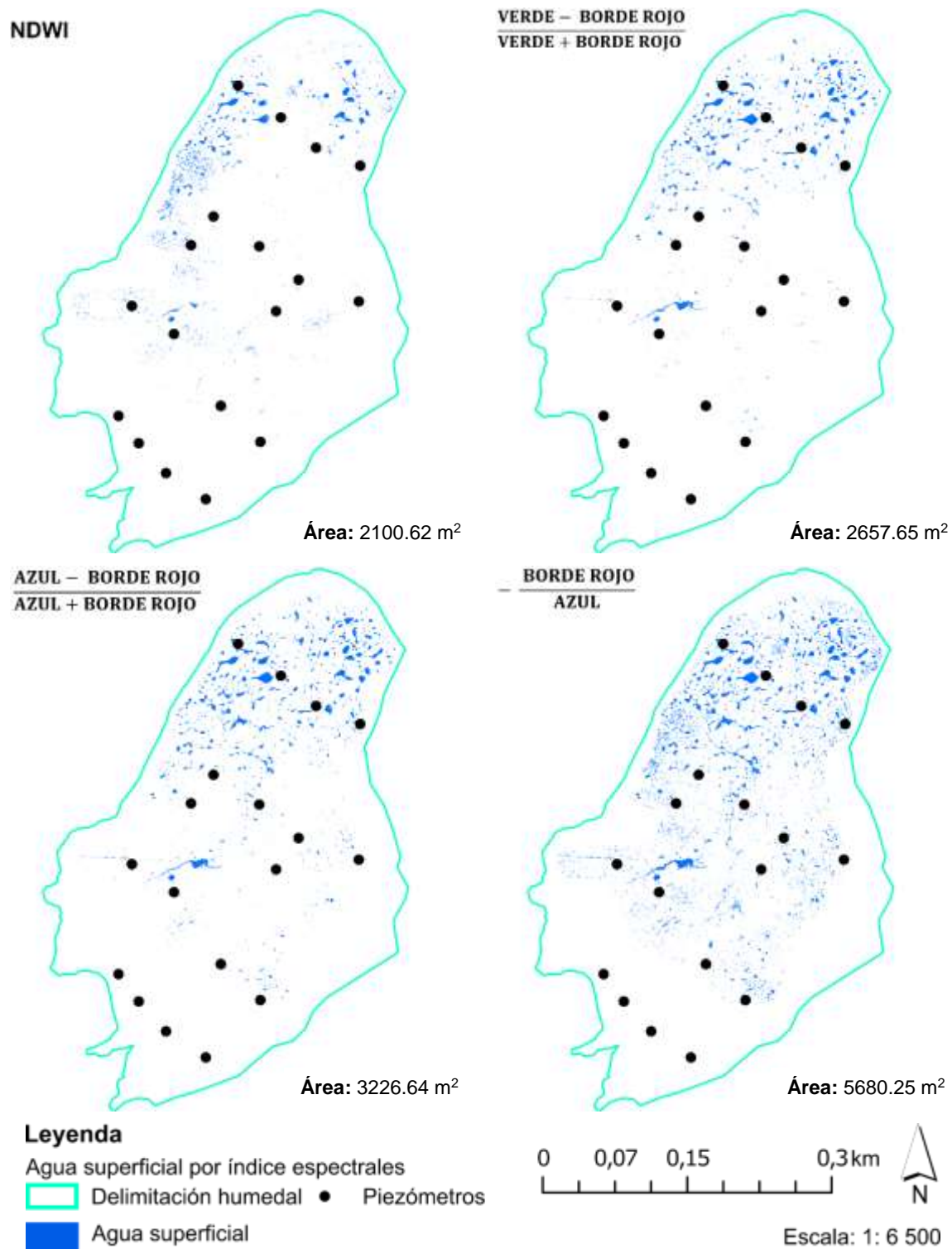


Figura 89- Agua superficial del humedal Puglllohuma por índice espectral

Elaboración: propia

4.4.6. Mapa de saturación de agua

Una vez identificado los cuerpos de agua del humedal y el tipo de vegetación, se establece el mapa de saturación de agua del humedal en base a las zonas de mayor capacidad de acumulación de agua definidas en el punto (4.2.6.3), las zonas con mayor humedad en la vegetación y la delimitación de los cuerpos de agua. En este sentido, las superficies de cuerpos de agua y vegetación con alto contenido de humedad que intersequen con la zona “Alta capacidad de acumulación” (áreas donde el nivel freático se encuentra a 15cm del suelo o más cerca) se definen como áreas de saturación de agua del humedal. En otras palabras, se considera como parte de las áreas de saturación de agua toda la vegetación con mayor grado de humedad, márgenes de agua y cuerpos de agua que se intersequen con las zonas de acumulación obtenidas previamente con el nivel freático como se muestra en la Figura 90.

Tabla 24 – Porcentajes de intersección entre vegetación húmeda, cuerpos de agua y zonas de alta acumulación de agua

Índice	Área (m ²)	Porcentaje de intersección (%)
NDWI	36 025.20	65.33
Verde – Borde rojo		
Verde + Borde rojo	34 245.00	62.10
Azul – Borde rojo		
Azul + Borde rojo	41 081.73	74.50
Borde rojo		
Azul	36 721.88	66.60
Zona de alta acumulación de agua (nivel freático 15 cm o menos del suelo)	55 145.03	100.00

Por lo cual, se calculó el área de intersección entre la vegetación húmeda, cuerpos de agua y las zonas de alta acumulación de agua por cada índice de agua. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 24, obteniendo el mayor porcentaje de intersección con el índice $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ con un valor de 74.50% con la zona de alta acumulación de agua obtenida del nivel freático. Definiendo al área de intersección entre el índice $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ y la zona de alta acumulación de agua como el área

de saturación de agua del humedal. La cual representa el 18.31% del total del humedal o al 33% del área si se considera solo la zona central (Figura 91).

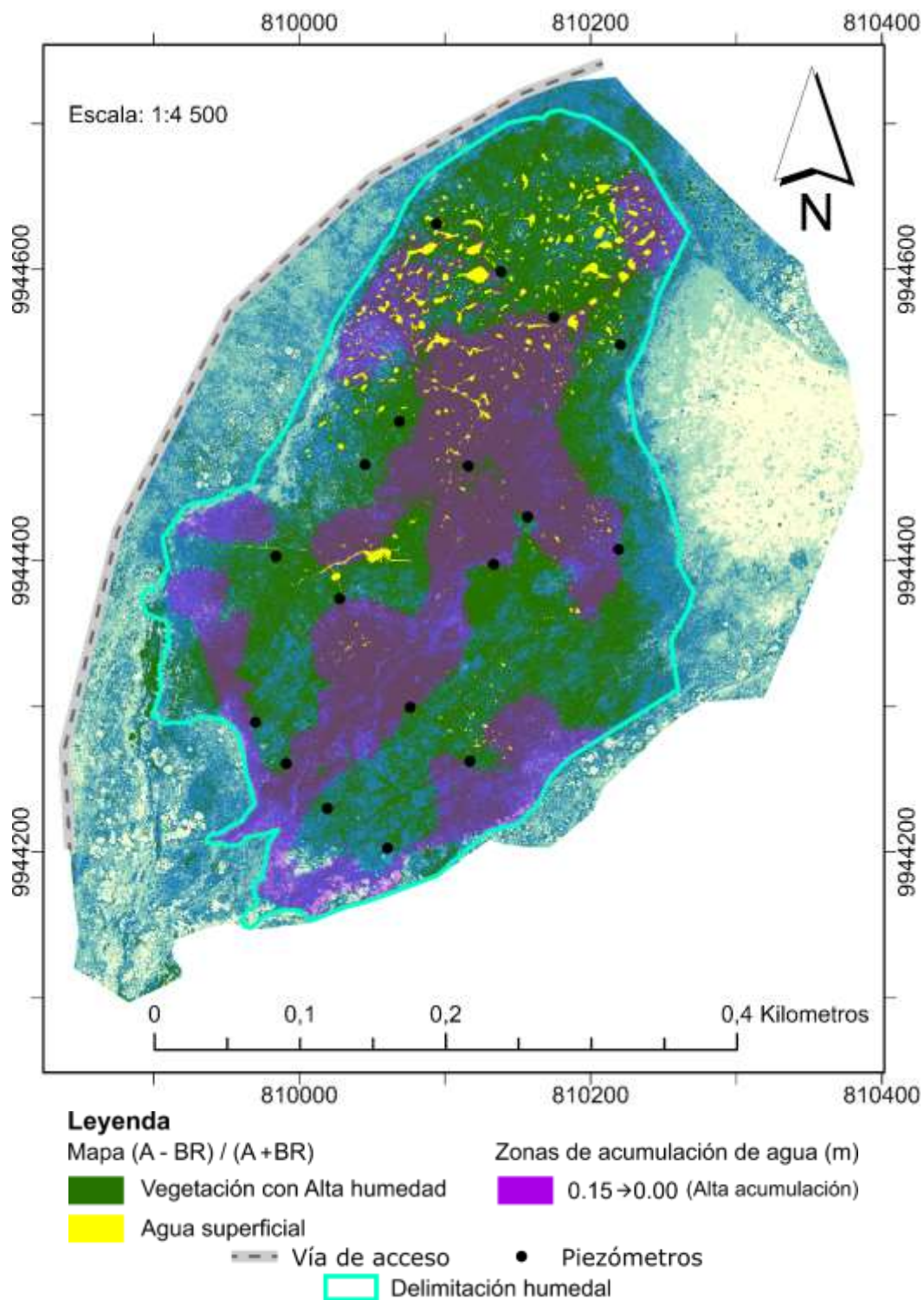


Figura 90 – Intersección índice de agua y zona de saturación

Elaboración: propia

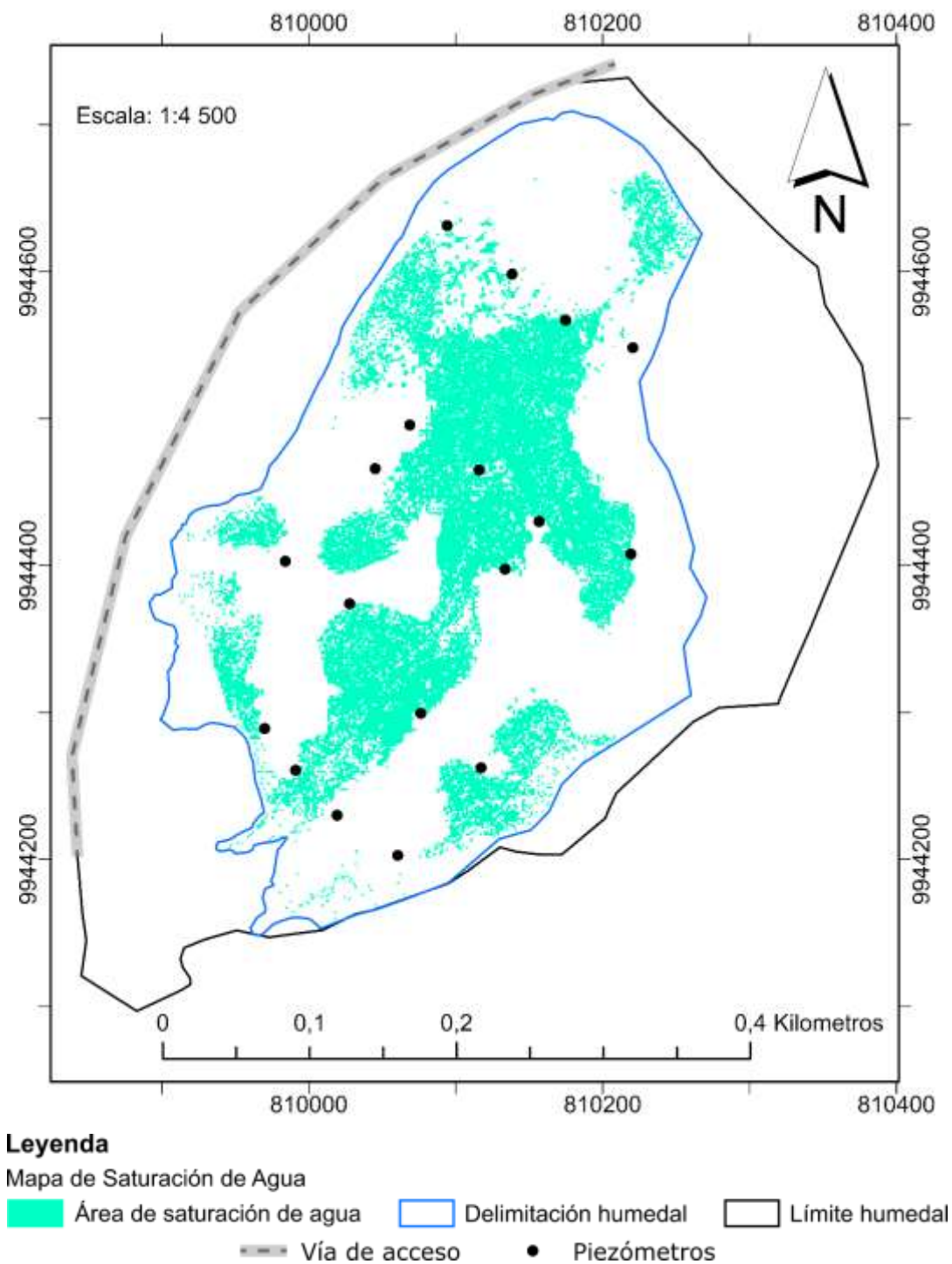


Figura 91 – Mapa de saturación de agua del humedal Pugllohuma

Elaboración: propia

Es importante recalcar que las zonas de saturación de agua se definen principalmente en áreas cercanas al drenaje principal y secundarios, en la parte más alta del humedal donde las condiciones topográficas (pendiente y orientación) permiten una mayor acumulación de agua y en drenes artificiales donde existen

diques de madera que han permitido aumentar la humedad de la vegetación y mantener un nivel freático alto (Figura 92).

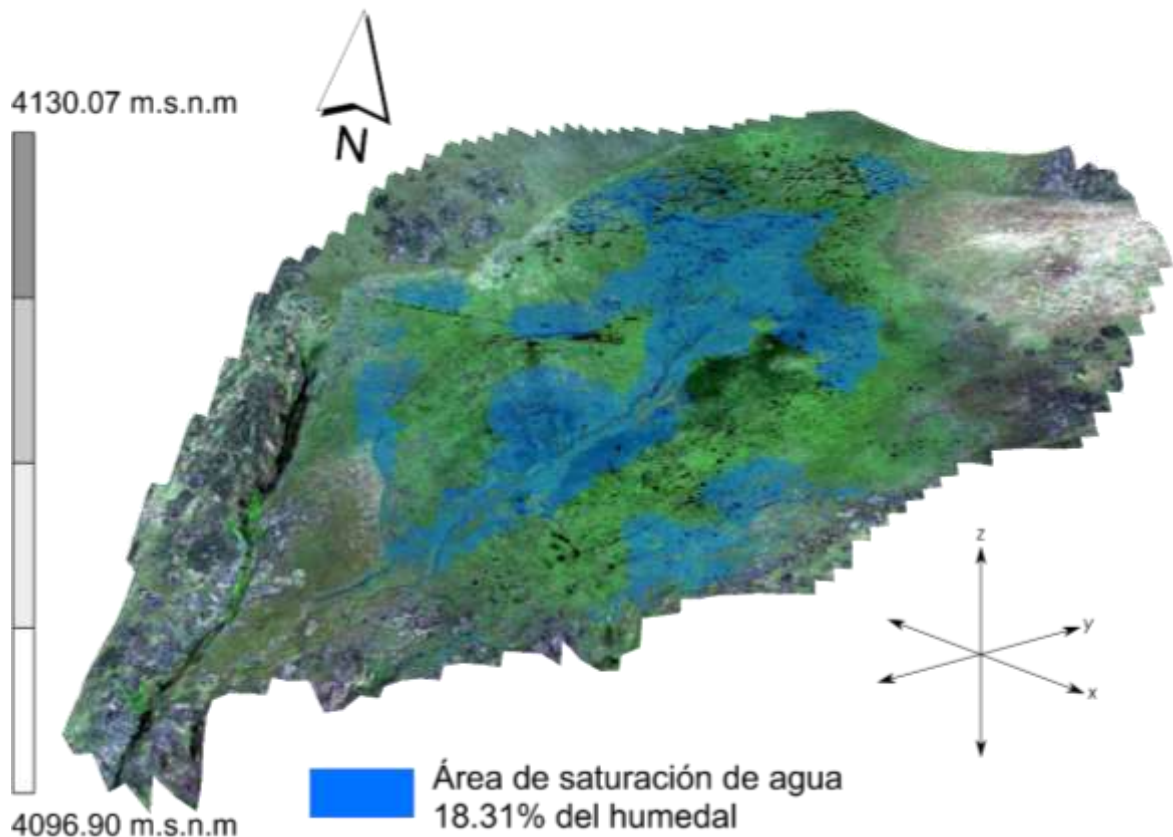


Figura 92 – Modelo 3D del humedal Pugllohuma y las áreas de saturación de agua

Elaboración: propia

4.4.7. Parcela piloto de restauración

El Proyecto de Adaptación al Cambio Climático PRAA, en el año 2014 instaló una parcela piloto de restauración para su monitoreo anual; la estrategia de restauración aplicada por la presencia de caballos salvajes en este humedal, es el aislamiento del tensionante a través del cercado (Toapanta, 2015), como se muestran en las Figuras 26b y 26d. Como un ejemplo práctico, se evalúa la parcela de 130 m² (Figura 93A) partir de 3 índices espectrales que han presentado los resultados más precisos en la caracterización y diferenciación de diferentes tipos de coberturas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 93, la vegetación presente en el interior de la parcela diferencia notablemente con la vegetación circundante, por medio del GCI (Figura 93C) demuestra que su contenido de clorofila en toda la parcela es bajo y por medio del NDVI (Figura 93B) se observa que tanto el verdor como la densidad vegetativa es menor que las superficies adyacentes. La parcela

se encuentra en una zona plana, con una alta capacidad de acumulación de agua y cerca de varios cuerpos de agua superficiales, sin embargo, la parcela específicamente posee un bajo contenido de humedad y dos pequeños cuerpos de agua dentro del mismo (Figura 93D). Por lo tanto, a pesar de no poseer una línea base específica de la condición de la parcela, si se asume que en una primera instancia la parcela poseía las mismas condiciones que la vegetación de sus alrededores, se puede concluir que el factor de aislamiento en la parcela puede estar interfiriendo de una manera negativa en el estado de la vegetación de la parcela instalada.

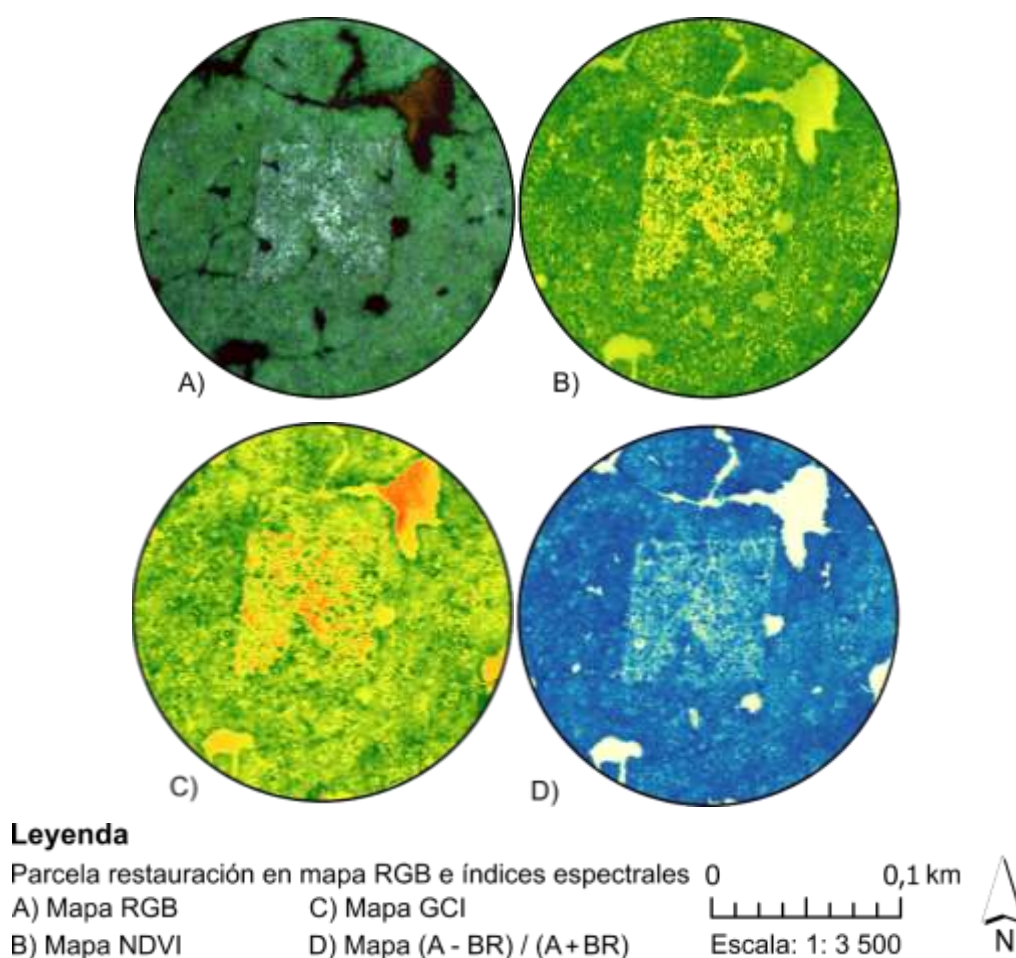


Figura 93 – Análisis de la parcela piloto de restauración por índices espectrales

Elaboración: propia

4.5. METODOLOGÍA DE MONITOREO EN REGIONES ANDINAS

La siguiente metodología esquematiza las fases y actividades para la implementación de índices espectrales de imágenes multiespectrales en tareas de

monitoreo para humedales en la región andina. La presente metodología forma parte complementaria a la metodología de monitoreo desarrollada en el proyecto CEPRA-XII-2018-12. Se fundamenta en tres fases consecutivas e interrelacionadas: i) preparación y planificación, ii) toma de datos y iii) procesamiento de información. Donde se mencionan recomendaciones en varias etapas de las actividades tanto en el trabajo de gabinete como en la toma de datos en campo. Además, se señalan los índices espectrales recomendados para la caracterización del humedal, como también, productos complementarios necesarios para poder realizar un análisis integral del humedal.

FASE I: PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN

Selección de Equipos

- * Dron de ala fija
- * Autonomía > 60 min
- * Sensor multiespectral
- * FOV > 45°

Estacionalidad de la Zona

- * Identificar:
- * Dirección viento
- * Velocidad viento
- * Ráfagas
- * Precipitación (día)

Generación Misión de Vuelo

- * Mission Planner
- * Área de estudio
- * Traslape: 80%
- * Traslape lateral: 60%
- * Resolución: > 6 cm/píxel
- * Primer borrador

FASE II: TOMA DE DATOS

Reconocimiento Área de Estudio

- * Puntos clave (GPS)
- * Zonas secas, húmedas, transición, etc.

Calibración de Equipos

- * Dron - GCS
- * Sensor: panel de reflectancia

Ajuste de Misión de Vuelo

- * Zonas de despegue y aterrizaje
- * Dirección de viento - App (Windy)
- * Anemómetro

Toma de Imágenes

- * Revisión del sistema de comunicación

FASE III: PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Procesamiento de Imágenes

- * Alineación de fotos
- * Generación de nube de puntos
- * Corrección

Procesamiento GIS

Mapas de reflectancia

DSM

Índices de Agua

$$\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$$

Índices de Vegetación

- * NDVI
- * GCI

Mapas Variables Topográficas

- * Pendiente
- * Orientación
- * Curvas de nivel

Evaluación por tipo de cobertura del humedal

Zonas de humedad y masas de agua

Estado de la vegetación

Zonas con capacidad de almacenamiento de agua

Análisis Integral del Humedal

Datos en campo

CAPÍTULO V

RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. RESUMEN

El presente proyecto se dividió en tres etapas principales: i) preparación y planificación, ii) toma de datos y iii) procesamiento de información. En la primera etapa se seleccionaron los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto en base a un análisis técnico – económico y recomendaciones de la literatura revisada, adquiriendo al dron de ala fija Event386 y al sensor multiespectral Micasense RedEdge – MX para la toma de las imágenes multiespectrales; con el fin de cubrir una extensión aproximada de 25 ha con un viento predominante en dirección noroeste y precautelando los diferentes variables climáticas que puedan alterar el desempeño del aeronave. En la toma de datos, se calibran los equipos y se carga la misión de vuelo pre-establecida para el sobrevuelo del dron, además, se realiza un reconocimiento del área con la toma de puntos GPS y datos de campo como la profundidad del nivel freático. Para la última etapa, procesamiento de información, se empleó en una primera instancia el software Pix4D para la generación de los mapas de reflectancia y DSM, los cuales son utilizados para la generación de mapas topográficos y los diversos índices espectrales evaluados. Una vez cargados el DSM y los 5 mapas de reflectancia de las diferentes bandas (azul, verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano) en el software ArcGis Pro, se procedió a generar los diversos mapas topográficos (orientación, curvas de nivel, pendiente, curvatura) y los mapas de los índices espectrales (NDVI, GCI, NDRE, GNDVI, NDWI, $\frac{\text{Verde} - \text{Borde rojo}}{\text{Verde} + \text{Borde rojo}}$, $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$, $-\frac{\text{Borde rojo}}{\text{Azul}}$). De manera paralela los valores obtenidos por los índices espectrales, se evaluaban por tipo de cobertura y vegetación del humedal. Además, se generó el DEM del nivel freático a partir de los datos tomados en campo de la profundidad del agua en el humedal, el cual, se interseco con las superficies de vegetación húmeda y cuerpos de agua obtenidas de los índices espectrales de agua para generar el mapa de saturación de agua del humedal. Resaltando al (NDVI, GCI y $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$) como los índices espectrales con mejores resultados para la evaluación del estado del humedal. Se concluye, que el estudio en conjunto de los mapas topográficos, índices espectrales y datos

de campo, permiten generar un análisis integral del humedal. A continuación, se esquematiza las actividades y resultados obtenidos en el presente proyecto en base a la metodología establecida previamente.

FASE I: PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN

Selección de Equipos

- * Event 386
- * Micasense RedEdge-MX



Estacionalidad de la Zona

- * Dirección: NO
- * Ráfagas de viento: > 11 (m/s)

Generación Misión de Vuelo

- * Mission Planner
- * Área a cubrir (25 ha)
- * Primer borrador

FASE II: TOMA DE DATOS

Reconocimiento Área de Estudio

- * Puntos clave (GPS)
- * Zonas secas, húmedas, transición, etc.



Calibración de Equipos

- * Dron - GCS
- * Sensor: panel



Ajuste de Misión de Vuelo

- * Zona de despegue y aterrizaje
- * Dirección de viento (Windy)
- * Anemómetro

Toma de Imágenes

- * Lanzamiento manual
- * Revisión del sistema de comunicación

FASE III: PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

DEM Nivel Freático

- * Corrección piezómetros
- * Altura nivel freático
- * Creación superficie (Spline)

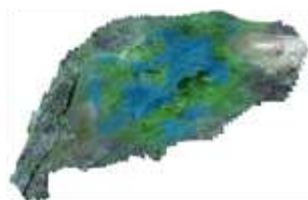
Zonas de Almacenamiento de Agua

- * DSM (terreno) - DEM (NF)
- * Zona de mayor acumulación: [15 cm - 0 cm] profundidad



Mapa de Saturación de Agua

- * 18.31% Humedal
- * 33% Zona central



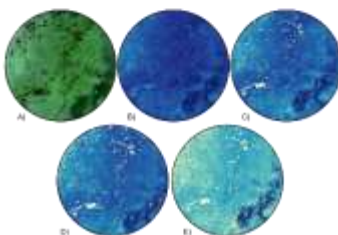
Mapas Variables Topográficas

- * Pendiente (Plana)
- * Orientación
- * Curvas de nivel



Índices de Agua

- * NDWI
- * Verde - Borde rojo
- * Verde + Borde rojo
- * Borde rojo
- * Azul
- * Azul - Borde rojo
- * Azul + Borde rojo (Mejores resultados)
- * Tipo de cobertura
- * Zonas de humedad

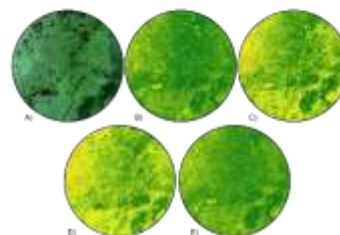
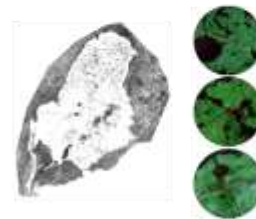


Procesamiento de Imágenes (Pix4D)

- * Alineación de fotos
- * Generación de nube de puntos
- * Calibración
- * DSM
- * Mapas de reflectancia

Índices de Vegetación

- * NDVI, GCI, NDRE, GNDVI
- * Tipo de cobertura
- * Transectos de vegetación
- * NDVI y GCI (Mejores resultados)



5.2. CONCLUSIONES

- En relación con el objetivo “*Evaluar las variables topográficas del humedal Pugllohuma para su caracterización hidrogeológica*”, se concluye que la evaluación topográfica del humedal permite establecer zonas con una alta capacidad de acumulación de agua. En este sentido, la orientación del terreno delimitó, que los terrenos periféricos del humedal en efecto alimentan a la parte central y baja del humedal, dirigiendo el agua hacia los sistemas de drenaje. Además, con el cálculo de la pendiente del terreno y la creación de curvas de nivel cada dos metros se determinó que el área comprendida entre las cotas 4118 m y 4122 m corresponde a una zona plana con un bajo gradiente altitudinal y por lo tanto con una alta capacidad de almacenamiento de agua. No obstante, la función curvatura del terreno presento una alta variabilidad en los resultados obtenidos lo cual se debe a la alta resolución del DSM y la existencia de almohadillas y cojines presentes en la superficie lo cual altera el cálculo de la curvatura del terreno, por lo cual, no se recomienda el uso de esta función en el análisis topográfico del humedal.
- En base al objetivo “*Evaluar cualitativa y cuantitativamente las coberturas obtenidas del análisis de índices espectrales de vegetación y agua*”, se obtuvo que los índices de vegetación NDVI y GNDVI, resaltan el verdor de la vegetación y áreas con alta densidad vegetativa del humedal, sin embargo, dentro de las áreas con una alta densidad vegetativa se determinó que no destacan el estado real de la vegetación, a diferencia de los índices GCI y NDRE que brindan una idea más acertada del contenido de clorofila de la vegetación y por lo tanto el estado de la misma. En este sentido, el NDVI y GNDVI presentan coberturas de vegetación en buen estado sobre los 130 000 m² para ambos casos, a diferencia del NDRE (105 337 m²) y el GCI (62 340 m²) que toman en consideración netamente las áreas con mayor contenido de clorofila. No obstante, el índice NDRE no diferencia de manera precisa los cuerpos de agua de la vegetación circundante por lo cual, no se recomienda su análisis en estacionalidades de alta precipitación.
- En base al objetivo “*Evaluar cualitativa y cuantitativamente las coberturas obtenidas del análisis de índices espectrales de vegetación y agua*”, se

obtuvo que el índice de agua NDWI no permite delimitar de manera exacta las masas de agua presentes en el humedal, debido al alto contenido de sólidos totales en el agua lo cual altera la respuesta espectral de la misma. Por lo cual, se establecieron tres índices espectrales con el uso de la banda de borde rojo, lo que permitió maximizar las diferencias de reflectancia entre la vegetación y el agua delimitando de manera precisa los cuerpos de agua dentro del humedal. Entre los resultados obtenidos se calculó un área total de aguas superficiales del humedal por cada índice, siendo el índice $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ cual presenta resultados más exactos, estableciendo una área de masas de agua superficiales de 3 226 m².

- Con respecto al objetivo “*Comparar los mapas temáticos obtenidos de la evaluación de índices espectrales versus datos obtenidos en campo*”, se establecieron áreas de intersección entre las superficies de agua y vegetación húmeda obtenidas de cada índice espectral de agua con las superficies de alta acumulación de agua generadas a partir del DEM del nivel freático. Obteniendo áreas de intersección superiores al 60% en todos los casos y el mayor porcentaje de intersección con el índice $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$ (74.50%). La mayor superficie de intersección delimitada se define como el área de saturación del agua para el humedal Pugllohuma, comprendiendo el 18.31% del área total del humedal.
- Con respecto al objetivo “*Comparar los mapas temáticos obtenidos de la evaluación de índices espectrales versus datos obtenidos en campo*”, se determinó que las cubiertas de vegetación definidas en campo, localizadas en las zonas periféricas del humedal o zonas de transición (Werneria, Calamagrostis, Leprocaulon y Thamnolia) con baja capacidad de acumulación de agua presentan bajos valores en el cálculo de los índices espectrales de vegetación (NDVI, GCI, NDRE, GNDVI). Mientras que, la zona central del humedal con una alta capacidad de acumulación de agua, dominada principalmente por (Distichia, Azorella y márgenes de agua) presentaron los valores más altos para todos los índices de vegetación. Por lo tanto, las cubiertas de vegetación que posean mayor capacidad de acumulación de agua, tendrán valores más altos en el cálculo de los índices

espectrales de vegetación. Adicionalmente, en base al análisis de los transectos de vegetación realizados por el FONAG, se estableció que la desviación estándar calculada de los índices espectrales de vegetación posee una relación directamente proporcional con la abundancia, riqueza y diversidad de los transectos; mientras que el valor promedio de los índices espectrales se puede considerar como un indicador de la dominancia de *Plantago rigida* o especies similares en los transectos de vegetación.

- Referente al objetivo “*Adaptar la metodología de monitoreo desarrollada en el proyecto CEPRA-XII-2018-12 para la implementación de imágenes multiespectrales*”, se determinó que la metodología de monitoreo para regiones andinas con un sensor multiespectral presenta una ventaja significativa ante la metodología realizada en el proyecto CEPRA-XII-2018-12, puesto que el uso de imágenes multiespectrales permite analizar los diversos tipos de cobertura y sus diferentes tipos de respuesta espectrales de manera específica, más aun, cuando los resultados obtenidos se correlacionan con los valores obtenidos en campo y variables topográficas que permiten generar un análisis integral del estado del humedal. Además, la metodología desarrollada se presenta como un protocolo para el uso del FONAG en sus próximas operaciones de evaluación y monitoreo en los ecosistemas presentes del ACHA.
- En conclusión, la implementación de mapas topográficos en conjunto con los índices espectrales (NDVI, GCI y $\frac{\text{Azul} - \text{Borde rojo}}{\text{Azul} + \text{Borde rojo}}$) obtenidos a partir de un UAV con un sensor multiespectral permiten realizar un análisis integral del humedal Puglllohuma y poder evaluar si las medidas de restauración tomadas por el FONAG han presentado cambios significativos dentro del mismo. En este sentido, se determinó que la instalación de diques de madera ha permitido que zonas altas del humedal aumenten su capacidad de acumulación de agua y por lo tanto aumenten el contenido de humedad en su vegetación y el estado de salud de la misma. Por otra parte, el aislamiento tensionante de la parcela piloto de restauración presenta resultados desfavorables, puesto que la vegetación ubicada dentro de la parcela presenta bajo contenido de clorofila y bajo contenido de humedad a pesar

de encontrarse en la zona central del humedal rodeado de cuerpos de agua donde la vegetación circundante se encuentra en buen estado y posee un alto contenido de humedad.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

- Las conclusiones aportadas nos conllevan a mencionar posibles trabajos futuros que puedan robustecer la metodología propuesta. En este contexto, generar un estudio multitemporal para evaluar el comportamiento espectral de las diferentes coberturas de la zona de estudio y analizar el estado del humedal en diferentes estacionalidades.
- Evaluar la metodología desarrollada en humedales similares o cercanos a la zona de estudio y verificar los resultados obtenidos con datos en campo.
- Generar una metodología general y validada para zonas de la región andina a diferentes gradientes altitudinales, en base a las consideraciones iniciales obtenidas en el presente proyecto.
- Analizar los transectos de vegetación en diferentes periodos del año y compararlos con los parámetros obtenidos a nivel de especie y la fisiología propia de las plantas de paramo.
- Realizar transectos transversales dentro del humedal el día de toma de imágenes para poder validar los resultados de los índices con datos en campo.

REFERENCIAS

- Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E. (1999). *Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección*. Albacete.
- Anyamba, A., & Compton, T. (2017). *Historical Perspectives on AVHRR NDVI and Vegetation Drought Monitoring*. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) 2017*, 41(2), 84–93.
- Bartolucci, L. A., Robinson, B. F., & Silva, L. R. F. (1977). *Field Measurements of the Spectral Response of Natural Waters*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(5), 595–598.
- Blackburn, G. A. (1998). *Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves*. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), 657–675. <https://doi.org/10.1080/014311698215919>
- Boon, M. A., Drijfhout, A. P., & Tesfamichael, S. (2017). *Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W6), 47–54. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>
- Boon, M. A., Greenfield, R., & Tesfamichael, S. (2016). *Wetland assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 781–788. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-781-2016>
- Boon, M. A., & Tesfamichael, S. (2017a). *Wetland hydrological integrity assessment with Unmanned Aerial Systems (UAS)*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3W2), 31–35. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-31-2017>
- Boon, M. A., & Tesfamichael, S. (2017b). *Wetland vegetation integrity assessment with low altitude multispectral UAV imagery*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W6), 55–62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-55-2017>
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). *Threats to water supplies in the tropical andes*. *Science*, 312(5781), 1755–1756. <https://doi.org/10.1126/science.1128087>
- Brooke-Holland, L. (2013). *Unmanned Aerial Vehicles (drones): An Introduction*. UK House of Commons Library Standard Note. Retrieved from <https://fas.org/irp/world/uk/drones.pdf>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). *Human impact on the hydrology of the Andean páramos*. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

- Calo, F. (2018). *¿Cuál es la diferencia entre el índice NDVI y GNDVI? - Soporte*. Retrieved April 16, 2020, from <https://soporte.auravant.com/soporte/cual-es-la-diferencia-entre-el-indice-ndvi-y-gndvi/>
- Carreño, F. (2019). *Curso “Teledetección aplicada a la hidrogeología” módulo I. Introducción a la teledetección (p. 30). p. 30. Ingeoexpert.*
- Cavoukian, A. (2012). *Privacy and Drones : Unmanned Aerial Vehicles. Privacy by Design, Canada, 1(1), 1–27.*
- Chang, J., Clay, D. E., Clay, S. A., & Reese, C. L. (2012). *Using Field Scouting or Remote Sensing Technique to Assess Soybean Yield Limiting Factors. In iGrow Soybean: Best Management Practices for Soybean Production. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/299388638_Using_Field_Scouting_or_Remote_Sensing_Technique_to_Assess_Soybean_Yield_Limiting_Factors*
- Changoluisa, D., & Cayo, S. (2018). *Integración y automatización de un sistema de seguimiento de un UAV para establecer un enlace de comunicación con una estación de monitoreo en tierra. Escuela Politécnica Nacional, Quito.*
- Chen, J., Yang, S., Li, H., Zhang, B., & Lv, J. (2013). *Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40(4W3), 47–50. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>*
- Chimbolema, S., & Ramírez, M. (2019). *Monitoreo de la cobertura vegetal en el humedal Pugllohuma del área de conservación Hídrica Artesana. Quito.*
- Chuvienco E., Martin, M.P., P. A. (2010). *Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination, International Journal of Remote Sensing, 23:23, 5103-5110. International Journal of Remote Sensing, (March 2012), 37–41. Retrieved from <https://scihub.tw/https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160210153129>*
- Coudrain, A., Francou, B., & Kundzewicz, Z. W. (2005). *Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources - Editorial. Hydrological Sciences Journal, 50(6), 925–932. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.925>*
- de Paiva, G. G., Dias, D. R. C., de Paiva Guimarães, M., & Trevelin, L. C. (2017). *Immersive ground control station for unmanned aerial vehicles. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 10404, 595–604. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62392-4_43*
- Dekker, A. (1993). *Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. In Society. Amsterdam: Free Universit.*
- Diaz, J. A., Pieri, D., Arkin, C. R., Gore, E., Griffin, T. P., Fladeland, M., ... 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>*

- Drozd, A., & Fernández, Virginia. (2015). *Capítulo VII: Caracterización de firmas espectrales en distintos tramos del río Uruguay y su relación con variables biológicas y físicas del agua*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317385108_CAPITULO_VII_CARACTERIZACION_DE_FIRMAS_ESPECTRALES_EN_DISTINTOS_TRAMOS_DEL_RIO_URUGUAY_Y_SU_RELACION_CON_VARIABLES_BIOLOGICAS_Y_FISICAS_DEL_AGUA
- Earth observatory NASA. (2000). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. Retrieved April 3, 2020, from https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- Earth Observing System. (2019a). *6 Spectral Indexes on Top of NDVI To Make Your Vegetation Analysis Complete – EARTH OBSERVING SYSTEM*. Retrieved April 16, 2020, from <https://eos.com/blog/6-spectral-indexes-on-top-of-ndvi-to-make-your-vegetation-analysis-complete/>
- Earth Observing System. (2019b, August 30). *NDVI FAQs - Top 23 frequently asked questions about NDVI*. Retrieved April 16, 2020, from <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>
- Elliott, D. A., Nabavizadeh, N., Seung, S. K., Hansen, E. K., & Holland, J. M. (2018). *Radiation Therapy*. In Oral, Head and Neck Oncology and Reconstructive Surgery (pp. 268–290). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26568-3.00013-0>
- Environmental Systems Research Institute. (2016a). *Clasificar campos numéricos para simbología graduada—Ayuda | ArcGIS for Desktop*. Retrieved June 6, 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2016b). *Comparar métodos de interpolación*. Retrieved June 6, 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/comparing-interpolation-methods.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2016c). *Creación y análisis de superficies—Ayuda*. Retrieved April 7, 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/commonly-used-tools/surface-creation-and-analysis.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2016d). *Curvature function—ArcGIS Pro | Documentation*. Retrieved April 22, 2020, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/imagery/curvature-function.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2018). *Cómo funciona Spline—Ayuda | ArcGIS Desktop*. Retrieved June 6, 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/tools/3d-analyst-toolbox/how-spline-works.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2019). *Tendencia—Ayuda | Documentación*. Retrieved June 6, 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/trend.htm>

- Espinosa, N., Monsalve, J., & Gómez, S. (2013). *Análisis de la metodología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cartografía de la guerra en Colombia*. (19), 315–353.
- European Aviation Safety Agency. (2009). *European Aviation Safety Agency Policy E.Y013-01 Policy Statement Airworthiness certification of Unmanned Aircraft Systems (UAS)*.
- European Space Agency. (2009). *¿Qué es la teledetección?* Retrieved March 20, 2020, from http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_0.html
- EVENT38 Unmanned Systems. (2018). *E386 Complete Package – Event 38 Unmanned Systems*. Retrieved March 11, 2020, from <https://event38.com/product/e386-complete-package/?v=0a10a0b3e53b>
- Federal Aviation Administration. (2019, December 16). *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. Retrieved March 5, 2020, from <https://www.faa.gov/uas/>
- FONAG. (2017, May 11). *FONAG inicia la era de restauración de humedales en áreas de intervención*. Retrieved March 2, 2020, from <http://www.fonag.org.ec/web/fonag-inicia-la-era-de-restauracion-de-humedales-en-areas-de-intervencion-2/>
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R. E., Gallego, P. P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., ... Medrano, H. (2015). *UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture*. *Agricultural Water Management*, 153, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.020>
- Gao, B.-C. (1996). *NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space*. *Remote Sens. Environ*, 72(12)(April), 257–266.
- Garzón, J. (2013). *Validación cruzada como método de investigación en la calidad de Modelos Digitales de Elevación*. Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). *Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS*. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). *Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops*. *Geophysical Research Letters*, 32(8), L08403. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gobierno-Ecuador, Gobierno-Chile, CONDESAN, & TNC-Chile. (2008). *Estrategia Regional de Conservación y Uso Sostenible de los Humedales Altoandinos. Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA, (Euroecuatorial Indgrafsa S. A.)*, 34. Retrieved from http://ramsar.rgis.ch/pdf/cop9/cop9_doc26_s.pdf
- Gómez Nieto, I., & Martín, M. P. (2008). *Estudio comparativo de índices espectrales para la cartografía de áreas quemadas con imágenes MODIS*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/157342>
- Green, D. R., Hagon, J. J., Gómez, C., & Gregory, B. J. (2019). *Using Low-Cost*

- UAVs for Environmental Monitoring, Mapping, and Modelling: Examples From the Coastal Zone. In *Coastal Management*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-810473-6.00022-4>
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors* (Switzerland), 17(4), 1–36. <https://doi.org/10.3390/s17040777>
- Gupta, S. G., Ghonge, M., & Jawandhiya, P. M. (2019). Review of Unmanned Aircraft System (UAS). *SSRN Electronic Journal*, 2(4), 1646–1658. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3451039>
- Hassan, M., Yang, M., Rasheed, A., Jin, X., Xia, X., Xiao, Y., & He, Z. (2018). Time-Series Multispectral Indices from Unmanned Aerial Vehicle Imagery Reveal Senescence Rate in Bread Wheat. *Remote Sensing*, 10(6), 809. <https://doi.org/10.3390/rs10060809>
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91(November 2016), 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). *Patrones De Respuesta Espectral*. Universidad de Chile, 3. Retrieved from <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hernández & Montaner 2009 SAF.pdf>
- 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>
- Hubblesite. (2019). *The Electromagnetic Spectrum*. Retrieved March 20, 2020, from <https://hubblesite.org/contents/articles/the-electromagnetic-spectrum>
- Hunt, E. R., Cavigelli, M., Daughtry, C. S. T., McMurtrey, J. E., & Walthall, C. L. (2005). Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 6(4), 359–378. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-2324-5>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). *Informe de estación: M5126 JATUNHUAYCO HISTORICO*. Quito: No publicado.
- Jiménez López, J., & Mulero-Pázmány, M. (2019). Drones for Conservation in Protected Areas: Present and Future. *Drones*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.3390/drones3010010>
- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). Remote sensing of vegetation. In *Oxford University Press*. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.7.13>
- Jorge, J., Vallbé, M., & Soler, J. A. (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 169–177. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- Kharuf-Gutierrez, S., Orozco-Morales, R., Aday Díaz, O. de la C., & Pineda Ruiz, E. (2018). Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. *Sistemas y Telemática*, 16(47). <https://doi.org/10.18046/syt.v16i47.3221>

- Llambí, L. D., Soto, A., Borja, P., Ochoa, B., Celleri, R., & Bievre, B. (2012). *Páramos Andinos: Ecología, hidrología y suelos de páramos*. In *Los suelos del Páramo*. Retrieved from <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56477.pdf>
- 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., Josse, C., & Medina, G. (2000). *Los suelos del páramo*. Quito.
- Micasense. (2018). *RedEdge-MX — MicaSense*. Retrieved March 11, 2020, from <https://www.micasense.com/es/rededge-mx>
- MicaSense. (2020). *What is NDRE? - MicaSense*. Retrieved June 6, 2020, from <https://micasense.com/what-is-ndre/>
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2015). *16 Funcionarios del MAE operan drones de última tecnología en el Parque Nacional Yasuní | Ministerio del Ambiente*. Retrieved April 19, 2020, from <https://www.ambiente.gob.ec/16-funcionarios-del-mae-operan-drones-de-ultima-tecnologia-en-el-parque-nacional-yasuni/>
- Moroni, M., Porti, M., & Piro, P. (2019). Design of a Remote-Controlled Platform for Green Roof Plants Monitoring via Hyperspectral Sensors. *Water*, 11(7), 1368. <https://doi.org/10.3390/w11071368>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. Santa Cruz, Bolivia: BOLFOR.
- National Aeronautics and Space Administration. (2010a). *EMS-Introduction_0.jpeg (2750x1793)*. Retrieved March 20, 2020, from https://smd-prod.s3.amazonaws.com/science-pink/s3fs-public/thumbnails/image/EMS-Introduction_0.jpeg
- National Aeronautics and Space Administration. (2010b). *Introduction to the Electromagnetic Spectrum | Science Mission Directorate*. Retrieved March 20, 2020, from https://science.nasa.gov/ems/01_intro
- National Aeronautics and Space Administration. (2020). *Remote Sensors*. Retrieved March 3, 2020, from <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Nonami, K., Kendoul, F., Wang, W., Nakazawa, D., & Satoshi, S. (2013). *Autonomous Flying Robots*. In *Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53)*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ortiz, E., & Toapanta, A. (2019). *Informe de mapas CUT Puglllohuma y Jatunhuyaco*. Quito.
- Orúe, M. E., Laterra, P., & Cabria, F. (2007). *Expansión de la frontera agrícola en Argentina y erosión hídrica: mapas de riesgo utilizando el Modelo Usle con apoyo de SIG*. *Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, 185–

192. Retrieved from <http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg24.pdf>

- Papoutsas, C., Hadjimitsis, D. G., & Alexakis, D. (2011). Characterizing the spectral signatures and optical properties of dams in Cyprus using field spectroradiometric measurements. In C. M. U. Neale & A. Maltese (Eds.), *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII* (Vol. 8174, p. 817419). <https://doi.org/10.1117/12.898353>
- Paramasivam, C. R., & Venkatramanan, S. (2019). An introduction to various spatial analysis techniques. In *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (pp. 23–30). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00003-1>
- Parece, T. E., & Campbell, J. B. (2015). Land use/land cover monitoring and geospatial technologies: An overview. In *Handbook of Environmental Chemistry* (Vol. 33, pp. 1–32). https://doi.org/10.1007/978-3-319-14212-8_1
- Pauli, D., Chapman, S. C., Bart, R., Topp, C. N., Lawrence-Dill, C. J., Poland, J., & Gore, M. A. (2016). The quest for understanding phenotypic variation via integrated approaches in the field environment. *Plant Physiology*, 172(2), 622–634. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00592>
- Penn State College. (2018). *Multispectral Imaging from Space | The Nature of Geographic Information*. Retrieved March 11, 2020, from <https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/node/1899>
- Pix4D. (2020a). How to generate the point cloud classification – Support. Retrieved March 15, 2020, from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115004864586-How-to-generate-the-point-cloud-classification#gsctab=0>
- Pix4D. (2020b). Menu Process > Processing Options... > 1. Initial Processing > General – Support. Retrieved March 15, 2020, from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557759-Menu-Process-Processing-Options-1-Initial-Processing-General#label3>
- Pix4D. (2020c). Menu Process > Processing Options... > 3. DSM, Orthomosaic and Index > DSM and Orthomosaic – Support. Retrieved March 18, 2020, from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557769-Menu-Process-Processing-Options-3-DSM-Orthomosaic-and-Index-DSM-and-Orthomosaic>
- Pix4D. (2020d). Pix4Dmapper – Support. Retrieved March 19, 2020, from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/categories/360001503192-Pix4Dmapper>
- Ranquist, E., Steiner, M., & Argrow, B. (2016). Exploring the Range of Weather Impacts on UAS Operations. 18th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, 11.
- Rhumb Line Maps. (2015, October 12). *Classification Methods: equal interval, natural breaks (jenks), geometric interval, quantile* - YouTube. Retrieved June 6, 2020, from <https://www.youtube.com/watch?v=0ebL8OvG8Jc>
- Rubin, J. (2019). NDRE vs NDVI: ¿Cuál es la diferencia? - Aerobotics. Retrieved April 16, 2020, from <https://blog.aerobotics.co/ndre-vs-ndvi-cuál-es-la-diferencia-7fff46e288c>

- Sauter, B. (2007). *Weather Impacts on the Aerostar Unmanned Aircraft System Based on Climatology over the U.S./Mexico Border*.
- Schlemmera, M., Gitelson, A., Schepersa, J., Ferguson, R., Peng, Y., Shanahana, J., & Rundquist, D. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>
- ScienceAtNASA. (2010). *Tour of the EMS 01 - Introduction*. Retrieved March 20, 2020, from https://www.youtube.com/watch?v=lwfJPC-rSXw&feature=emb_title
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2002). *Ramsar COP8 Resolución VIII.39*. Retrieved from http://archive.ramsar.org/pdf/res/key_res_viii_39_s.pdf
- Sentera. (2019). *NDVI vs. NDRE: What's the Difference?*. Retrieved April 16, 2020, from <https://sentera.com/ndvi-vs-ndre-whats-difference/>
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Thuy Mai. (2017, August 7). *What are passive and active sensors?* | NASA. Retrieved March 3, 2020, from https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html
- Toapanta, A. (2015). *Informe Técnico del Componente Flora*. Quito.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Valencia, E., Alulema, V., & Rodríguez, D. (2019). *Wetland Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles with Electrical Distributed Propulsion Systems*. In *Propulsion Systems*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84402>
- Valencia, E., Changoluisa, I., Palma, K., Ayala, P., & Cruz, P. (2020). *Methodology for technification of wetland monitoring in the Andean region using satellite and UAV imagery*. Unpublished. *European Journal on Remote Sensing*, 1–15.
- Valencia, E., Oña, M. A., Rodríguez, D., Oña, A., & Hidalgo, V. (2019). *Experimental performance assessment of an electric uav with an alternative distributed propulsion configuration implemented for wetland monitoring*. *AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2019*. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4461>
- Valencia, E., Palma, K., Changoluisa, I., Hidalgo, V., Cruz, P., Cevallos, C., ... Jara, N. (2020). *Wetland monitoring through the deployment of an autonomous aerial platform*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 432, 8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/432/1/012002>
- Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. In *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and*

geomorphologic mapping. <https://doi.org/10.2307/634926>

- Verhoeven, G. J. J., & Archaeology, V. (2018). The reflection of two fields – Electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. *AARGnews*, (November), 10–18. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3534245>
- Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M., & Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change*, 59(1–2), 75–99. <https://doi.org/10.1023/A:1024406427519>
- Walker, S. W. (2010). *Integrating department of defense unmanned aerial systems into the national airspace structure*. B.S., U.S. Air Force Academy.
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- WWF, W. W. F. G. D. (2005). *Los humedales altoandinos*. Retrieved from http://awsassets.panda.org/downloads/los_humedales_altoandinos_es.pdf