

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Informe HB-0026-2025

MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Barranquilla, enero 20 de 2025.

Entidad Contratante: Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA)

Empresa o Consorcio Responsable: Labormar-Maxdrone

Colaboradores y Responsables del Proyecto

Director del Proyecto: Juan Sebastian Vargas Pérez

Especialistas e Investigadores:

Maiker Rojas Castro

Alejandro Corrales Barrera

Operadores de Drones:

Jason Giovanni Carrero Botero

Aprobado por:

Jose A. Otero Noriega

Maiker Rojas Castro

Fecha y Lugar de Elaboración: Barranquilla, Atlántico - Enero 2025

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

1. Introducción	4
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo General.....	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. Antecedentes	6
Mapa en RGB en Ultra Alta Resolución	6
Mapas de Índices Multiespectrales	7
Fotogrametría y Teledetección	7
Mapas de Índices de Calidad de Agua	8
Índices Multiespectrales para la Evaluación de la Calidad del Agua	11
Teledetección para la Detección de Cianobacterias.....	11
La Clorofila y su Relación con la Detección de Cianobacterias.....	12
Variabilidad de la Reflectancia según el Estado del Cuerpo de Agua.....	14
Modelos Espectrales para la Identificación de Cianobacterias	15
4. Consideraciones Teóricas	20
Teledetección para seguimiento de cuerpos de agua	
Satélite Sentinel 2A	
Drones en labores de Teledetección en cuerpos de agua	
Mavic 3 Multiespectral	
5. Justificación	20
6. Metodología	21
Cuerpos de agua a ser estudiados	21
Datos a Recolectar	22
Metodología de monitoreo	22
Campañas de Vuelos.....	23
Procesamiento de Imágenes y Análisis Geoestadístico	24
7. Resultados.....	29
Ciénaga de Balboa	29
Mallorquín	38
Tocaguas	46
Luruaco	49
8. Bibliografía	52

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

1. Introducción

El monitoreo de la calidad del agua es una actividad fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en regiones donde los cuerpos de agua desempeñan un papel clave en los ecosistemas y en las actividades económicas y sociales. En este contexto, la teledetección multiespectral mediante drones ha emergido como una herramienta innovadora que permite obtener información precisa y en tiempo real sobre la calidad del agua en grandes extensiones geográficas, optimizando los procesos de evaluación y gestión ambiental.

El presente documento se desarrolla en el marco del concurso de méritos No. CM-2024-0007, cuyo objetivo es realizar el monitoreo fisicoquímico, microbiológico e hidrobiológico sobre la calidad y estado actual de las fuentes hídricas del Departamento del Atlántico, conforme a lo establecido en el Plan de Acción Institucional 2024 - 2027 de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (C. R. A.). Este proyecto busca contribuir al conocimiento y preservación de las condiciones ecológicas de cuerpos de agua estratégicos como la Ciénaga de Mallorquín, la Ciénaga de Malambo, la Ciénaga El Convento y la Ciénaga de Balboa.

El monitoreo de la calidad del agua es un componente esencial en la gestión de los recursos hídricos, ya que permite detectar cambios en los parámetros fisicoquímicos y biológicos que pueden indicar la presencia de contaminación o alteraciones en los ecosistemas acuáticos. Tradicionalmente, este monitoreo se ha realizado mediante la recolección de muestras in situ y su posterior análisis en laboratorio. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones en cuanto a cobertura espacial y temporal, lo que dificulta la identificación temprana de problemas ambientales.

En este sentido, la integración de técnicas de teledetección multiespectral con drones ofrece una solución eficaz para ampliar la cobertura del monitoreo, reducir costos operativos y generar información georreferenciada en alta resolución. Esta metodología permite correlacionar los

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

resultados obtenidos en laboratorio con las imágenes captadas, generando mapas detallados de parámetros clave como los sólidos suspendidos totales (SST) y la presencia de cianobacterias.

Este proyecto tiene como finalidad el desarrollo de un sistema de monitoreo basado en teledetección para evaluar la calidad del agua en los cuerpos hídricos del Departamento del Atlántico. Para ello, se emplea la aeronave Mavic 3 Multiespectral, equipada con sensores capaces de capturar imágenes en diferentes longitudes de onda, lo que permitirá obtener índices espectrales asociados con la calidad del agua.

El monitoreo incluirá la elaboración de ortomosaicos multiespectrales georreferenciados, la aplicación de modelos estadísticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y la generación de mapas normativos que faciliten la toma de decisiones en la gestión ambiental

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo de calidad del agua basado en teledetección multiespectral mediante drones, para evaluar y caracterizar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los cuerpos de agua en el Departamento del Atlántico, contribuyendo a la gestión sostenible de los recursos hídricos.

2.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema de monitoreo remoto basado en el uso de drones multiespectrales para la captura de imágenes de alta resolución en los cuerpos de agua seleccionados.
- Desarrollar modelos estadísticos que correlacionen los valores espectrales obtenidos con los resultados de laboratorio de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de interés.
- Generar mapas georreferenciados de calidad del agua mediante la integración de datos espectrales y análisis geoestadísticos.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- Evaluar la presencia de cianobacterias y la concentración de sólidos suspendidos totales mediante la aplicación de índices espectrales específicos.
- Proponer estrategias de gestión ambiental basadas en los resultados obtenidos, para contribuir a la conservación y recuperación de los ecosistemas acuáticos en la región

3. Antecedentes

El monitoreo de cuerpos de agua ha evolucionado significativamente con la introducción de drones equipados con sensores multiespectrales. En el Departamento del Atlántico, la Corporación Autónoma Regional (C. R. A.) ha contratado al consorcio Labormar-Maxdrone para la ejecución de estudios sobre la calidad de agua en humedales estratégicos, como la Ciénaga de Mallorquín, la Ciénaga de Malambo, la Ciénaga El Convento y la Ciénaga de Balboa.

Mapas en RGB en Ultra Alta Resolución

Con las prestaciones de la aeronave disponible (Mavic 3 Multiespectral) y la autonomía de vuelo (hasta 5 horas con 7 ciclos recargables de vuelo continuo) se pueden levantar hasta 300 hectáreas por día, a 120 metros de altura con una resolución en los mapas menor a 5 centímetros por píxel de imagen ortorrectificada en formato RGB y menos de 10 cm/píxel en el caso de los mapas multiespectrales. Estos productos se obtienen georreferenciados, lo que hace posible su carga en el SIRH, subsistema del componente de recursos hídricos del SIAC.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Figura 1. Mapa RGB en Ultra-Alta Resolución (GSD de 3.65 cm/píxel) de la ensenada de Puerto Mosquito (ubicada en Ciénaga de Mallorquín). Producto Geomático obtenido durante el ejercicio de validación del método Ecodron. Elaboración Propia.

Mapas de Índices Multiespectrales

El monitoreo de cuerpos de agua mediante teledetección se basa en principios de fotogrametría, espectrometría y estadística multivariante. La fotogrametría digital permite obtener imágenes ortorrectificadas de alta resolución, mientras que la espectrometría aplicada a sensores multiespectrales facilita la identificación de distintos compuestos presentes en el agua, como los Sólidos Suspendidos Totales (SST, mediante índices multiespectrales de la literatura técnica reconocida y Análisis de Regresión Múltiple -ARM-), la clorofila (gracias a los picos característicos en las firmas espectrales de cuerpos de agua con presencia de este elemento) y la ficocianina (pigmento relacionado con la presencia de cianobacterias, gracias al pico de absorción -que se presenta como un mínimo en la firma espectral de reflectancia- hacia los 650 nanómetros).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Fotogrametría y Teledetección

La fotogrametría aérea ha evolucionado con la incorporación de drones, que permiten la captura sistemática de imágenes en diversas longitudes de onda. En este estudio, el Mavic 3 Multiespectral dispone de sensores en el espectro visible (Verde, Rojo) y en el espectro no visible (Borde Rojo e Infrarrojo Cercano), lo que posibilita el análisis de la calidad del agua mediante modelos espectrales.

Gracias al Análisis de Regresión Múltiple -de aquí en más, ARM-, es posible obtener un modelo estadístico donde las variables independientes corresponden a los valores de reflectancia de los ortomosaicos multiespectrales obtenidos del procesamiento fotogramétrico de las imágenes captadas con los sensores portados en la aeronave Mavic 3 Multiespectral.

En el ARM la variable dependiente del modelo corresponde a los resultados del parámetro de interés (Sólidos Suspendidos Totales, en mg/L; conteo de individuos por unidad de volumen, en el caso de las cianobacterias) debidamente georreferenciados en los mapas de donde se obtendrán los valores correspondientes de reflectancia provenientes de los ortomosaicos espectrales anteriormente mencionados, estos valores de reflectancia, corresponderán a las variables dependientes del modelo a ser obtenido mediante ARM. En un ejercicio anterior, se ha podido obtener para la misma área mencionada anteriormente, un Mapa de Concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales gracias a esta técnica, que se muestra en la siguiente imagen.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

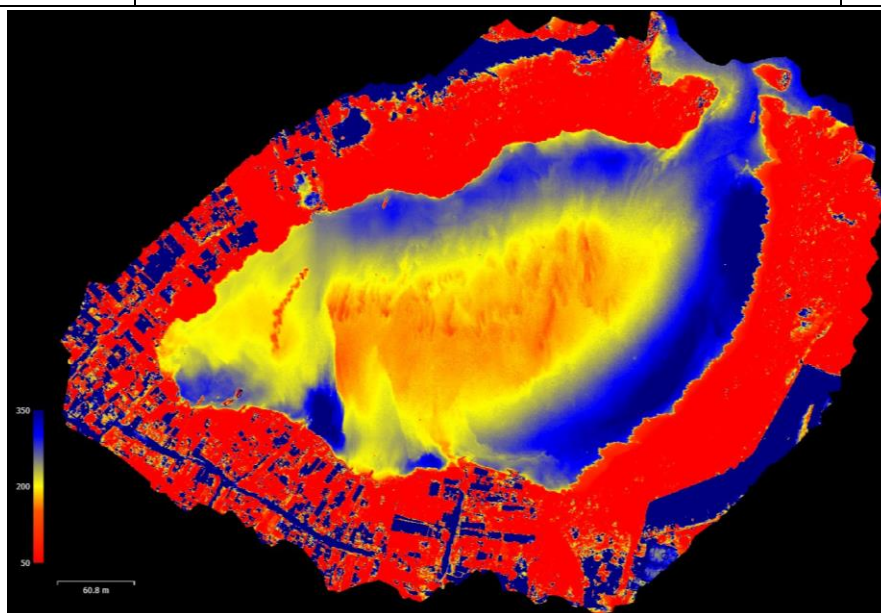


Figura 2. Mapa de Concentraciones de Sólidos Suspendedos Totales (en mg/L) con un GSD de 5.66 cm/píxel.

Dicho mapa muestra un índice multispectral calculado con la siguiente expresión,

$$SST \text{ (mg/L)} = 0,0000096 + 0,0143 * G + 0,00552 * R + 0,0231 * RE - 0,0281 * NIR$$

que, aplicada en el módulo de calculadora ráster del software Metashape, permite la generación del mapa de concentraciones de los Sólidos Suspendedos Totales (SST) en miligramos por Litro, de toda el área mapeada con el dron Mavic 3 Multispectral.

Mapas de Índices de Calidad de Agua

Asimismo, se podrán obtener mapas de calidad de agua para el parámetro de interés basado en la normativa local aplicable (en este caso la Resolución Nro. 0000449 del 2021 de la CRA) que establece límites máximos específicos para los cuerpos de agua (en el caso de los Sólidos Suspendedos Totales, este límite es de 40 mg/L). Este mapa normativo se muestra en la imagen siguiente, elaborado con una escala de visualización intuitiva, tipo semáforo, para su rápida interpretación.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

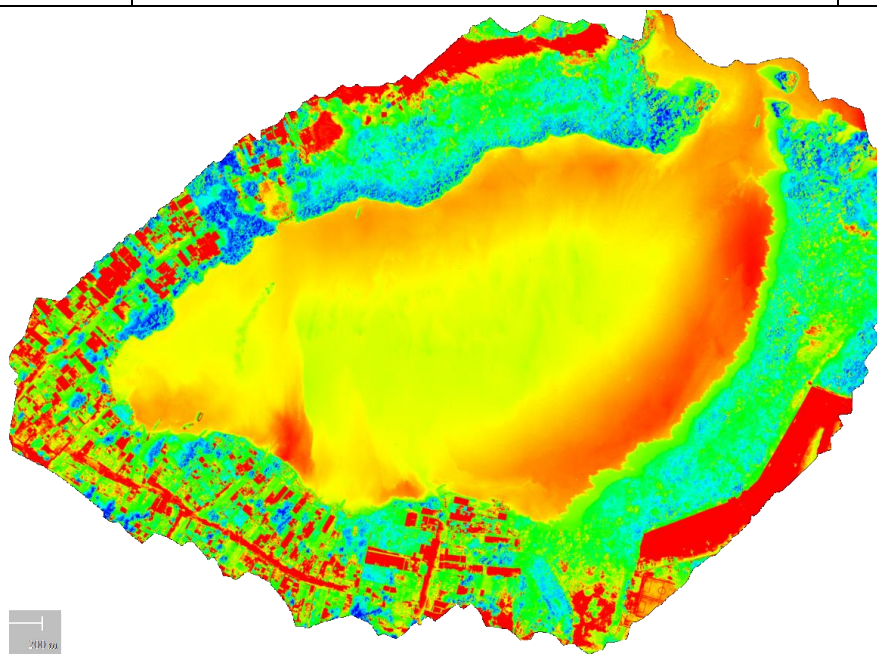


Figura 3. Mapa 'Normativo' con escala tipo semáforo, donde se muestran en porcentaje los niveles por debajo (en **verde**), iguales (**amarillo**) o superiores (en **rojo**) al valor de referencia de la norma local (prevista por la Corporación Regional Autónoma del Departamento del Atlántico) para el parámetro fisicoquímico seleccionado (Sólidos Suspendedos Totales, mg/L).

Otros índices muy útiles para identificación de materia disuelta o turbidez pueden ser aplicados al juego de imágenes que se logren procesar por medio de la ortorrectificación fotogramétrica, a saber:

1. **NDTI:** formulado por Lacaux, J. P. (2007) en el estudio "Classification of ponds from High-spatial resolution Remote Sensing. Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal". Este índice relaciona de manera normalizada las bandas de las longitudes de onda correspondientes al Verde y el Rojo.
2. **TSM -Total Suspended Matter-:** este índice relaciona de manera sencilla dos bandas, el rojo y el verde, en forma de cociente, como numerador y denominador en el orden enunciado.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Es de muy fácil aplicación si el sensor usado para fotografiar el cuerpo de agua dispone de estas.

Estos índices permitirán realizar mapas asociados a la turbidez del cuerpo de agua, los cuales se pueden calibrar con datos de campo tomados en sitio. La ventaja del NDTI sobre el TSM es que, al ser normalizado, reporta valores positivos para aguas productivas de alta turbidez y negativos para el comportamiento contrario, a diferencia del TSM que no permitiría discriminar este tipo de comportamiento ya que reporta valores positivos para todo tipo de objetos (cuerpos en agua o no) que produzcan reflectancia en ambas bandas involucradas en su cálculo.

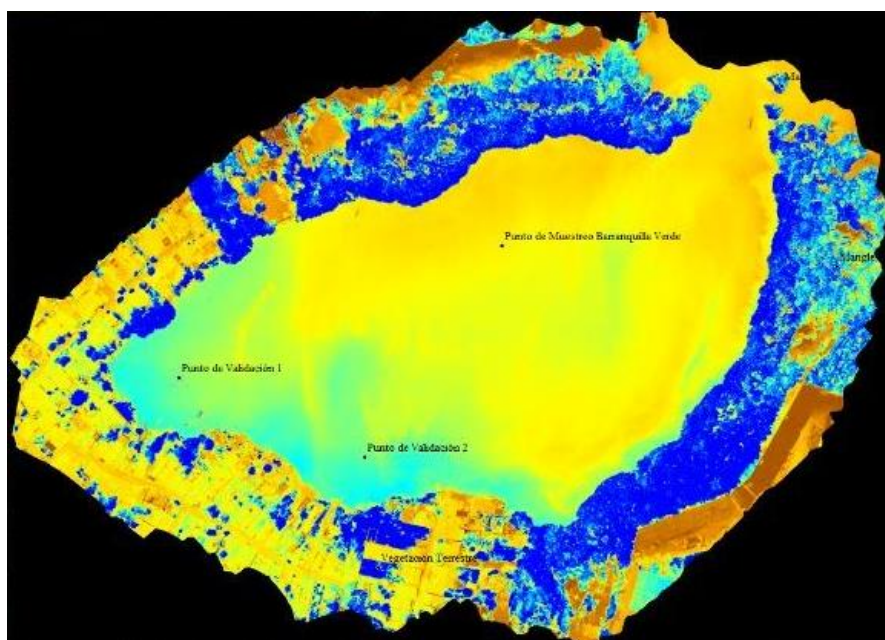


Figura 4. Mapa de Turbidez de la ensenada de Puerto Mosquito, diseñado con valores producto del análisis ráster de las imágenes multiespectrales con el índice NDTI.

Estos Productos podrán obtenerse gracias a la captación de imágenes y aplicando índices de la literatura técnica reconocida, en adición al uso de técnicas de estadística avanzada (Análisis de Regresión Múltiple) obteniendo índices multiespectrales y generando mapas de alta resolución correlacionados con resultados de laboratorio de muestras tomadas en sitio.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Otros Índices Multiespectrales para la Evaluación de la Calidad del Agua

En el caso de los parámetros relacionados con la presencia de vida vegetativa o florecimientos descontrolados de microalgas o fitoplancton (en especial las cianobacterias) algunos índices pueden aplicarse para tener un conocimiento preliminar del estado de la calidad de las aguas en el cuerpo a ser estudiado, estos pueden ser:

- **Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI):** Compara el Infrarrojo Cercano y el Rojo para determinar la presencia de vegetación acuática.
- **Índice de Diferencia Normalizada de Clorofila (NDCI):** Se basa en la diferencia entre las bandas del Borde Rojo y el Rojo para la detección de clorofila, que puede indicar la presencia de cianobacterias cuando el índice NDVI no indique la presencia de macrófitas o microalgas (valores positivos del NDVI).

El uso combinado de estos índices, junto con análisis geoestadísticos en software especializado como Metashape y R, ha permitido la generación de mapas detallados de la calidad del agua, esenciales para la toma de decisiones ambientales.

Asimismo, en el caso del parámetro fisicoquímico de Sólidos Suspendidos Totales, es posible determinar el subíndice ICA para el mismo, presentándose como un mapa y no como un valor alfanumérico que sólo refleja la condición del espejo de agua en los sitios de muestreo.

Teledetección para la identificación de Cianobacterias

El monitoreo de cianobacterias mediante técnicas de teledetección ha sido menos utilizado en aguas interiores en comparación con los océanos, debido a la complejidad de los constituyentes presentes en estos cuerpos de agua. Entre estos elementos se encuentran el fitoplancton, partículas de algas, materia orgánica y detritus, cuya contribución a la absorción de luz varía según las condiciones del agua.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

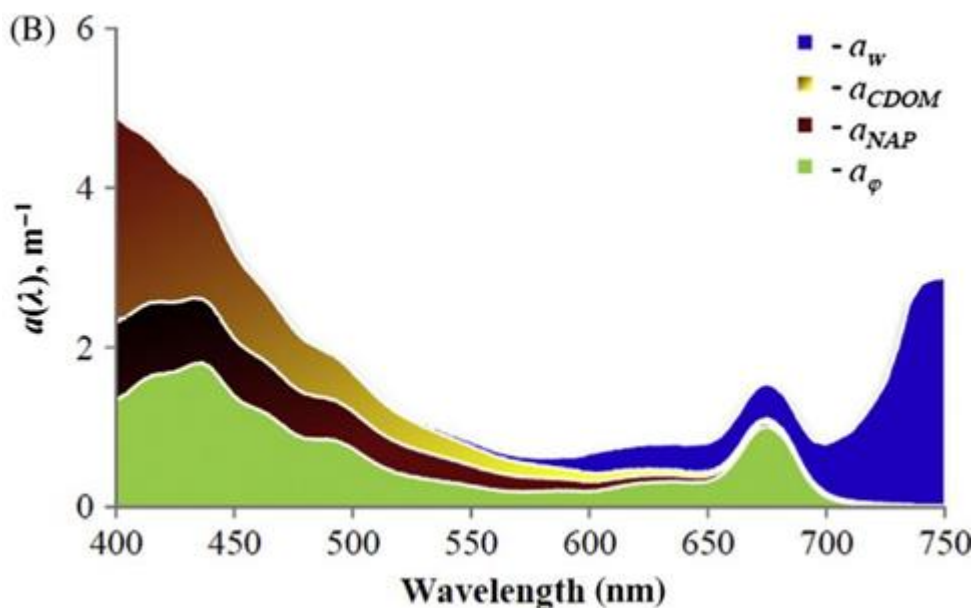


Figura 5. Coeficientes de absorción de fitoplancton, partículas inorgánicas, materia orgánica disuelta y agua pura, $a_{phy}(\lambda)$, $a_{NAP}(\lambda)$, $a_{CDOM}(\lambda)$, y $a_w(\lambda)$, para una estación de muestreo con concentraciones de clorofila-a de $58,1 \frac{mg}{m^3}$. Tomado de Gurlin (2012).

La Clorofila y su Relación con la Detección de Cianobacterias

Uno de los elementos clave en la identificación de cianobacterias es la clorofila, particularmente la Clorofila-a y Clorofila-b. Si bien los picos de reflectancia de estos compuestos entre 400 y 500 nm pueden confundirse con otras sustancias, los valores observados entre 600 y 700 nm constituyen un indicador más confiable de su presencia en la superficie del agua.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

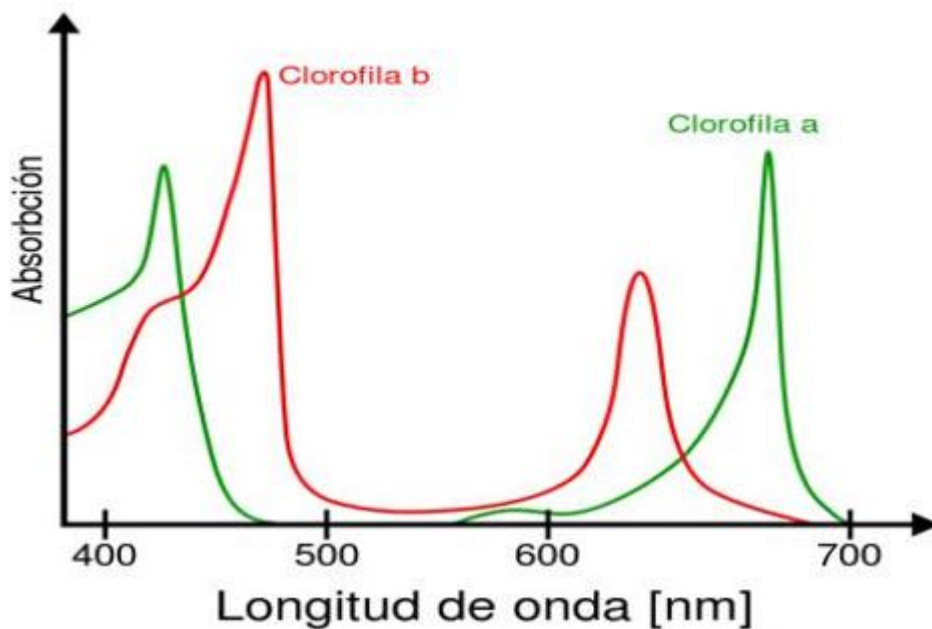


Figura 6. Absorción de las clorofilas *a* y *b*, a distintas longitudes de onda. Nótese que la Clorofila-*a* tiene un pico de absorción (por ende un mínimo en la señal de reflectancia) hacia los 700 nm (longitud de onda en las proximidades del Borde Rojo).

En cuerpos de agua eutrofizados, las mediciones in situ de reflectancia muestran picos específicos asociados con distintos componentes:

- **Materia en suspensión y materia orgánica:** Pico alrededor de los 550 nm (alrededor de la longitud de onda del verde en el espectro visible).
- **Cianobacterias:** Pico cerca de los 650 nm y un valle hacia los 680 nm (longitudes de onda correspondientes a la banda del Rojo).
- **Clorofila proveniente de cianobacterias, microalgas o macroalgas:** Pico entre 700 y 750 nm (longitudes de onda correspondientes a la banda del Borde Rojo).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

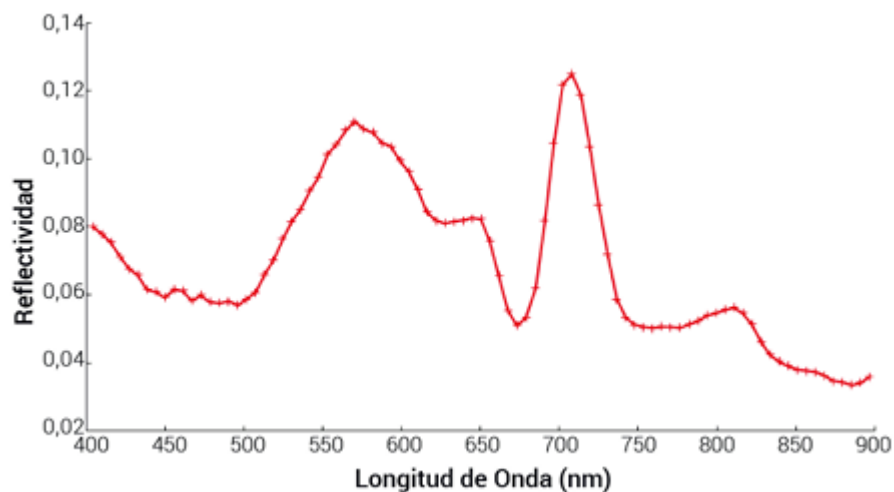


Figura 7. Espectro de reflectividad del agua típico de un lago hipertrófico (Delegido, Tenjo, Ruiz, Verdú, Peña & Moreno, 2014)

Este comportamiento espectral permite estimar la presencia de cianobacterias en los cuerpos de agua mediante modelos analíticos y semi-empíricos que procesan imágenes captadas con sensores multiespectrales e hiperespectrales.

Variabilidad de la Reflectancia según el Estado del Cuerpo de Agua

A medida que aumenta el nivel de eutrofización del agua, se intensifican los picos de reflectancia en longitudes de onda del Rojo y Borde Rojo. En cuerpos de agua oligotróficos, la reflectancia se concentra en los 550 nm, mientras que en cuerpos mesotróficos o hipereutróficos se observan picos pronunciados desde los 650 nm en adelante debido a la alta productividad biológica.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

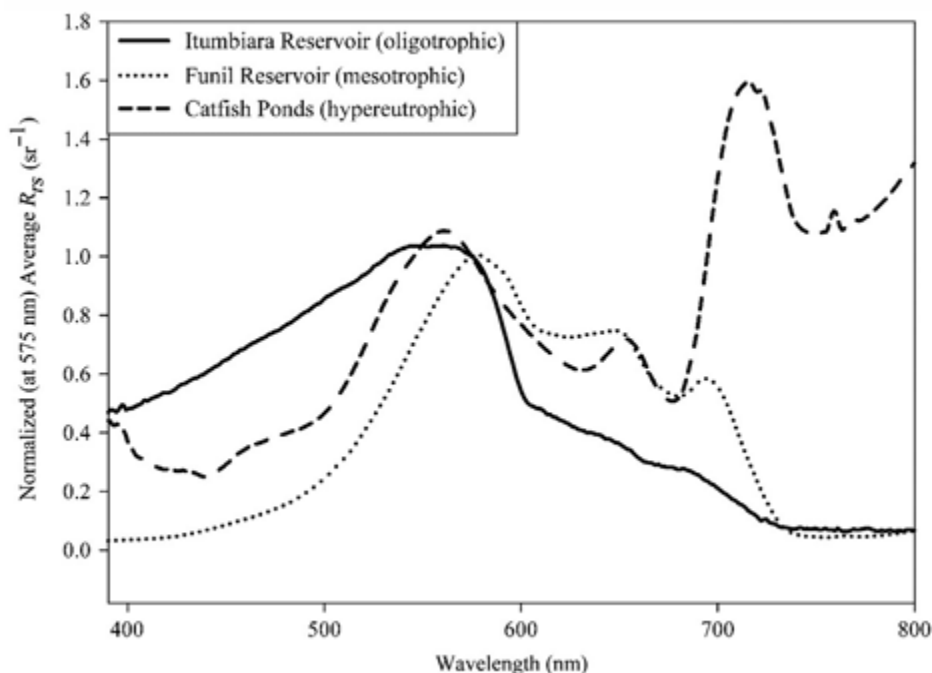


Figura 8. Reflectancia Normalizada Promedio (R_{rs}) para tres cuerpos de agua continentales que representan aguas oligotróficas (Itumbiara Reservoir, clorhidrato de amonio: 0,25 10,20 $\mu\text{g/L}$; SST: 0,25 1,81 mg/L; COD: 0,53 2,59 mg/L); aguas mesotróficas (Funil Reservoir, clorhidrato de amonio: 4,92 52,78 $\mu\text{g/L}$; PC: 9,16 35,95 $\mu\text{g/L}$; SST: 4,50 9,50 mg/L; COD: 0,91 6,30 mg/L); y aguas hipereutróficas (Catfish Ponds, clorhidrato de amonio: 59,40 1376,60 $\mu\text{g/L}$; PC: 68,13 857,08 $\mu\text{g/L}$). (Mishra et al., 2017).

Modelos Espectrales para la Identificación de Cianobacterias

Legleiter y otros (2022) establecieron una librería de firmas espectrales para distintos géneros de cianobacterias, basándose en estudios previos de Slonecker y otros (2021), quienes captaron espectros en especímenes de laboratorio y los identificaron mediante imágenes fotográficas. Estas bases de datos han sido publicadas con el auspicio del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la NASA, permitiendo la determinación de rangos espectrales que pueden ser detectados con sensores específicos.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

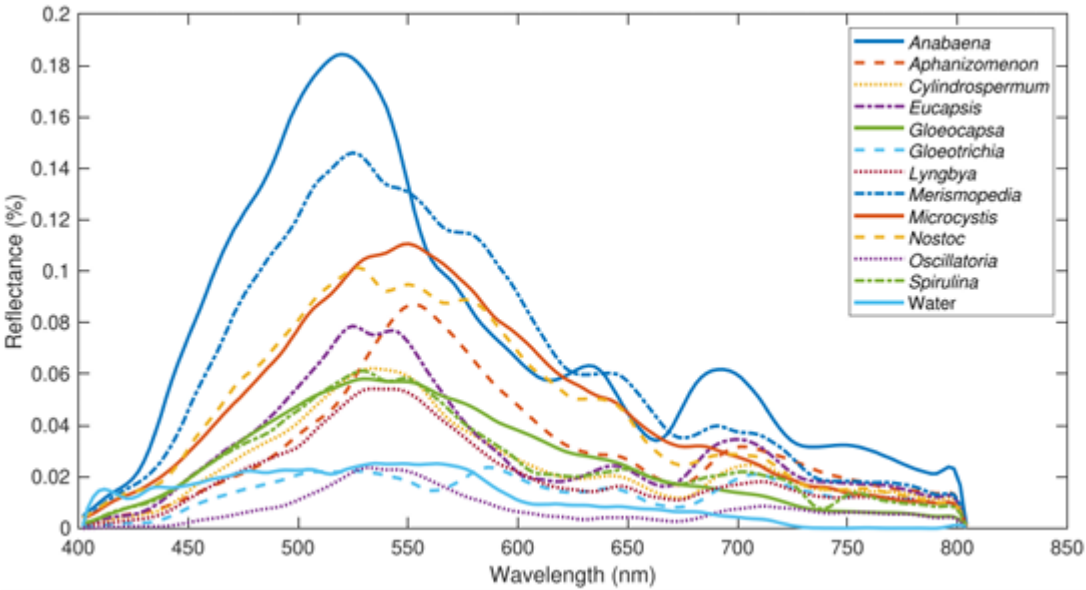


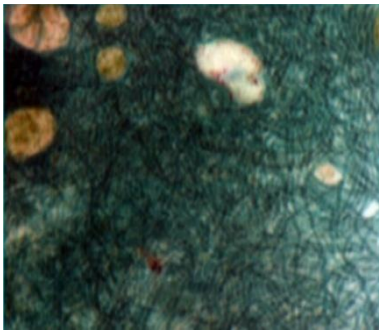
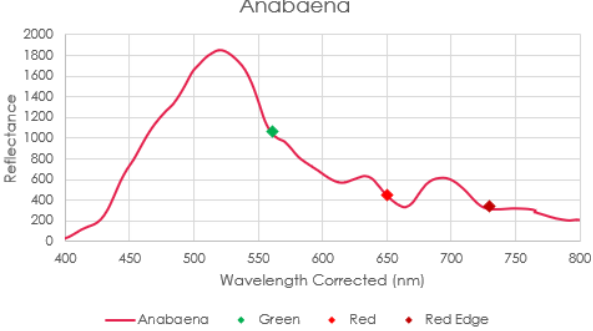
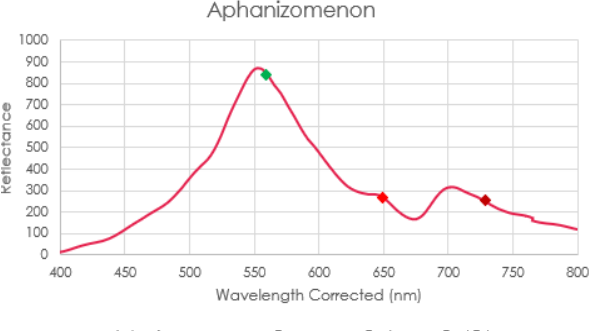
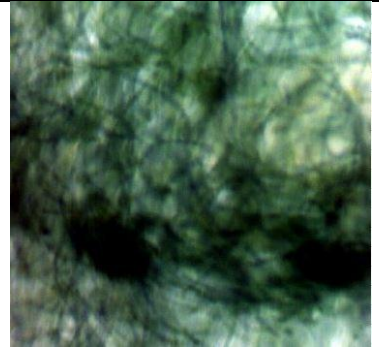
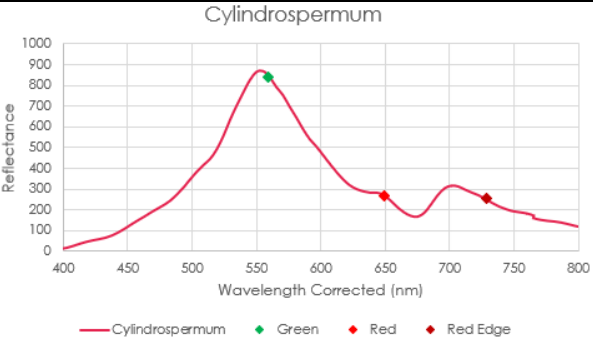
Figura 9. Espectros de Reflectancia para distintos géneros de Cianobacterias (según Legleiter y otros 2022).

En el caso del Mavic 3 Multiespectral, las cámaras Verde, Rojo y Borde Rojo permiten la detección de cianobacterias bajo la hipótesis de que estas reflejan energía de manera distinta a la vegetación en la banda del Infrarrojo Cercano (NIR). Esto facilita la discriminación entre las cianobacterias y otras formas de vida vegetativa acuática.

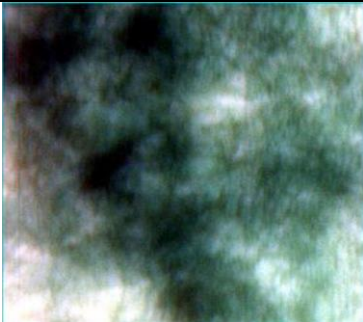
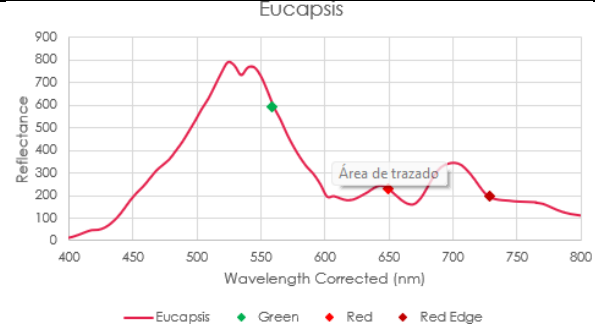
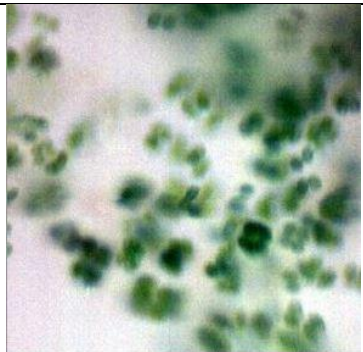
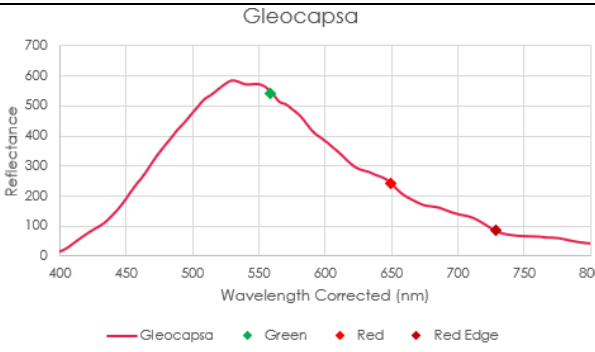
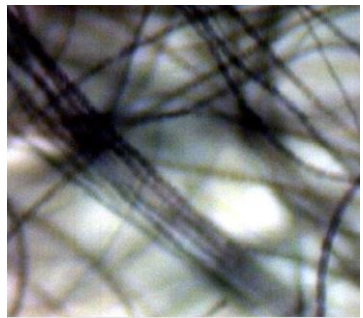
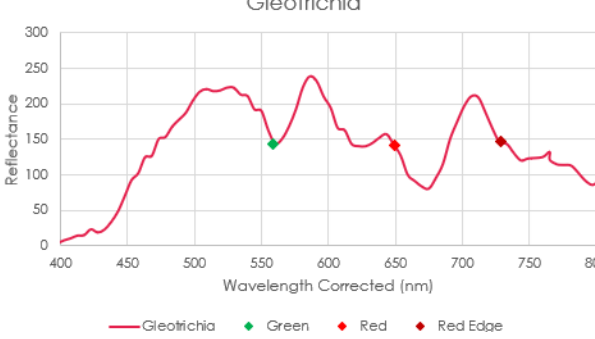
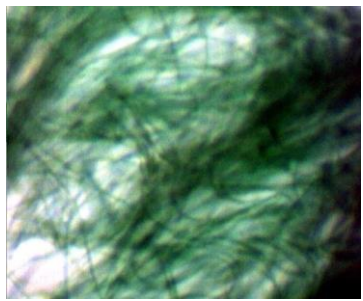
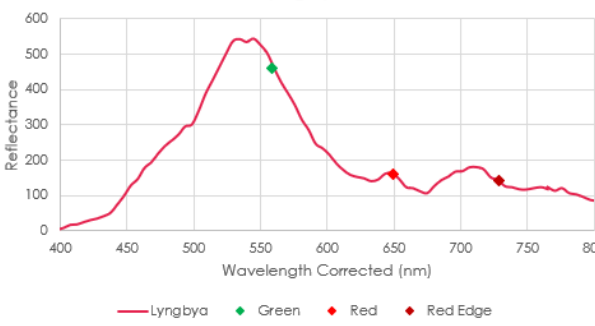
La siguiente Tabla contiene un conjunto de gráficas e imágenes que representan una colección de firmas espectrales, mostrando imágenes RGB y dichas firmas de reflectancia, de algunas de las formas más comunes de cianobacterias. (Slonecker y otros, 2021).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Tabla 1. Representación de microorganismos y los centros de banda en los espectros Verdes (G) Rojo (R) y Borde Rojo (RE) que son capaces de captar las cámaras espectrales de la aeronave DJI Mavic 3 Multiespectral.

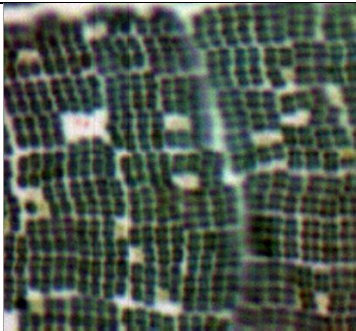
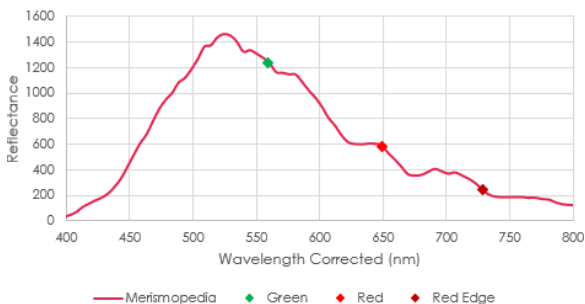
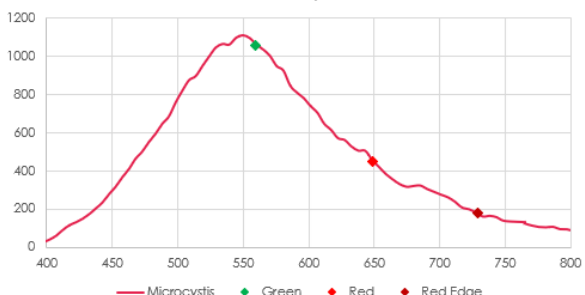
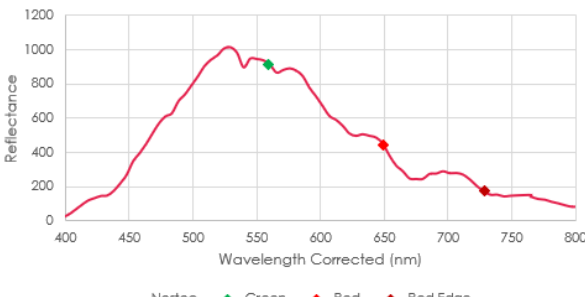
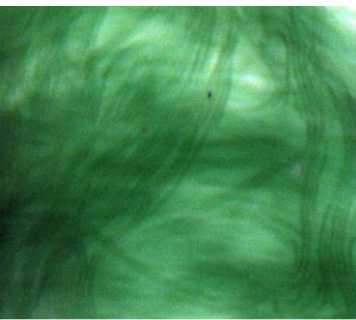
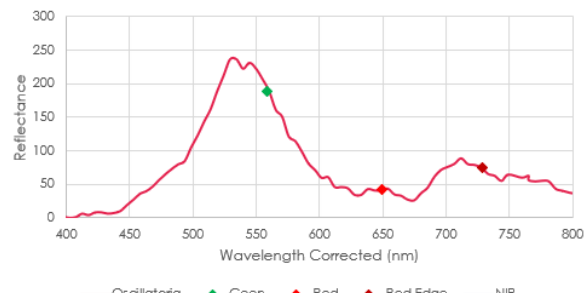
Nombre	Imagen	Espectro y puntos de reflectancia (G, R, RE)
Anabaena		Anabaena 
Aphanizomenon		Aphanizomenon 
Cylindrospermum		Cylindrospermum 

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Eucapsis		
Gleocapsa		
Gleotrichia		
Lyngbya		

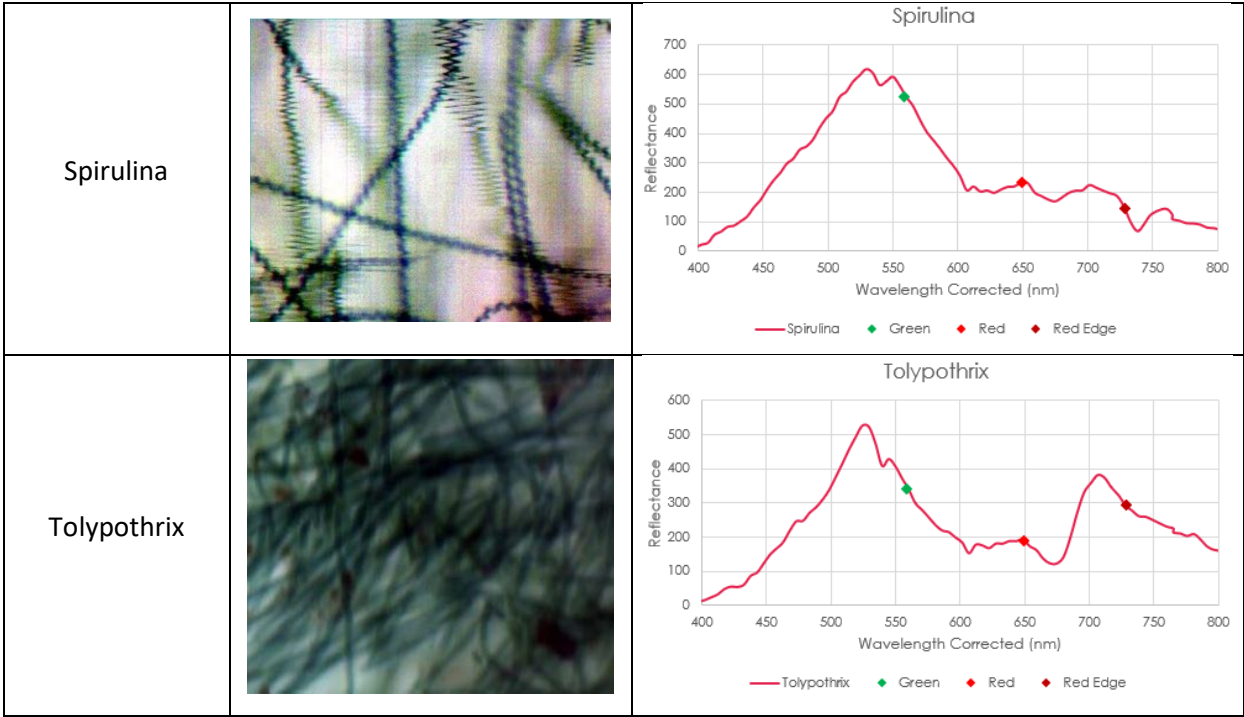
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Merismopedia		Merismopedia  Reflectance Wavelength Corrected (nm) Merismopedia Green Red Red Edge
Microcystis		Microcystis  Reflectance Wavelength Corrected (nm) Microcystis Green Red Red Edge
Nostoc		NOSTOC  Reflectance Wavelength Corrected (nm) Nostoc Green Red Red Edge
Oscillatoria		Oscillatoria  Reflectance Wavelength Corrected (nm) Oscillatoria Geen Red Red Edge NIR

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



5. Consideraciones Teóricas

Teledetección para seguimiento de cuerpos de agua

En el ejercicio de validación mencionado anteriormente, Maxdrone SAS realizó una campaña de prueba con una metodología que se encuentra actualmente bajo solicitud de patente ante la SIC. Esta metodología (que se ha denominado Método Ecodron) implica el uso de drones para la recolección de muestras de agua, la captura de imágenes para realización de modelos multiespectrales y posterior análisis con técnicas estadísticas para extrapolar los resultados de laboratorio a todas aquellas áreas de cuerpo de agua con datos disponibles en las imágenes multiespectrales para aplicar el modelo.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

En el caso específico de las cianobacterias, se realizó una investigación que permitiera la proposición de índices de diseño con los cuales demostrar el indicio de la presencia de cianobacterias o fitoplancton en general.

Gracias al comportamiento de la firma espectral en cuerpos de agua eutrofizados podemos estimar la presencia de cianobacterias. Hoy día existen diversos modelos analíticos y/o semi-empíricos que nos permiten usar expresiones de tratamiento de las imágenes para procesarlas, haciendo posible su visualización con técnicas de teledetección multiespectral o incluso hiperespectral.

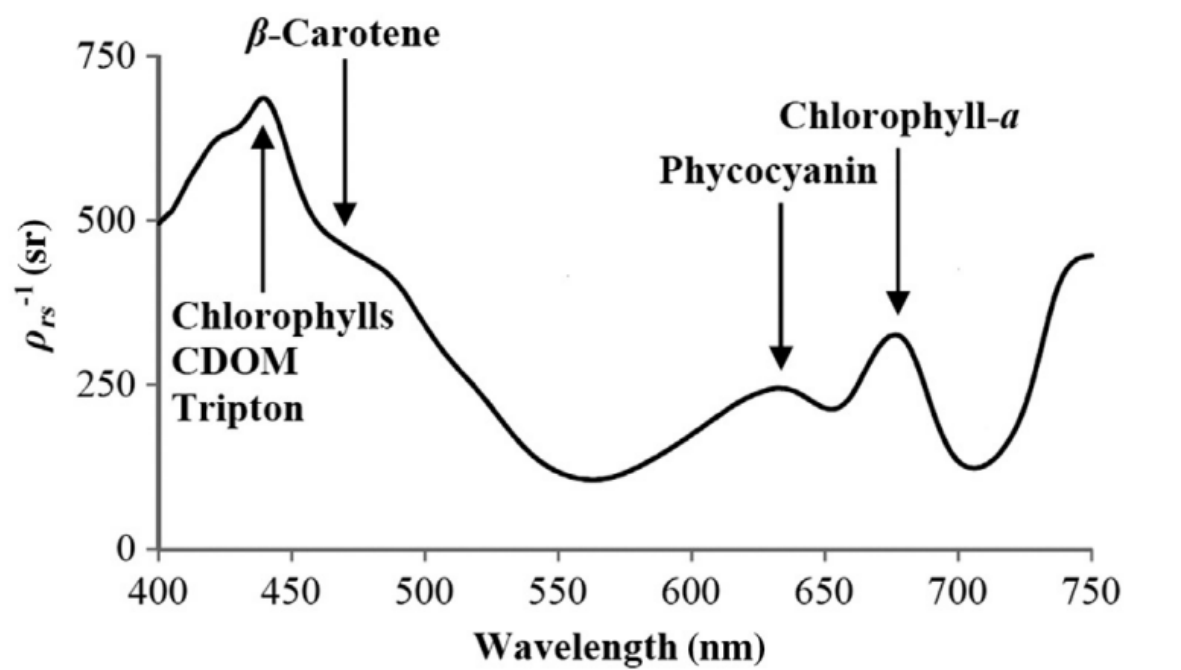


Figura 10. Firma espectral común en cuerpos de aguas altamente productivas. Se observan picos de reflectancia que permiten identificar Materia Orgánica (CDOM), Material no viviente (Detritos, Tripton), Clorofila-a, Betacarotenos, Ficocianina.

En el caso del fitoplancton, debido -entre otros compuestos- a la ficocianina, pigmento presente en las cianobacterias (una biliproteína que se extrae también de algas verdeazules como la Spirulina - Arthospira- máxima), absorbe luz junto con la clorofila: absorbe la luz anaranjada y roja,

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

particularmente cerca de 500 nm (dependiendo de cual tipo específico se trate), y emite fluorescencia cerca de 700 nm (también dependiendo de cual tipo sea). Existen modelos para estimar la presencia de Clorofila basados en los picos de reflectancia en las bandas del espectro corridas hacia el rojo: el modelo simple de dos y tres bandas (formulados con datos del satélite MERIS), el Índice de diferencia normalizada de Clorofila (Normalized Difference Chlorophyll Index o NDCI en inglés), El Modelo de Altura Máxima de Picos, el índice máximo de Clorofila y algoritmos adaptativos de altura de pico de reflectancia.

El NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) o Índice de diferencia Normalizada de Clorofila, formulado por Mishra y Mishra en 2012, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_{chl-a} \propto \frac{[R_{rs}(708) - R_{rs}(665)]}{[R_{rs}(708) + R_{rs}(665)]} \quad NDCI = \frac{[RE - R]}{[RE + R]}$$

Estas bandas del satélite MERIS procuran usar los picos de reflectancia centrados alrededor de 700 nm y los 665 – 675 nm que son asignados por lo general a la presencia de Clorofila-a en aguas turbias altamente productivas. La segunda forma de la expresión la hace aplicable a cualquier sensor que registre esas bandas, en el caso de la aeronave Mavic 3 Multiespectral, esas bandas están centradas en 650 y 730 nm respectivamente.

Otro índice publicado es el conocido ‘*Cyanobacterial Index*’ el cual relaciona la profundidad del mínimo local de la curva de reflectancia causado por la presencia de cianobacterias (cerca de los 680 nm) en relación con la línea base determinada por la reflectancia medida en longitudes de onda más allá del valle, el cual puede ser calculado con la siguiente ecuación de ‘forma espectral’ (Spectral Shape – SS):

$$SS(\lambda_0) = R(\lambda_0) - R(\lambda^-) - \{R(\lambda^+) - R(\lambda^-)\} \cdot \frac{\lambda_0 - \lambda^-}{\lambda^+ - \lambda^-}$$

Donde R es la reflectancia, λ_0 es la banda central y λ^+ , λ^- son las bandas más cercanas con las longitudes de onda más corta y más larga respectivamente.

Otras formas de este índice han sido propuestas por Liang y otros (2017):

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

$$CMI(555) = G - B - \{SWIR - B\} \cdot \frac{555 - 469}{1240 - 469}$$

$$FAI(859) = NIR - R - \{SWIR - R\} \cdot \frac{859 - 645}{1240 - 645}$$

Estos índices fueron propuestos para superar la coincidencia en el espectro del Infrarrojo de la reflectancia en algunas especies de Cianobacterias y Macrófitas (crecientes y sumergidas), lo cual hace difícil su discriminación cuando se encuentran en competencia. Las bandas fueron utilizadas con los datos del sensor a bordo del satélite MODIS para su cálculo aplicado en imágenes del Lago Taihu en China Oriental.

En este estudio se propone un índice de mayor sencillez, basado en las bandas que son posibles captar mediante los sensores a bordo del Mavic 3 Multiespectral, centradas en: 560 nm (cámara del Verde que llamaremos G), 650 nm (banda del Rojo, llamada R) y 730 nm (banda del Borde Rojo, llamada RE), todas con un ancho de banda de 32 nm. Las expresiones propuestas para este índice son las siguientes:

$$ICI_1 = \frac{[G-RE]}{[RE-R]} \quad ICI_2 = \frac{[G-R]}{[G-RE]} \quad ICI_3 = \frac{[G-RE]}{[G-R]}$$

Estas expresiones son de mayor sencillez y rápida implementación, se ha decidido sugerir su inclusión en este estudio basado en los indicios que reporta su aplicación en los datos del estudio previo del ejercicio de validación del Método Ecodron, el cual se encuentra en estado de solicitud y bajo examen formal por la SIC.

Los puntos utilizados en el ejercicio de validación del método Ecodron se ubicaron como se muestra en la siguiente figura. Un indicio de la posible utilidad del índice propuesto (en combinación con otros índices como el NDWI, NDVI y NDCI) es la utilidad en realizar la identificación rápida de la presencia de cianobacterias si se realiza un análisis de umbralidad para dicho índice. Eso es posible calibrarlo en el marco de los servicios contratados para el monitoreo de las fuentes hídricas por la C. R. A.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

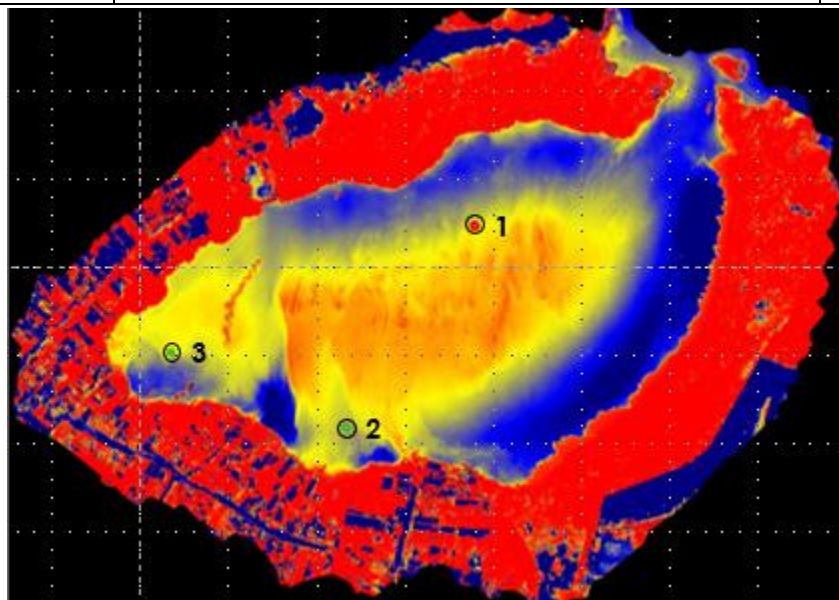


Figura 10. Puntos de muestreo para el ejercicio de validación del método Ecodron. Elaboración propia.

Basado en el comportamiento de la firma espectral (ya explicado anteriormente) reportado en cuerpos de aguas turbias y altamente productivas, es posible determinar la presencia de Cianobacterias gracias a la respuesta de su firma espectral de reflectancia. En la gráfica, se muestran estos valores de reflectancia en los 3 puntos de muestreo usados para la validación del método Ecodron del mosaico Multiespectral compuesto a partir de las imágenes con las cámaras abordo del M3M. Es por ello que este índice relaciona las diferencias entre las bandas Verde (G), Rojo (R) y Borde Rojo (RE)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

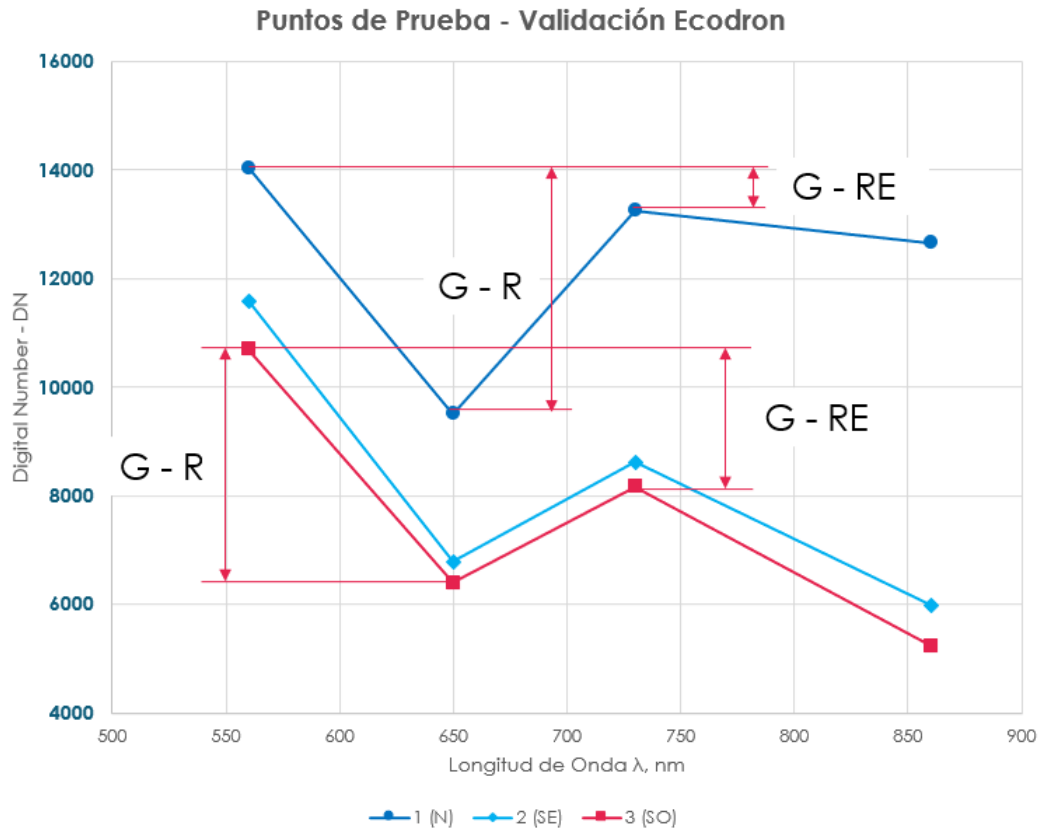


Figura 10. Pseudo espectros de reflectancia (en unidades de números digitales) para los 3 puntos de validación del método Ecodron. Elaboración propia.

Al aplicar las diferentes formas del índice propuesto, se observa el siguiente comportamiento, lo cual implica un indicio de gran potencial para aplicar esta herramienta de rápida identificación en conjunto con los otros índices mencionados. Esto será verificado aplicando una metodología exhaustiva de validación con las imágenes multiespectrales a ser captadas con la aeronave propuesta y datos de laboratorio en sitio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

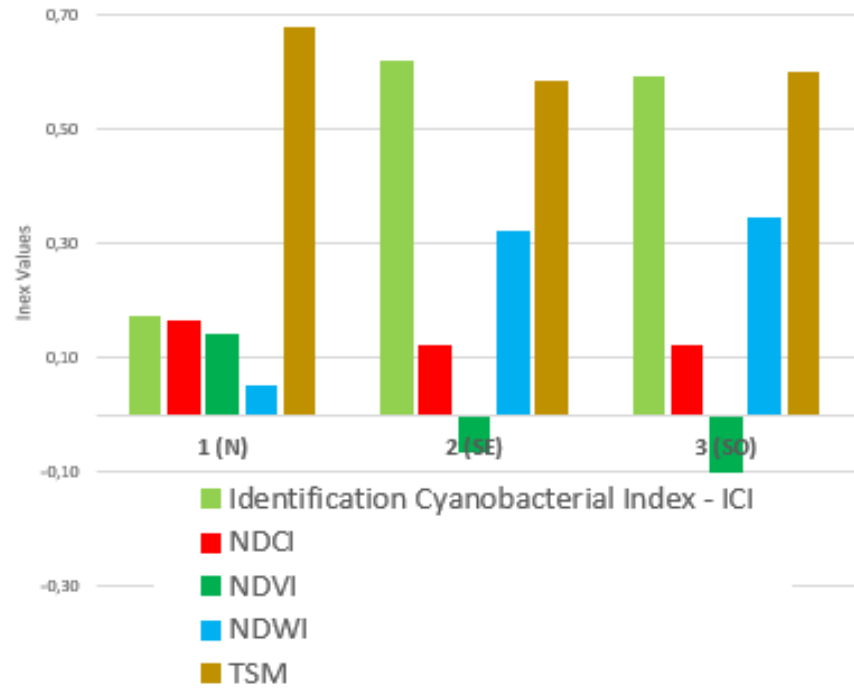


Figura 10. Valores comparativos del índice propuesto (en la imagen el cálculo que se muestra corresponde al tercero de los propuestos) y otros índices pertinentes en calidad de aguas.

Elaboración propia.

Si ubicamos estos resultados en el mapa y estimamos su ubicación relativa a los sitios de descargas de vertimientos y otras acciones antrópicas, podemos estimar mejor su posibilidad de validez para monitoreo de cianobacterias en cuerpos de agua,

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

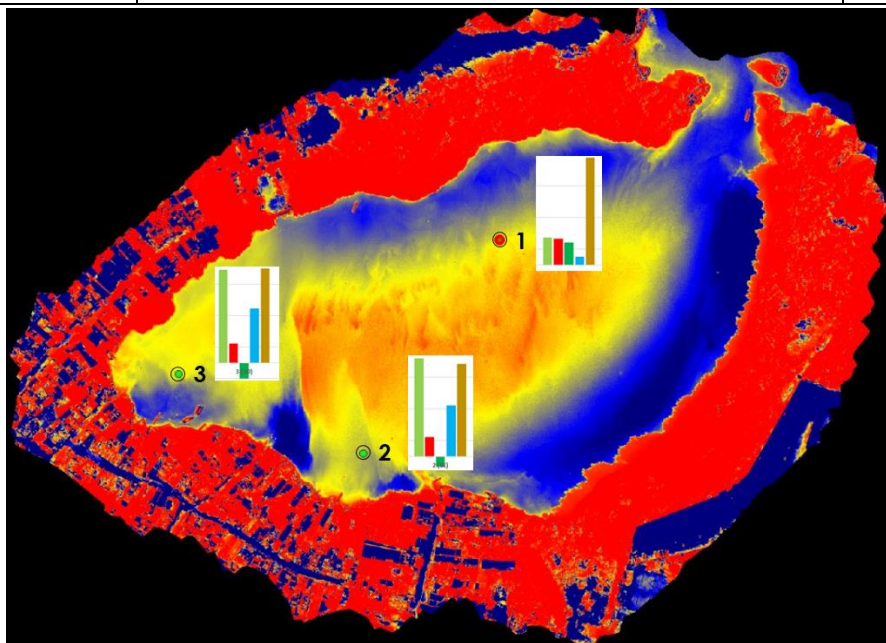


Figura 10. Ubicación de los puntos de muestreo y valores relativos de distintos índices de calidad de aguas en comparación con la tercera modalidad del índice propuesto - ICI_3 - para detección de cianobacterias. Elaboración propia.

Como conclusión preliminar, podemos estimar que el mencionado índice puede aplicarse a todo el espejo de agua, como cualquier otro índice multiespectral en uso para caracterización de cuerpos de agua. A continuación, se muestran 3 mapas con sendas representaciones de los valores que adoptarían los índices propuestos durante el ejercicio de validación del método Ecodron.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

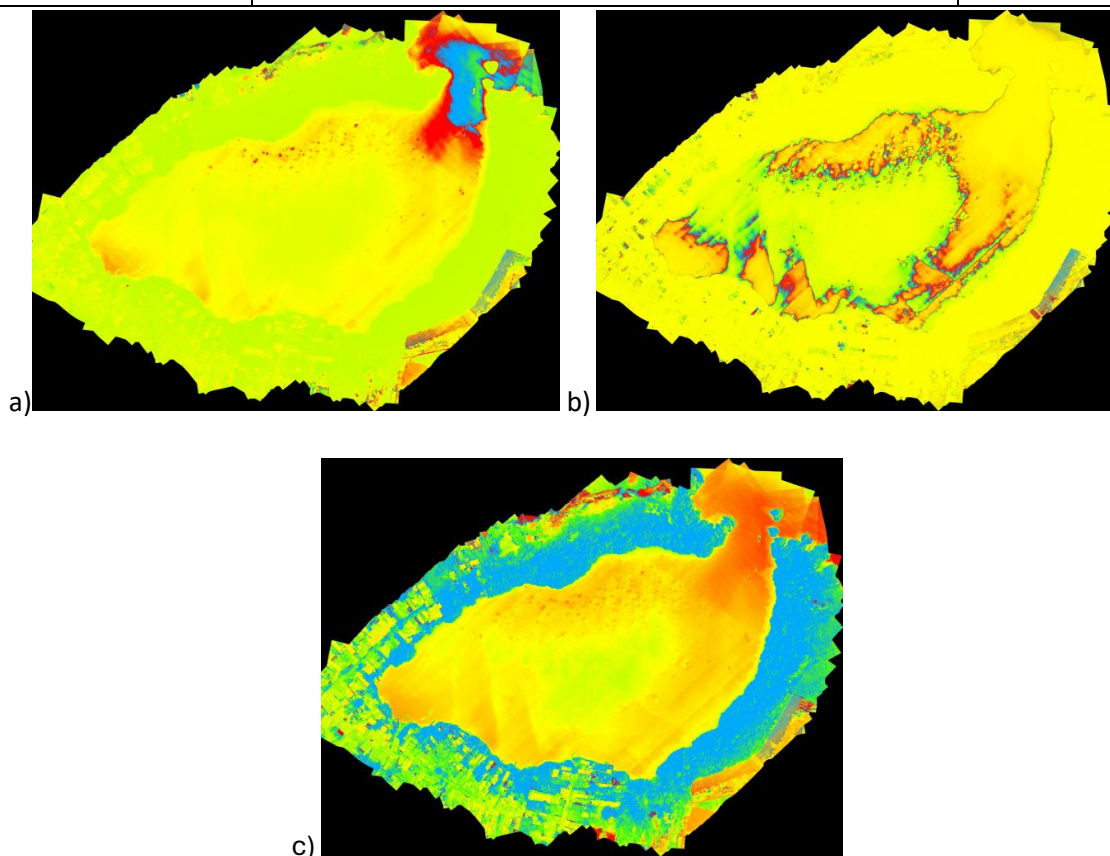


Figura 10. Mapas con las respuestas a las 3 formulaciones para el Índice de Identificación de Cianobacterias para el ejercicio de validación del método Ecodron. Elaboración propia.

Mavic 3 Multispectral y Sentinel 2

La aeronave propuesta para la ejecución de los trabajos del presente contrato, es de lanzamiento reciente (Junio, 2021) para un uso enfocado en la agricultura de precisión y estudios medioambientales (<https://ag.dji.com/mavic-3-m>). A diferencia de la generación anterior de drones multispectrales de DJI (Phantom 4 Multispectral), ésta no posee un sensor para captar la banda azul, usada en estudios de calidad de aguas relacionados con el monitoreo de Materia Orgánica, sin embargo, gracias a los sensores que operan en las longitudes de onda del verde (560 +/- 32 nm), Rojo (650 +/- 32 nm), Borde Rojo (730 +/- 32 nm) e Infrarrojo Cercano (860 +/- 52 nm); es posible

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

llevar a cabo investigaciones relacionadas con la descripción de la respuesta multiespectral de parámetros fisicoquímicos (a través de Análisis de Regresión Múltiple) o índices de diseño para aplicaciones específicas (como el propuesto en el presente trabajo para identificación de cianobacterias, las cuales presentan características particulares -picos en la longitud de onda del verde y mínimos alrededor del rojo, con una relación específica de estas dos bandas con el borde rojo-) cuando se reporta su presencia. Asimismo, es posible utilizar índices normalizados para estudiar fenómenos relacionados directamente con la presencia de clorofila como el NDCI (ya que este índice relaciona las bandas del Borde Rojo y el Rojo). A continuación, se presenta una comparación entre las bandas que puede captar el Mavic 3 Multiespectral respecto a las que captan los sensores a bordo de la constelación de satélites Sentinel-2.

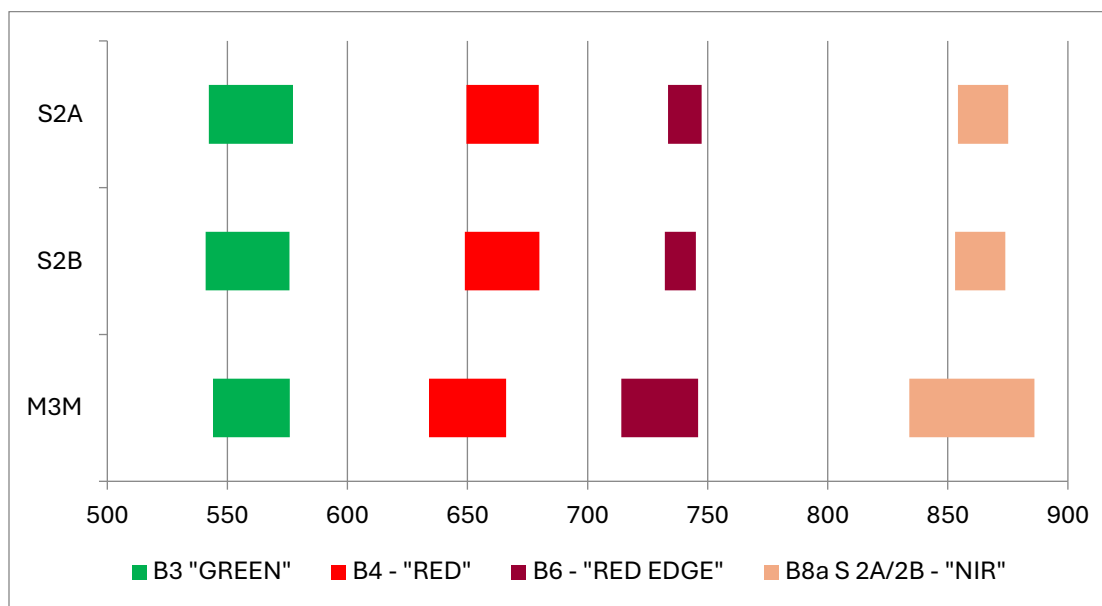


Gráfico 10. Comparación de anchos de bandas para las distintas longitudes de onda en los sensores a bordo de la aeronave Mavic 3 Multiespectral (M3M) y la constelación Sentinel (S2A y S2B). Elaboración propia.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Asimismo, ante la ausencia de información sobre los valores reales de reflectancia por parte de DJI, fabricante de la aeronave Mavic 3 Multiespectral, se realizó una búsqueda de estudios que abordaron la respuesta real de reflectancia de los sensores a bordo de esta. A través de la iniciativa Proyecto OpenAIRE, el CERN lanzó la iniciativa de datos de acceso abierto ZENODO (cuyo nombre deriva Zenodus, primer bibliotecario de la Antigua Biblioteca de Alejandría) donde se pueden obtener los datos de respuesta de reflectancia publicados por el laboratorio de Óptica de Fotosíntesis de la Universidad de Helsinki y cargados en este portal en mayo del 2024 (<https://zenodo.org/records/11102543>). Gracias a este estudio, podemos saber las capacidades reales de los sensores como se muestra a continuación,

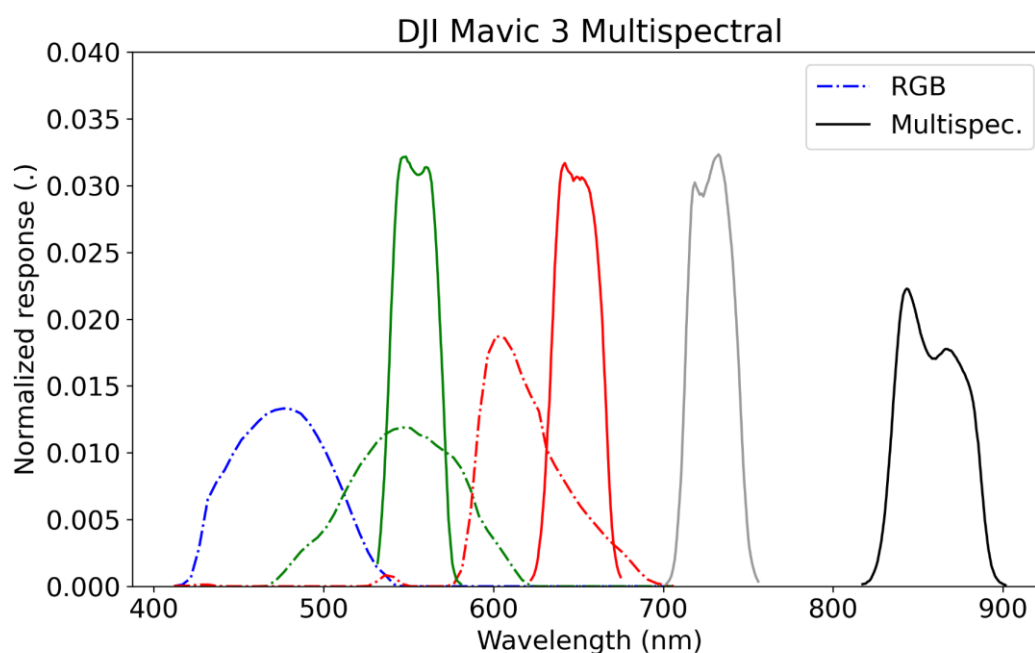


Figura X. Respuesta Normalizada de las cámaras a bordo de la aeronave Mavic 3 Multiespectral (<https://doi.org/10.5281/zenodo.11102543>). Tomado de Atherton, J. y otros: DJI Mavic 3 Multispectral Edition Spectral Response. 2024.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

En el caso de los sensores a bordo del satélite Sentinel - 2, tenemos el siguiente gráfico con la respuesta espectral normalizada de las bandas que conforman el MSI (MultiSpectral Instrument) de ambos satélites de la constelación (2A y 2B) en las longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano.

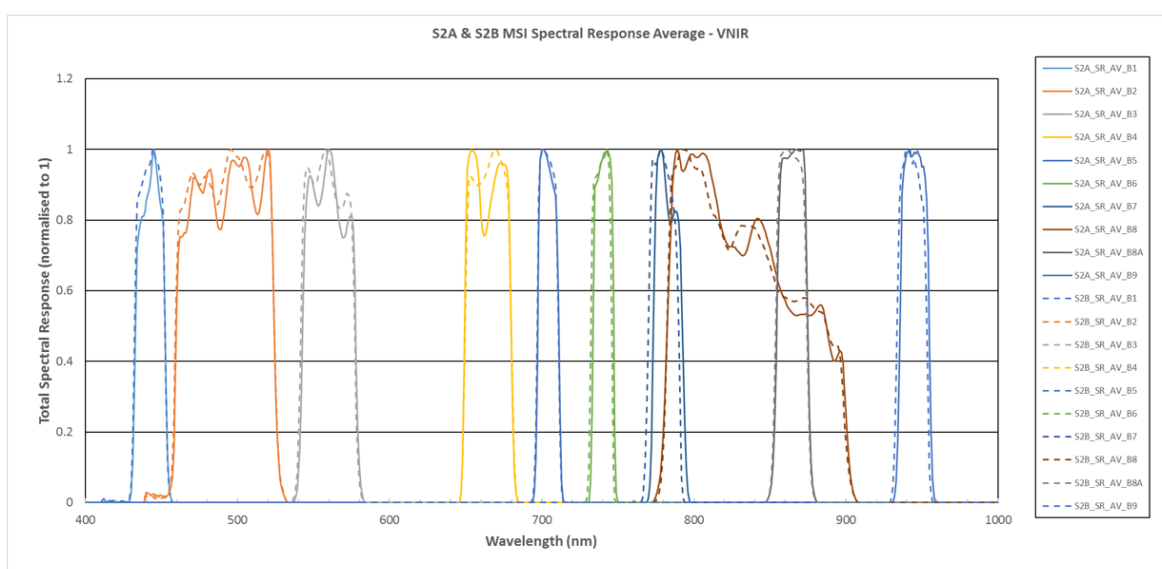


Figura X. Respuesta Espectral de las bandas en el Espectro Visible e Infrarrojo cercano del MSI (MultiSpectral Instrument) a bordo de la constelación Sentinel - 2 (tomado de <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission#S2Mission-MSIInstrumentS2-Mission-MSI-Instrumenttrue>).

En el caso de las longitudes de onda del infrarrojo medio, se tiene la siguiente información,

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

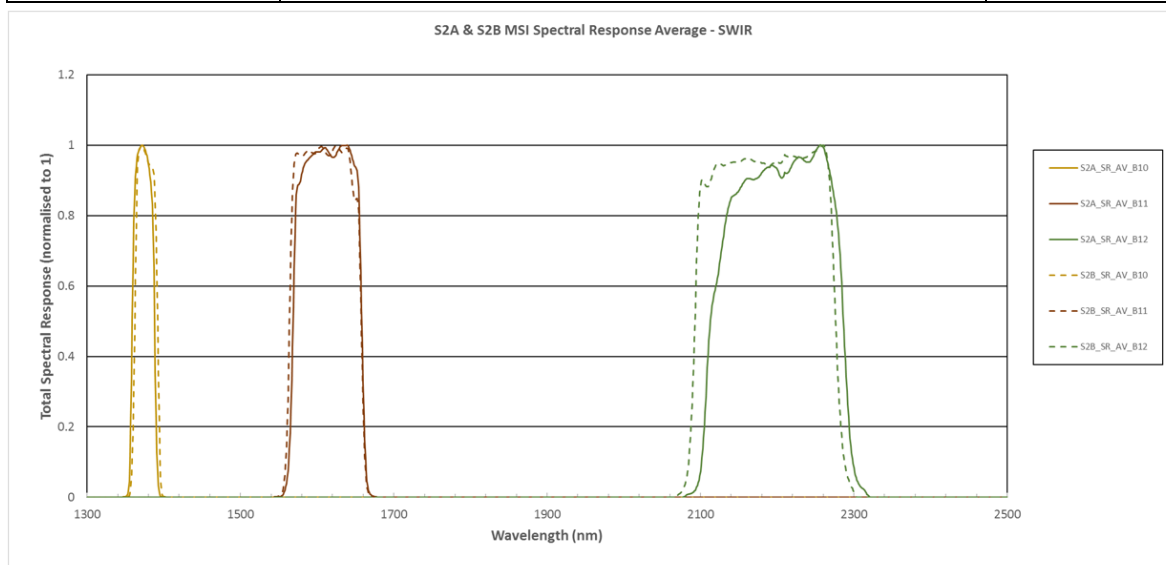


Figura X. Respuesta Espectral de las bandas en el Espectro del Infrarrojo Medio del MSI

(MultiSpectral Instrument) a bordo de la constelación Sentinel - 2 (tomado de

<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission#S2Mission-MSIInstrumentS2-Mission-MSI-Instrumenttrue>).

Con estos datos disponibles y los valores numéricos de Reflectancia Normalizados, es posible realizar una comparación más detallada de la resolución radiométrica de los sensores a bordo de cada plataforma (Mavic 3 Multiespectral vs. Sentinel - 2) como se muestra a continuación,

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

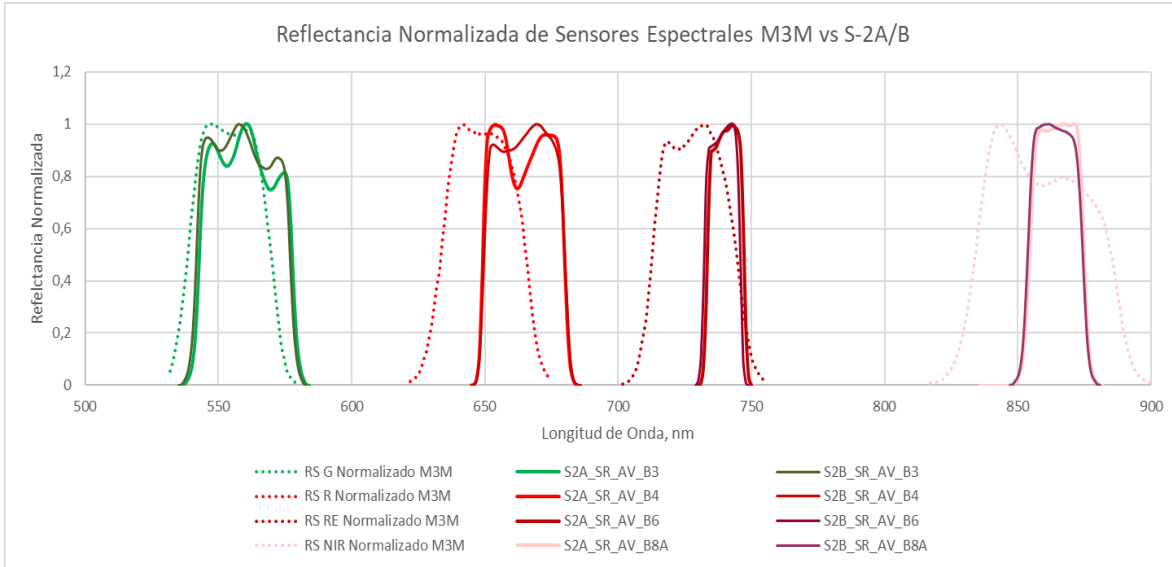


Figura 10. Funciones de Reflectancia Normalizada para los sensores a bordo del Dron Mavic 3 Multiespectral -trazo punteado- y el satélite Sentinel - 2A y 2B -mostrados en línea de trazo continuo-. Elaboración propia.

Estos gráficos vienen a mostrar la equivalencia entre las bandas de la aeronave M3M: la del Verde, centrada en 560 nm; Rojo, centrada en 650 nm; Borde Rojo, centrada en 730 nm e Infrarrojo Cercano, centrada en 860 nm (las cuales serán identificadas por sus siglas en inglés G, R, RE y NIR respectivamente); con las bandas 3, 4, 6 y 8A de la constelación Sentinel - 2 (centradas en 542.3 y 541.4 nm; 649.6 y 649.4 nm; 733.5 y 732.6 nm; 854.2 y 853.5 nm para los satélites 2A y 2B de la constelación Sentinel respectivamente). Lo cual permitirá realizar comparaciones equivalentes en composiciones de bandas o índices espectrales, como los que se proponen en el presente informe.

Composiciones RGB de bandas Espectrales para la detección de Fitoplancton

Una opción muy útil, que se presenta con el uso de imágenes satelitales para calibración de futuros índices y/o detección en florecimientos descontrolados en grandes cuerpos de agua es la

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

composición tipo RGB de las bandas equivalentes a los picos y valles donde se presentan en la firma espectral del cuerpo producto de la presencia de cianobacterias. En el caso de la constelación Sentinel-2, una composición RGB con las bandas 4-7-3 hacen posible una visualización de cianobacterias en cuerpos de agua de grandes dimensiones con problemas reportados de florecimientos. Una similar, pero con las bandas 4-6-3 resultan en una composición que también podría aplicarse con las imágenes captadas con la aeronave Mavic 3 Multispectral, ya que los centros de bandas corresponden a longitudes de onda similares (Banda 4 en los 665 nm -Rojo-, Banda 6 centrada en 740 nm -Borde Rojo- y Banda 3 en los 560 nm -Verde-). Esto significa que una composición similar se puede ejecutar con las bandas del Mavic 3M (centradas en 650, 730 y 560 para el Rojo, Borde Rojo y Verde respectivamente).

Realizar una composición RGB consiste en asignar a cada uno de los colores primarios de la síntesis aditiva (rojo, verde y azul – Red, Green, Blue) una de las bandas de la imagen satélite con el fin de visualizar de forma simultánea la información contenida en las tres bandas seleccionadas. Cada píxel de la imagen adquirirá el color resultado de la síntesis aditiva en proporción a los valores de reflectividad de las bandas asignadas a los tres colores primarios. De esta manera, será posible discriminar entre ciertos tipos de superficies, pues cada una de ellas tiene unos valores típicos de reflectividad para cada banda que se reflejan en el color adquirido tras la síntesis.

Las imágenes proporcionadas por satélites equipados con sensores multiespectrales consisten en realidad en conjuntos formados por varias imágenes coincidentes en su extensión (área del planeta abarcada) y en su resolución espacial (ancho y alto del píxel) denominadas “bandas”.

Cada banda es el resultado de la adquisición de información relativa a un rango concreto del espectro electromagnético por parte del sensor, siendo el número de bandas proporcionadas y el rango del espectro al que pertenece cada una de ellas características específicas que dependen del propósito para el que fue diseñado. Cuando se realiza una composición de bandas se debe citar la nomenclatura de la imagen RGB secuenciando el número de las bandas que son introducidas por cada canal de color. Por ejemplo, una composición RGB843 indica que la banda 8 del satélite

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

trabajado ha sido introducida por el canal rojo (R), la banda 4 por el canal verde (G) y la banda 3 por el canal azul (B). De esta forma podemos tener composiciones RGB a falso color jugando con infinidad de bandas y alternando su orden.

Para el caso de una imagen Sentinel 2, esta composición RGB843 ayudará a realzar la vegetación sana en intensas tonalidades rojas ya que las masas vegetales reflejan energía en la banda 8 del infrarrojo que es filtrada por el canal de color rojo.

Las diferentes bandas de trabajo reflejan o absorben la energía por lo que las combinaciones pueden complicarse generando composiciones cromáticas más complejas para discriminar un mayor número de elementos. La combinación RGB564 de Landsat 8 puede ayudar a diferenciar cromáticamente los diferentes usos del suelo ante una imagen territorial confusa a primera vista.

Uno de los principales inconvenientes en la composición de este tipo de imágenes es el desconocimiento o confusión con las bandas de operación. No todos los satélites trabajan con el mismo número de bandas ni su nomenclatura es equivalente, por lo que dos composiciones a falso color, formadas por bandas distintas y satélites distintos pueden estar realzando un mismo elemento territorial. Y dos composiciones a falso color, proveniente de satélites diferentes pueden emplear el mismo juego de bandas para realzar elementos territoriales diferentes.

Esto es lo que ocurre visualmente cuando empleamos la misma composición RGB para dos satélites distintos que operan en bandas completamente diferentes. Por ejemplo, empleando el convencional filtro RGB de vegetación en Sentinel 2 y Landsat 8.

Así, por ejemplo, la composición RGB432 para Landsat 8 y Sentinel 2 forma, en ambos casos, una imagen a color natural ya que las bandas 4, 3 y 2 son coincidentes en nomenclatura para identificar las bandas de actuación en el espectro visible de ambos satélites.

Por el contrario, la composición de una imagen a falso color basada en el infrarrojo cercano difiere para Landsat 8 (en la banda 5) y Sentinel 2 (en la banda 8) generando composiciones RGB543 y

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

RGB843 respectivamente para representar la misma información que permitirá realzar la vegetación de manera análoga.

Un ejemplo práctico puede revelar la potencia de esta forma de visualización del fitoplancton en el agua. Recientemente se han reportado florecimientos descontrolados de cianobacterias en un cuerpo de agua de notables proporciones muy cercano a Colombia, se trata del Lago de Maracaibo. Este cuerpo de agua se ha visto afectado por el florecimiento de cianobacterias, en específico *Mycrocistis Aeruginosa*, según reportes periodísticos. Al aplicar una composición tipo RGB con bandas muy específicas, es posible visualizar estos florecimientos. En la imagen se observa la escena de una composición de este tipo con imágenes de la constelación Sentinel-2 del pasado 12 de Agosto.

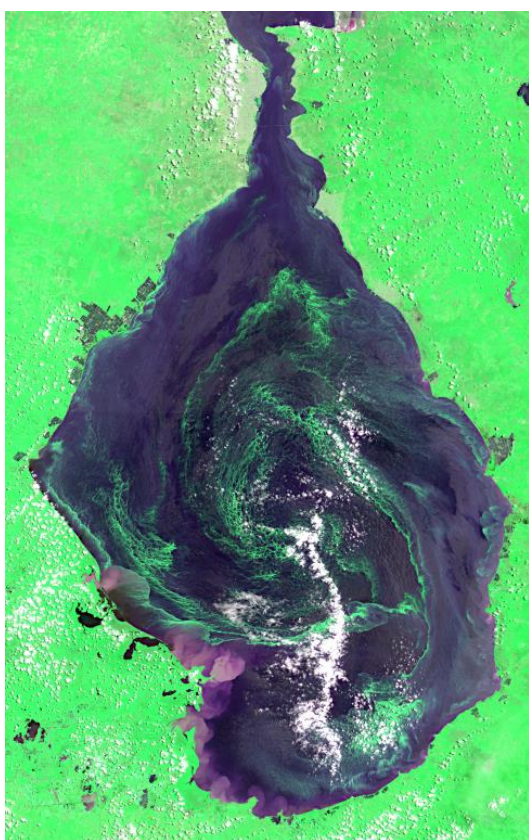
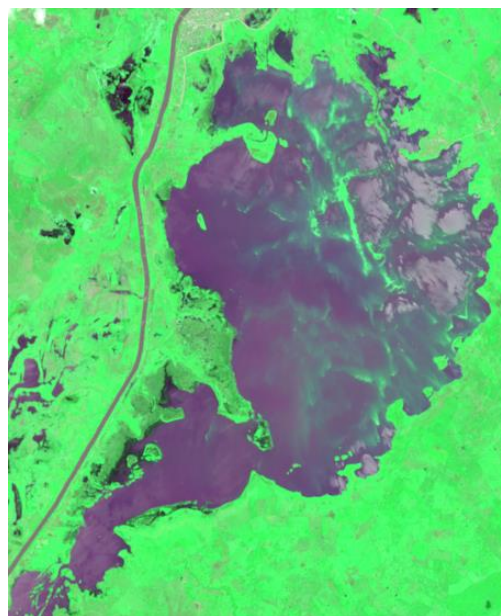
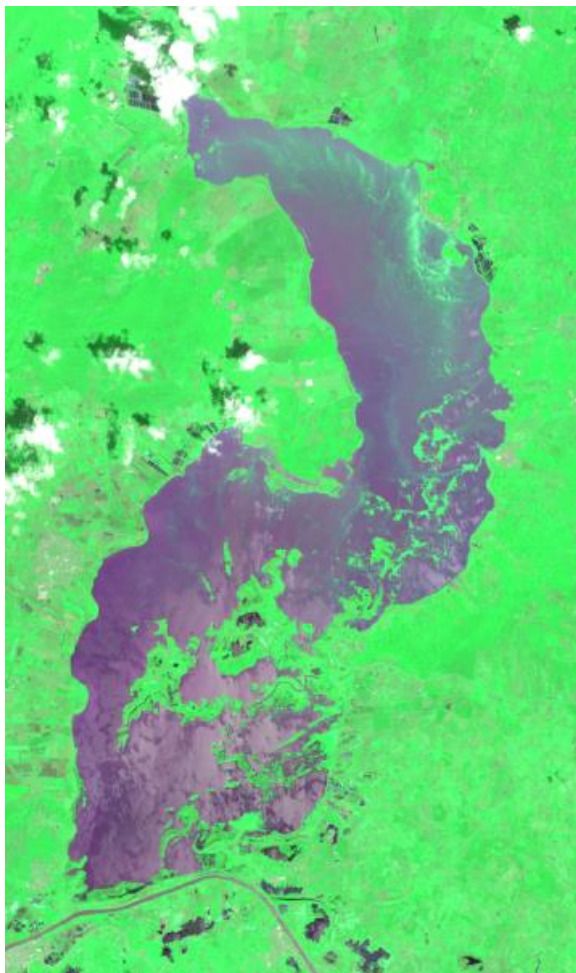


Figura 10. Composición RGB463 realizada con imágenes de la constelación Sentinel – 2 del Lago de Maracaibo adquiridas el pasado 12 de Agosto del 2024.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

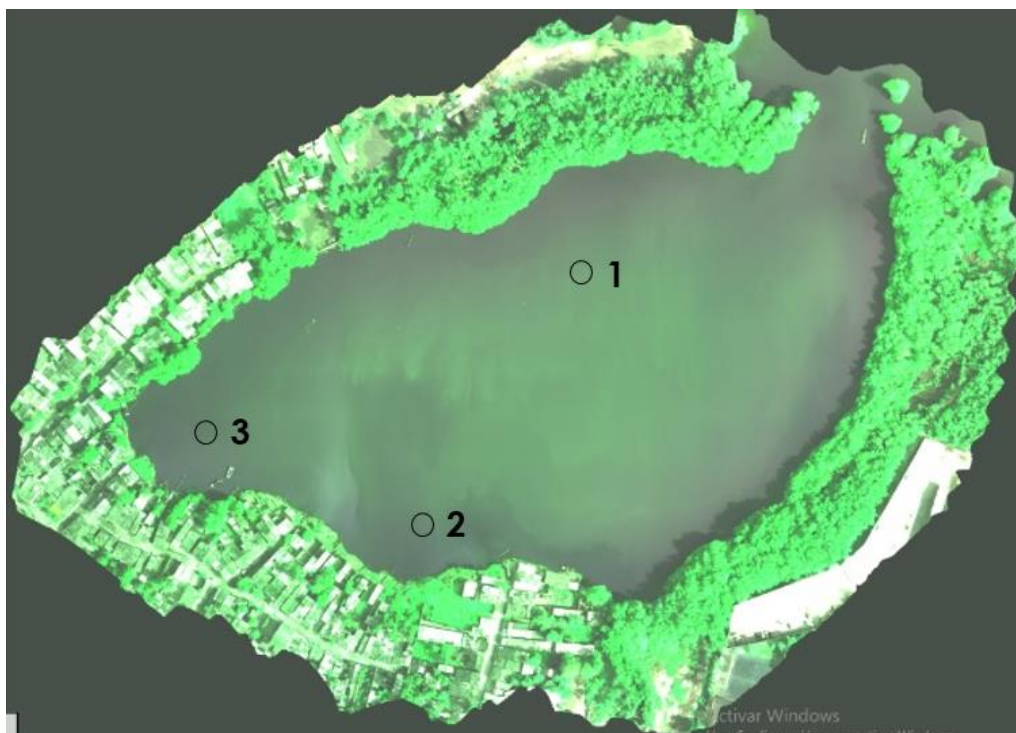
Replicando la composición en otros cuerpos de agua pueden observarse evidencias de florecimientos de fitoplancton. Al aplicar esta misma combinación en cuerpos de agua de mayor tamaño (uno de ellos del Departamento del Atlántico), se logran visualizar los efectos de florecimientos, con las mismas características de los florecimientos observados en el Lago de Maracaibo. En las imágenes se muestran composiciones RGB con las mismas bandas y se pueden visualizar áreas afectadas de florecimientos de fitoplancton (probablemente cianobacterias) de escenas captadas ambas el 13 de Octubre del 2023.



	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Figuras 10. Composiciones RGB463 para los cuerpos de agua del Embalse del Guájaro y Ciénaga La Quintanilla, captadas por la constelación Sentinel – 2 el pasado 13 de Octubre de 2023.

Finalmente, aplicando esta composición al Ortomosaico Multiespectral compuesto obtenido durante el ejercicio de validación del método Ecodron, se obtiene la imagen de abajo. Superponiendo las ubicaciones de los puntos de muestreo se logra observar un patrón en cierta medida coincidente con los valores de índices calculados anteriormente (especialmente reflejados en el mapa correspondiente a ICI3). Sin embargo, los resultados no parecen concluyentes debido a la falta de datos de campo que permitan calibrar la imagen, correlacionando los niveles de presencia del fitoplancton debido a las cianobacterias en esta región del cuerpo de agua. Esto quiere decir que, al aplicar la misma combinación de bandas en formato RGB permite hacer una identificación rápida, a demanda y de mucho mayor resolución que con sensores multiespectrales portados por satélites.



	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Figura 10. Composición RGB231 de imágenes captadas con la aeronave Mavic 3 Multiespectral para el ejercicio de validación del Método Ecodron (comparar con los índices de identificación de Cianobacterias propuestos).

5. Justificación

La importancia del monitoreo de humedales en el Departamento del Atlántico radica en su papel clave en la conservación de ecosistemas y en la provisión de servicios ambientales esenciales, como la regulación del ciclo hidrológico y la biodiversidad acuática. La proliferación de cianobacterias representa una amenaza para la salud pública y el equilibrio ecológico, ya que pueden generar toxinas perjudiciales para la fauna y las comunidades locales que dependen de estos cuerpos de agua.

El enfoque basado en teledetección con drones permite un monitoreo continuo, eficiente y de alta resolución, superando las limitaciones de los métodos tradicionales de observación. La integración de imágenes multiespectrales con datos de laboratorio posibilita la identificación precisa de patrones de contaminación y facilita la implementación de medidas de mitigación temprana.

Además, la generación de mapas normativos de calidad del agua con escalas intuitivas (tipo semáforo) mejora la accesibilidad de la información para tomadores de decisiones y comunidades afectadas. La posibilidad de identificar áreas con concentraciones críticas de SST y cianobacterias permitirá la optimización de los recursos destinados a la restauración y conservación de estos ecosistemas. En el caso específico de los parámetros a ser observados, a saber, Sólidos Suspendidos Totales y Cianobacterias, la herramienta multiespectral tiene una relevancia especial debido a la implicación de estos en la dinámica de los cuerpos de agua.

Las partículas orgánicas e inorgánicas que arrastra el agua residual y que llegan a un agua receptora se llaman sólidos suspendidos -SS-. Cuando se reduce la velocidad del agua, al entrar en un estanque o un lago, muchas de esas partículas se asientan en el fondo como sedimento. El uso común de la

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

palabra sedimento también incluye partículas erosionadas del suelo que el agua arrastra, aunque no se hayan sedimentado todavía. Las partículas coloidales, que no se asientan con facilidad, causan la turbidez de muchas aguas superficiales. Los sólidos orgánicos suspendidos también pueden ejercer una demanda de oxígeno. Muchas industrias descargan sólidos suspendidos; sin embargo, los produce principalmente la erosión del suelo, que es intensa sobre todo en áreas de tala, de explotación minera a cielo abierto y de construcción. Al depositar cargas excesivas de sedimento en Lagos y represas aumenta su turbiedad, disminuye la penetración de la luz, con frecuencia aumenta la población bacteriana y los sólidos se depositan en el fondo del cuerpo de agua, lo que destruye el hábitat de muchos organismos bénticos. Aún en corrientes de montaña, de movimiento rápido, el sedimento debido a operaciones mineras y a la tala ha destruido muchos hábitats de organismos acuáticos. Un metro cúbico de agua residual pesa aproximadamente 1 000 000 g y contiene unos 500 g de sólidos. La mitad de éstos estará disuelta, como los compuestos de calcio, sodio y los orgánicos solubles. Los 250 g restantes serán insolubles. La fracción insoluble consiste en unos 125 g de material que se sedimenta y sale, en condiciones tranquilas, de la fracción líquida en 30 minutos (son los que se denomina sólidos sedimentables). Los 125 g restantes permanecerán en suspensión durante un tiempo muy largo (son lo que se denomina sólidos suspendidos). El resultado es un agua residual muy turbia. En el ejercicio de validación del Método Ecodron, se utilizó el parámetro fisicoquímico de Sólidos Suspendidos Totales -SST-, para crear un índice multiespectral que describiera las concentraciones del parámetro. Como resultado se obtuvo un mapa Multiespectral calibrado con los resultados de laboratorio que incluía las concentraciones del parámetro según la respuesta en las 4 bandas de adquisición de la aeronave M3M utilizada en el ejercicio de validación del Método Ecodron. Según Mihelcic (2008), los Sólidos Disueltos Totales (SDT) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se determinan, primero, filtrando una muestra bien mezclada de volumen conocido a través de un filtro de fibra de vidrio (tamaño de la abertura de 2- μ m). Los Sólidos Suspendidos son las partículas atrapadas en el filtro. La concentración de SST se determina secando el filtro a 103-105°C, determinando el incremento de peso del filtro y luego dividiendo esta ganancia de peso entre el volumen de la muestra (resultado en mg/L). Los sólidos suspendidos (retenidos en

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

el filtro) podrían afectar de manera adversa los sistemas acuáticos al interferir con la penetración de la luz o actuar como fuente de nutrientes o de materia orgánica consumidora de oxígeno. Asimismo, un agua con una cantidad alta de sólidos suspendidos podría ser inadecuada para el consumo humano o la natación. Nuestra propuesta se justifica en el sentido de la existencia de regulación específica para este parámetro así como distintas clasificaciones según umbrales del valor que, gracias a la precisión y resolución obtenidas por el método Ecodron, hacen posible la caracterización de la totalidad del espejo de los cuerpos de agua bajo jurisdicción de la C. R. A.

Desde el punto de vista normativo, el presente estudio se enfoca en la aplicación de los criterios establecidos en documentos oficiales de consulta obligada sobre los límites y metodologías aplicables para el monitoreo de las fuentes hídricas. Así, a nivel nacional, existen principalmente dos documentos de referencia, a saber: El Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua de 2021 y La Hoja Metodológica del Índice de calidad del agua (versión 1.1) del 2020, ambas publicaciones del IDEAM.

En el protocolo se establecen las premisas para el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos e hidrobiológicos de las aguas superficiales (página 310 en adelante). La cantidad y calidad del muestreo a los efectos de obtener un modelo multiespectral que sea correlacionable con las condiciones de los espejos de agua estudiados ha tomado en cuenta una cantidad mínima de 3 puntos para la generación de índices Multiespectrales a través de la técnica de Regresión Múltiple, sabiendo que en las 4 bandas del espectro captadas es posible registrar la influencia de los elementos solicitados en el pliego de condiciones (SST y Cianobacterias) sobre el registro de la firma espectral de reflectancia.

En el caso de la Hoja Metodológica, se aplicará el subíndice de calidad para Sólidos Suspendidos Totales (SST) del cual extraemos el procedimiento de cálculo para este índice:

$$I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 \cdot SST)$$

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Si $SST \leq 4,5$, entonces $I_{SST} = 1$

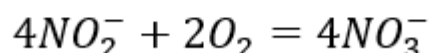
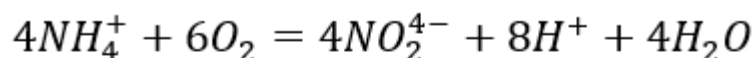
Si $SST \geq 320$, entonces $I_{SST} = 0$

Gracias a estas expresiones, es posible obtener un mapa modificado del subíndice, sustituyendo en la expresión del índice el correspondiente que se obtenga del Análisis de Regresión Múltiple, es decir, convirtiendo esta ecuación en un índice multiespectral mediante los resultados de la metodología propuesta.

Este subíndice replica la expresión del conocido como ICOSUS, publicado por Ramirez y otros (1997) el cual implica la expresión entre paréntesis de la última ecuación. Este índice ha sido utilizado en los últimos informes de Monitoreo de Fuentes Hídricas contratados por la C. R. A., sin embargo, la exploración de su significación y aplicación con técnicas de procesamiento de imágenes provenientes de constelaciones de satélites para monitoreo medioambiental (Landsat, Sentinel) o de drones (portando cámaras multiespectrales) es novedoso y forma parte del esfuerzo pionero de la institución en el marco del desarrollo de nuevo Plan de Acción Institucional de la C. R. A. 2024-2027 “Por un ambiente sin fronteras”.

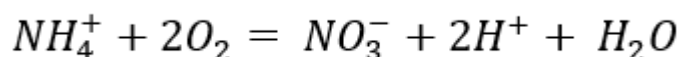
Por otra parte, las cianobacterias cumplen un papel crucial en la fijación del nitrógeno. El nitrógeno de los lagos usualmente está en la forma de nitratos (NO_3^-) y proviene de fuentes externas, como las corrientes alimentadoras o los ríos subterráneos. Cuando lo captan las algas y otros miembros del fitoplancton, el nitrógeno se reduce químicamente a compuestos amino ($\text{NH}_2\text{-R}$) y se incorpora en compuestos orgánicos. Al descomponerse las algas muertas, el nitrógeno orgánico se libera al agua en forma de amoníaco (NH_3). A los valores del pH normales, este amoníaco se presenta en forma de amonio (NH_4^+). Este ion liberado de las sustancias orgánicas, además del proveniente de otras fuentes, como los desechos industriales y la lixiviación agrícola (por ejemplo, fertilizantes y abono) se oxida a nitrato (NO_3^-). Por efecto de un grupo especial de bacterias nitrificantes en un proceso de dos pasos llamado nitrificación:

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



La primera reacción la median especies de *Nitrosomonas*, y la segunda, las especies de *Nitrobacter*.

La reacción general es:



Como se muestra en la figura siguiente, el nitrógeno pasa por un ciclo del nitrato al nitrógeno orgánico, de éste al amoníaco y de nuevo al nitrato, siempre y cuando el estado del agua permanezca aeróbico. Sin embargo, en condiciones anóxicas, como en los sedimentos anaeróbicos, donde la descomposición de algas disminuye el aporte de oxígeno, las bacterias reducen el nitrato a gas nitrógeno (N₂) y se pierde del sistema, proceso llamado desnitrificación. Ésta reduce el tiempo promedio que el nitrógeno permanece en el lago.

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

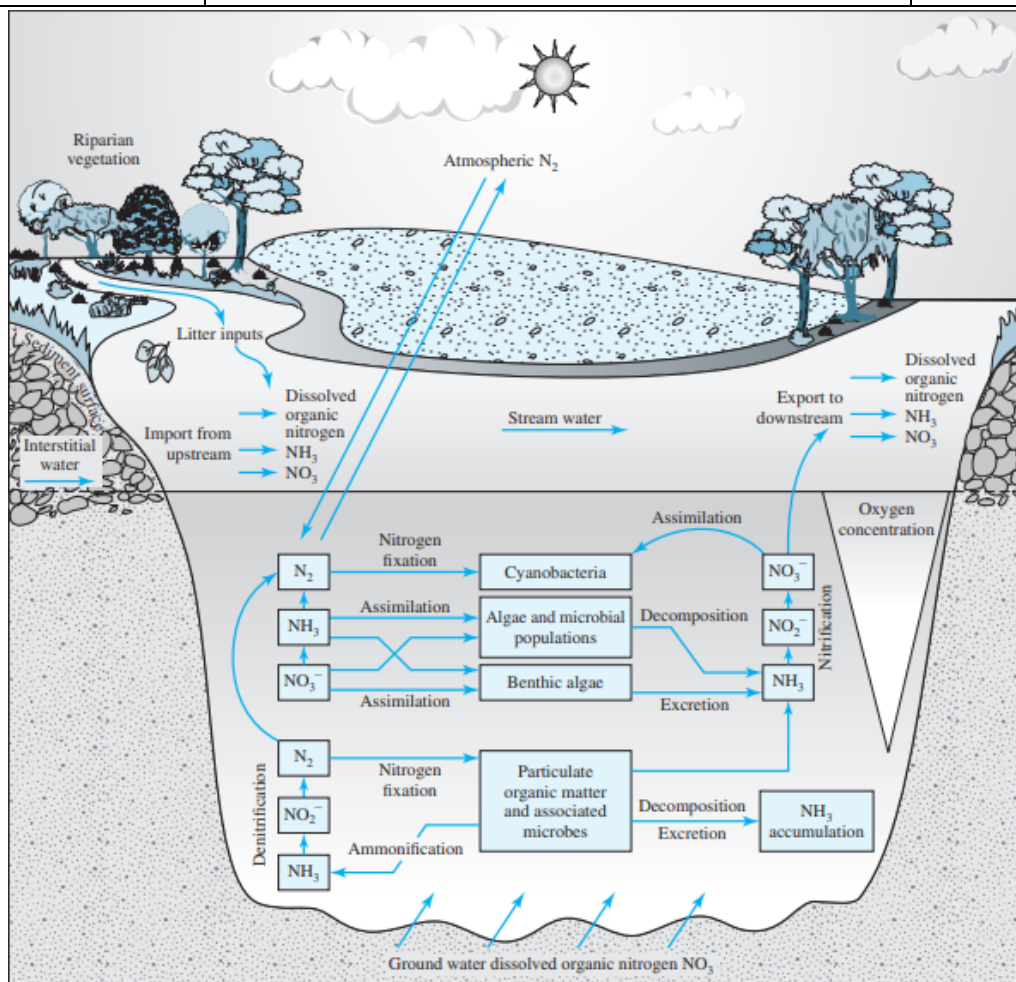
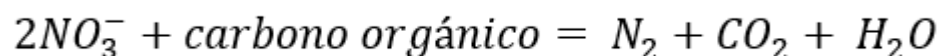


Figura 10. Ciclo del Nitrógeno. Tomado de Davis y Masten, Ingeniería y Ciencias Ambientales McGraw-Hill (2004).

La desnitrificación también puede originar la formación de N_2O (óxido nitroso). La reacción de desnitrificación es:



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Algunos microorganismos fotosintéticos también pueden fijar el nitrógeno de la atmósfera al convertirlo en nitrógeno orgánico y, por ende, se los llama microorganismos fijadores de nitrógeno. En los lagos, los más importantes son las bacterias fotosintéticas denominadas cianobacterias, también llamadas algas verde-azules por los pigmentos que contienen. Gracias a su capacidad de fijación del nitrógeno, tienen una ventaja competitiva sobre las algas verdes cuando las concentraciones de nitrato y amonio son bajas, mientras que las de otros nutrientes abundan en grado suficiente. El *azolla* es el único helecho acuático fijador de nitrógeno. Lo hace gracias a su relación simbiótica con una cianobacteria (*Anabaena azollae*). El *azolla* está presente en todo el mundo y a veces es una fuente valiosa de nitrógeno para fines agrícolas. De manera similar, los líquenes contribuyen a la fijación del nitrógeno. Por ejemplo, el liquen fijador de nitrógeno *Lobaria pulmonaria*, común en los bosques del noroeste de Estados Unidos, fija el nitrógeno por su relación simbiótica con la cianobacteria *Nostoc*. Los líquenes de este tipo son una fuente principal de nitrógeno en bosques antiguos.

La influencia de los seres humanos en el ciclo del nitrógeno se ha debido a la manufactura y uso de fertilizantes industriales, el consumo de combustibles fósiles y la producción en gran escala de cultivos fijadores de nitrógeno. Por consiguiente, ha aumentado la liberación de nitrógeno biológicamente utilizable del suelo y materia orgánica. La liberación de óxido nitroso de fuentes industriales y el consumo de combustibles fósiles también está al alza. Los efectos de la liberación del nitrógeno son significativos y van desde la lluvia ácida y la acidificación de los lagos hasta la corrosión de metales y el deterioro de materiales de construcción.

Gracias a la metodología propuesta, es posible realizar caracterizaciones de los parámetros fisicoquímicos (Sólidos Suspendidos Totales) y microbiológicos (conteo de cianobacterias por mililitro) de los cuerpos de agua bajo la jurisdicción de la C. R. A. (Ciénaga de Balboa, Mallorquín, Malambo y Convento) en el marco de los servicios contratados mediante el concurso de méritos bajo el cual se amparan los servicios cuyos resultados se presentan en este informe.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Finalmente, este estudio sienta las bases para el desarrollo de nuevas metodologías de monitoreo ambiental basadas en tecnologías emergentes, promoviendo una gestión sostenible y basada en datos precisos. La combinación de técnicas de fotogrametría, geoestadística y procesamiento de imágenes abrirá nuevas oportunidades para la investigación y la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de recursos hídricos.

5. Metodología

Área de estudio

En atención al Pliego de Condiciones de la Convocatoria Pública por Concurso de Méritos No. CM-2024-0003 en su ítem D. Obligaciones Específicas, párrafo correspondiente a los productos requeridos sobre Monitoreos de Cuerpos de Agua -ítem G.-, respecto al monitoreo de las fuentes hídricas con imágenes multiespectrales tomadas con drones para los cuerpos de agua especificados (Ciénagas de Mallorquín, Balboa, Malambo y Convento) y con la finalidad de correlacionar los resultados de laboratorio con las imágenes captadas, se obtendrán mapas georreferenciados de los parámetros: Sólidos Suspendidos Totales (físicoquímico) y Cianobacterias (microbiológico). Se detalla en el presente apartado la metodología aplicada y las actividades conducentes a la obtención de los productos solicitados por la C. R. A. en el marco de la presente convocatoria.

Como parte de las actividades de coordinación y calibración de equipos, se realizó una campaña de vuelo de prueba en la Ciénaga El Rincón (Laguna del Cisne), cuyos resultados se presentarán también en este informe, demostrando algunas limitaciones del método de adquisición de imágenes.

En previsión de problemas relacionados con la obtención de los permisos de vuelo correspondientes a las ubicaciones de las ciénagas próximas al aeropuerto (Malambo y Convento) se realizaron campañas de vuelos adicionales en las Ciénagas de Tocagua y Luruaco, en el Municipio homónimo a esta última ciénaga. Estos resultados también se presentarán como parte de los análisis correspondientes.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Datos a ser recolectados

Se recabarán datos en forma de imágenes en formato RGB y Multiespectral, gracias al uso de la Aeronave del fabricante DJI, modelo Mavic 3 Multiespectral (de aquí en adelante M3M), capaz de realizar tomas en modo de vuelo autónomo, en las áreas previstas para la ejecución de los levantamientos en las márgenes de los cuerpos de agua, así como los espejos de agua permanentes que se planifican ser levantados.

Estas campañas se han coordinado con los eventos de recolección de muestras, así como con el paso del satélite Sentinel – 2, para realizar comparaciones de los resultados de las imágenes captadas con el satélite y las correspondientes obtenidas con el procesamiento de las imágenes capturadas con los sensores de la aeronave M3M.

Metodología de monitoreo

Se ha realizado una adaptación del Método Ecodron (patente pendiente) el cual se estructurará en tres fases principales:

1. Investigación preliminar: Se llevará a cabo una revisión bibliográfica del estado del arte en teledetección aplicada al monitoreo de calidad del agua, con especial énfasis en los parámetros SST y cianobacterias.
2. Planificación de vuelos y toma de muestras:
 - a. Se establecerán rutas de vuelo optimizadas para la captura de imágenes multiespectrales, en paralelo con la recolección de muestras de agua en puntos estratégicos. Esta actividad se ha coordinado con el personal de laboratorio a los fines de que la captación de imágenes y muestreo coincida con el paso del Satélite Sentinel-2, para realizar comparaciones entre los modelos o composiciones obtenidas con dron y aquellos que se pueden obtener con las imágenes satelitales de las mismas áreas de interés.
 - b. Análisis de Laboratorio de las muestras recolectadas y procesamiento de las imágenes capturadas, para ejecutar análisis de correlación y regresión lineal

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

múltiple, a los fines de obtener un índice multiespectral con los datos de reflectancia en los puntos de recolección y los resultados de laboratorio.

3. Procesamiento y análisis de imágenes: Se generarán ortofotomapas ópticos (RGB) y de reflectancia (en las bandas Verde, Rojo, Borde Rojo e Infrarrojo Cercano), que serán analizados mediante técnicas geoestadísticas para correlacionar los valores espectrales con los resultados de laboratorio. Se usará el Índice Multiespectral obtenido del análisis estadístico, para generar un mapa de concentraciones a Ultra-Alta Resolución (GSD < 10 cm/píxel) así como mapas normativos según resoluciones aplicables de la CRA-IDEAM.

Estos resultados permitirán generar mapas detallados de calidad del agua, proporcionando información esencial para la implementación de políticas de conservación y recuperación de los cuerpos hídricos en la región.

Campañas de Vuelos

Se presenta el siguiente Flujograma del Proceso de Ejecución de la actividad de vuelos para adquisición de imágenes RGB y Multiespectrales en paralelo con la recolección de muestras para ensayos de laboratorio (físicoquímicos -SST- y microbiológicos -Cianobacterias-)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Flujograma de Proceso

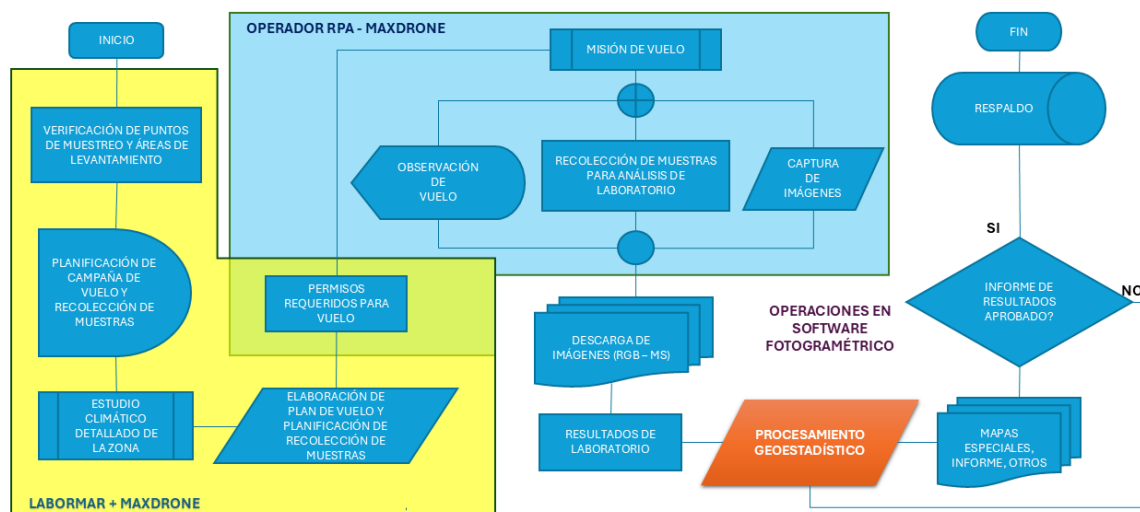


Figura 10. Proceso para Planificación y Ejecución de Vuelos para captación de imágenes y muestreo de 4 cuerpos de agua (Mallorquín, Balboa, Malambo y Convento).

A partir de este flujograma, se realizarán los planes de vuelo en concordancia con las prerrogativas de la C. R. A., según sus intereses y motivaciones formuladas en el nuevo Plan de Acción Institucional 2024-2027 “Por un Ambiente sin Fronteras”, documento marco para las acciones, programas y proyectos del ente autónomo y rector de las políticas ambientales del Departamento del Atlántico, con un fuerte componente de investigación y desarrollo los cuales son atendidos de manera preferente en este servicio.

Procesamiento de Imágenes y Análisis Geoestadístico

Acá se detalla el procedimiento para la obtención de mapas de concentraciones (en el caso de los Sólidos Suspendidos Totales) e Individuos por volumen (en el caso de las Cianobacterias) de Ultra-Alta Resolución (GSD < 10 cm/píxel).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

En los siguientes Flujogramas de Proceso se presentan la secuencia de actividades que deben abordarse en cumplimiento de lo requerido en el pliego de la convocatoria (Observaciones del Certificado de Viabilidad del Objeto a Contratar -GP-FT-07 de fecha 09-03-2024; página 2 de los Estudios Previos e inciso G -pág. 9- del mismo documento; e inciso G de la página 27 del Pliego de condiciones de la presente convocatoria). Estos flujogramas conllevan a la consecución de los productos geomáticos necesarios para la configuración de los mapas de parámetros asociados y otros más (RGB, Turbidez, TSM, NDVI, Masas Forestales -especialmente de Manglar, a través de mapas con el CMRI: Combined Mangrove Recognition Index-, SST, Índice de Identificación de Cianobacterias -ICI-, Índice de Concentración de Cianobacterias, Mapa de Inundación), en 3 grandes grupos de actividades.

Flujo de trabajo: Procesamiento de imágenes RGB

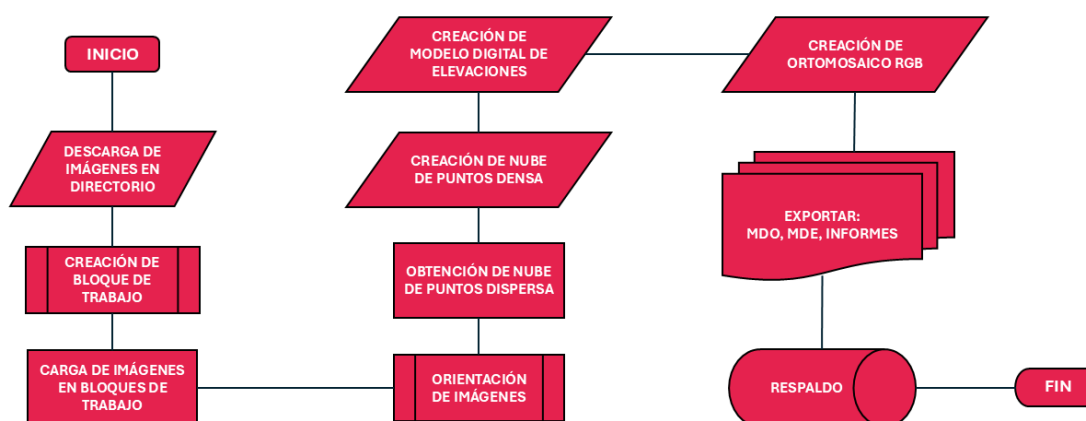


Figura 11. Proceso para obtención de Productos Geomáticos Básicos (Modelo Digital Ortorectificado -MDO-, Modelo Digital de Elevaciones -MDE-, Informes)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Flujo de trabajo: Procesamiento de imágenes multiespectrales

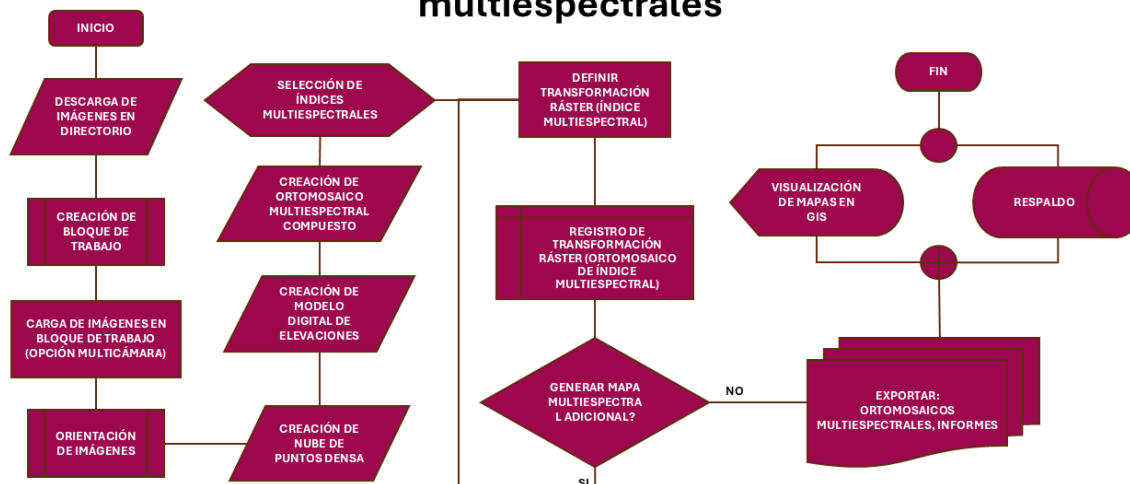


Figura 12. Proceso para obtención de productos geomáticos multiespectrales básicos (Ortomosaico Multiespectral)

Flujo de trabajo: Análisis Geoestadístico

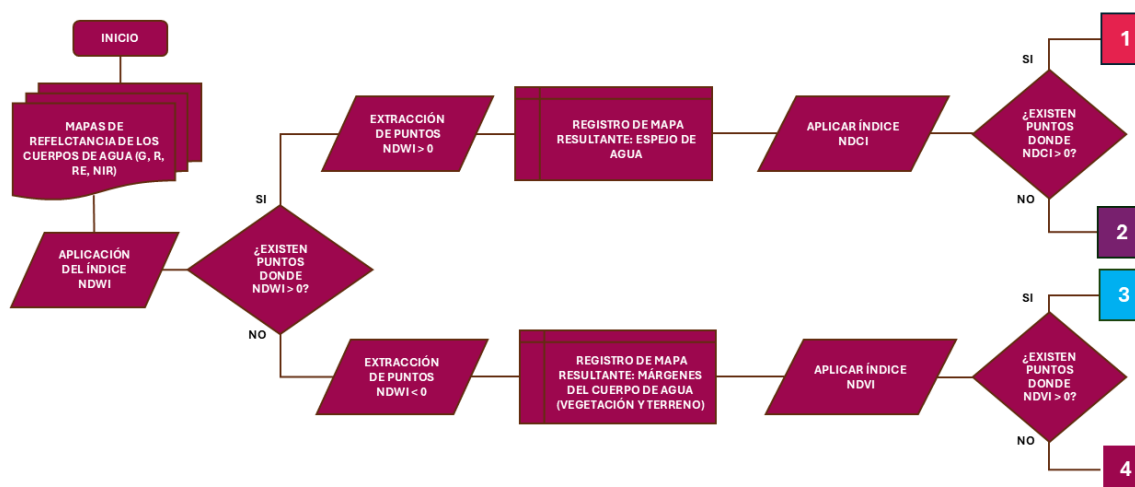


Figura 13. Proceso de Análisis Geoestadístico (a ser ejecutado en software R), este flujograma se subdivide en 4 actividades, a los fines de obtener diferentes productos.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Flujo de trabajo: Análisis Geoestadístico (NDCI>0)

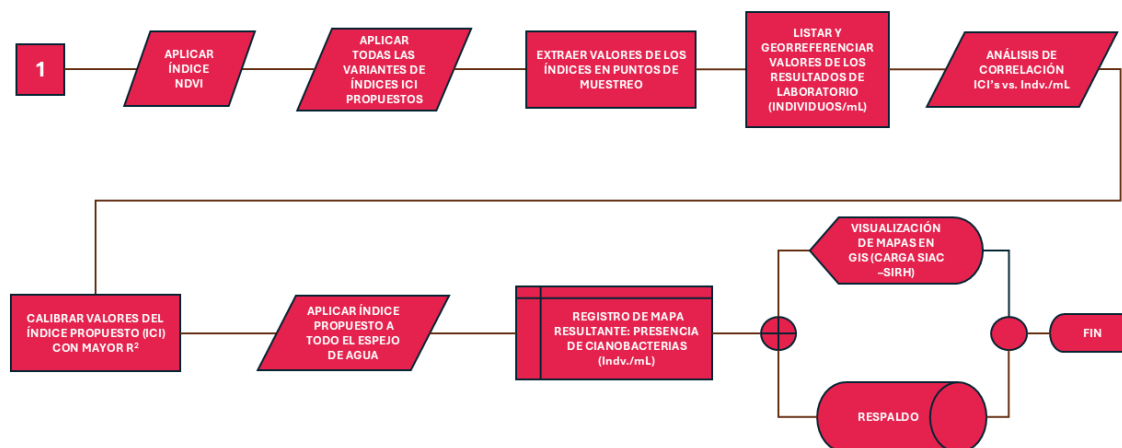


Figura 13.1. Subproceso para análisis geoestadístico a los fines de obtener los productos asociados al nuevo Índice para Identificación de Cianobacterias (ICI) e Índice de concentración o conteo de individuos basado en análisis de regresión múltiple.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Flujo de trabajo: Análisis Geoestadístico (NDCI<0)

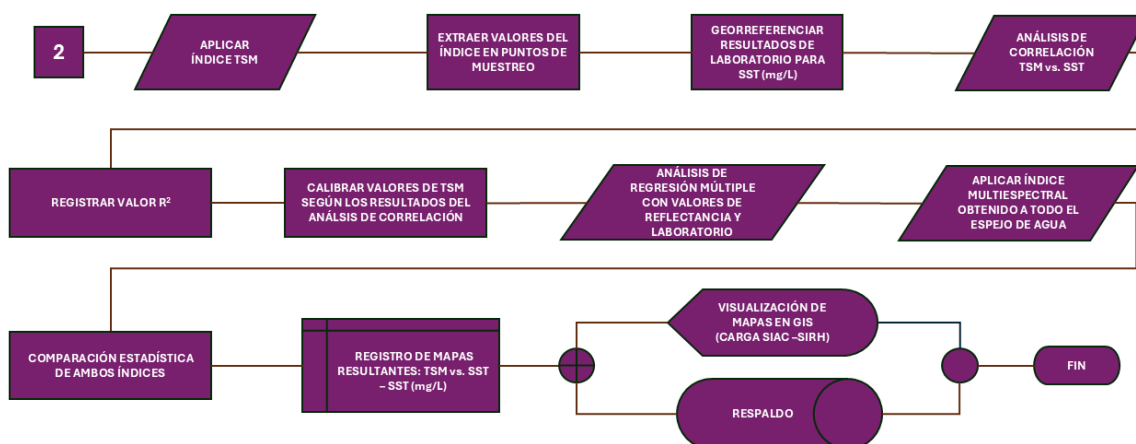


Figura 13.2. Subproceso para obtención de mapas correspondientes a Índices de Turbidez Normalizada (NDTI), Materia Suspensa Total (TSM) e Índice de Regresión Múltiple para Sólidos Suspendedos Totales.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Flujo de trabajo: Análisis Geoestadístico (NDVI>0)

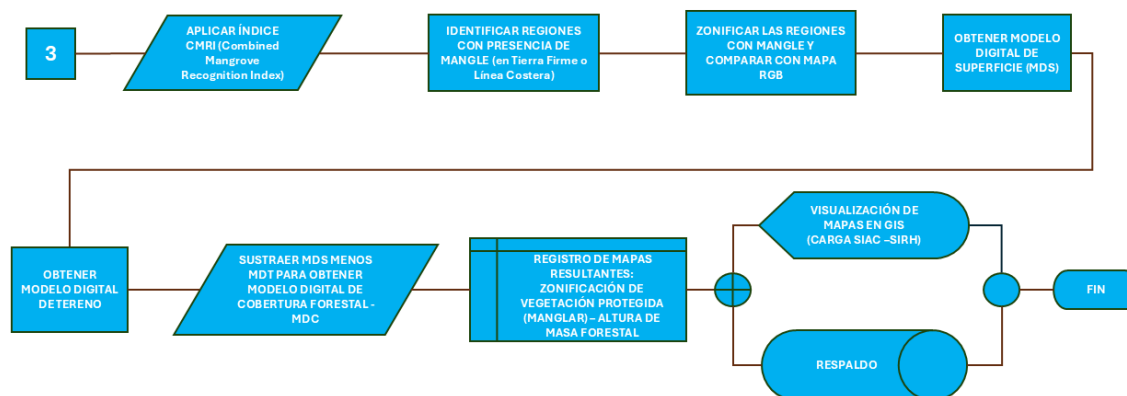
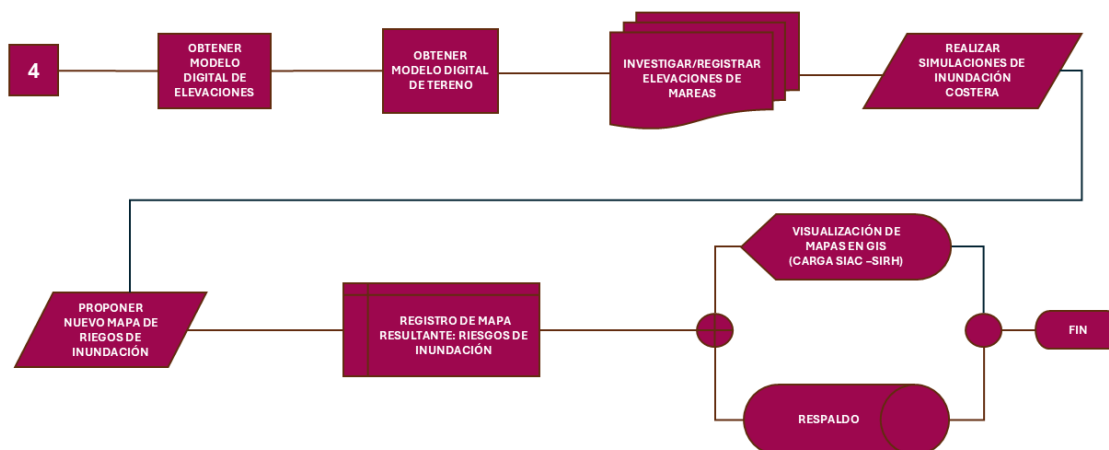


Figura 13.3. Subproceso para obtención de Mapas de Ultra-Alta Resolución de masas forestales circundantes a los cuerpos de agua mapeados.

Flujo de trabajo: Análisis Geoestadístico (NDVI<0)



LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Figura 13.4. Subproceso de Análisis Geoestadístico para obtención de mapas de inundación en áreas colindantes a los cuerpos de agua mapeados.

Todos estos productos geomáticos se podrán obtener en sistemas de coordenadas compatibles a los geoportales del SIAC y sus subsistemas correspondientes, a los fines de contribuir con las acciones estratégicas de la CRA correspondientes a los programas de la línea No. 5 Fortalecimiento y modernización de la institucionalidad ambiental, en adición a la línea estratégica No. 1: Gestión para la sostenibilidad del Recurso Hídrico requerida en el Pliego de Condiciones (página 7) y los Estudios Previos del pliego de la convocatoria (página 3).

Comparación con la Metodología aplicada en Monitoreos Previos

En Monitoreos Previos llevados a cabo bajo supervisión y contratación por la C. R. A., se ejecutaron muestreos y aplicaciones de los índices de Calidad de Aguas de dos maneras: aplicando el Índice de Calidad de Aguas de la Hoja Metodológica del IDEAM y los índices de contaminación propuestos por Ramirez y otros (1997). Sin embargo, sólo en el último informe se adoptó un enfoque geoespacial de estas herramientas (Informe Técnico de Estudio de Caracterización de Agua Superficial – Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA, Julio-Agosto 2023). Es ese informe, tomando en cuenta la formulación del Índice de Calidad de Aguas de la Hoja Metodológica del IDEAM, se elaboró una *interpolación grafica* de los 3 puntos de muestreo obtenidos en la Ciénaga de Balboa. Gracias a esta técnica y utilizando mapas georreferenciados con el perímetro del cuerpo de agua (bases de datos del IGAC escala 1:25.000) se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente figura,

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

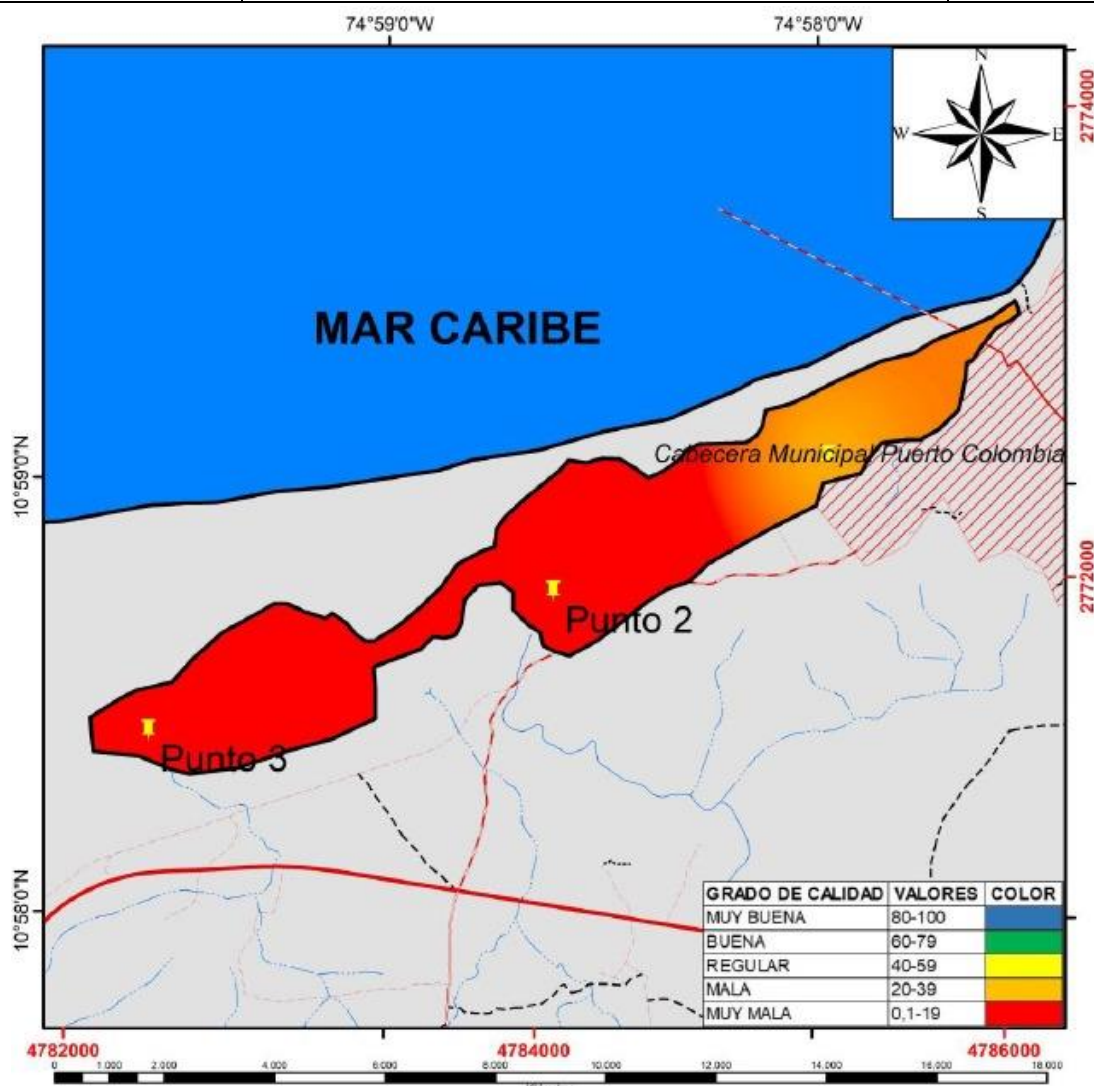


Figura 10. Índice de Calidad del Agua (ICA) en Ciénaga de Balboa, página 213 del informe de Monitoreo de Fuentes Hídricas de la C. R. A. 2023.

Como el cálculo del ICA mediante mapas de índices multiespectrales está fuera del alcance de los trabajos contratados bajo el presente servicio, la comparación metodológica se realizará con el resultado del ICOSUS y la escala recomendada para su lectura en la clasificación de los cuerpos de agua (Ramírez y otros 1997). Aplicando el índice a través del módulo ráster del software Metashape

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

de Agisoft, podemos obtener un mapa equivalente con la misma escala que la sugerida por Ramírez. Como resultado de dicho ejercicio obtenemos el siguiente mapa,

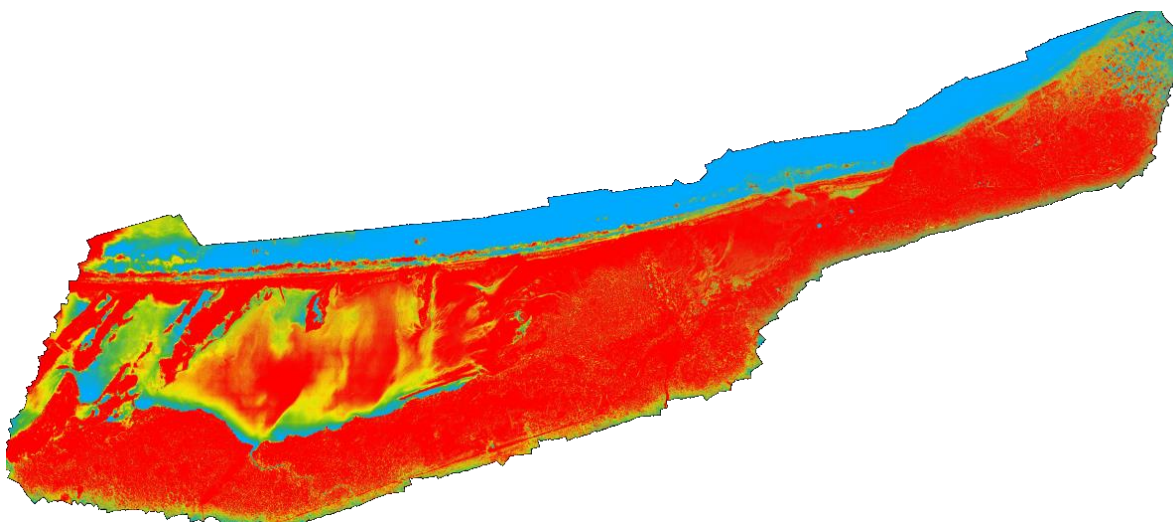


Figura 10. Mapa del ICOSUS según la escala propuesta por Ramírez y otros (1997) para el presente monitoreo de Sólidos Suspendidos Totales en la Ciénaga de Balboa (noviembre del 2024).

Elaboración propia.

De la comparación entre ambos mapas se pueden realizar los siguientes comentarios:

- En el caso del ICA calculado para la Ciénaga de Balboa en el Monitoreo del 2023, la imagen obtenida del perímetro del cuerpo de agua es una base cartográfica desactualizada, válida para los registros del IGAC pero que no refleja el estado actual del perímetro del cuerpo de agua. Para el caso del ICOSUS obtenido en el presente informe, se trata de un mapa de reflectancia manipulado según una técnica estadística (Análisis de Regresión Múltiple y Procesamiento ráster) sobre las *imágenes de la condición actual* del cuerpo bajo estudio.
- La técnica de interpolación lineal aplicada para la obtención del mapa del ICA de la Ciénaga de Balboa en 2023 si bien refleja el estado crítico del cuerpo de agua, es una aproximación geoespacial basada en criterios de simulación numérica (se presume una técnica de interpolación lineal debido a las características del mapa, donde se observa una gradación

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

desde el punto de muestreo 1 al 3, sin valores intermedios reportados entre éstos). En el caso del mapa del ICOSUS presentado en este informe, se trata de un modelo de regresión lineal múltiple basado en los valores de campo de la variable en cuestión (Sólidos Suspendidos Totales) y los mapas de reflectancia manipulados a través del módulo ráster del software Metsahape, lo cual significa que, en cada píxel de este, se ha calculado el índice, mostrando su valor según la escala recomendada.

- Abordando el tema de la resolución espacial, el mapa del ICA está elaborado a escala 1:25000, indicando que cada centímetro de éste medido a la referida escala representa 227 metros del terreno real. En el caso del ICOSUS del presente trabajo, la resolución es la misma que la obtenida en el procesamiento de las imágenes Multiespectrales, es decir, 8.89 cm/píxel. Esto quiere decir que, al realizar ampliaciones sucesivas hasta ‘pixelar’ la imagen del mapa ICOSUS, cada píxel representa poco menos de 9 centímetros del terreno real capturado por la aeronave Mavic 3 Multiespectral. Esto a su vez implica una escala de alrededor 1:100 si elaborásemos el mapa según criterios cartográficos equivalentes.

En conclusión, la metodología de observación y análisis propuesta tiene ventajas significativas que redundan en aspectos como: la actualización de los datos del cuerpo de agua bajo estudio (las imágenes muestran el nivel de intervención y peligro de desaparición en la condición actual de la Ciénaga de Balboa); la resolución del mapa obtenido (en números redondos se trata de un mapa con menos de 10 centímetros por píxel de resolución, una escala equivalente a 1:100 en términos cartográficos); la representación es numéricamente fiable, en el sentido de que se trata de un modelo elaborado con datos de campo del parámetro en cuestión y valores de reflectancia obtenidos el mismo momento del muestreo, para toda el área levantada. Otros aspectos relevantes para mencionar son: la posibilidad de crear innumerables análisis, aplicando distintas técnicas de procesamiento de imágenes, las cuáles son válidas para el momento del muestreo y muy detalladas gracias al nivel de resolución y las distintas bandas de adquisición en que las imágenes fueron captadas.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

6. Resultados

1. Constancia de Entrega de los datos procesados

Al consolidar los datos y la generación de los productos serán consignados en un directorio virtual para compartir los archivos correspondientes. Asimismo, se consignarán en hardware (Disco Duro de Estado Sólido) para un mejor respaldo.

2. Modelos Digitales

Se muestran, cuando se disponen, los resultados de la Ciénaga de Balboa, Mallorquín, Luruaco y Tocaguas. En el caso de las Ciénagas de El Rincón, Malambo y El Convento, se encuentran en proceso mediante software fotogramétrico o a la espera de los permisos de vuelo y resultados de laboratorio para su ejecución.

CIÉNAGA DE BALBOA

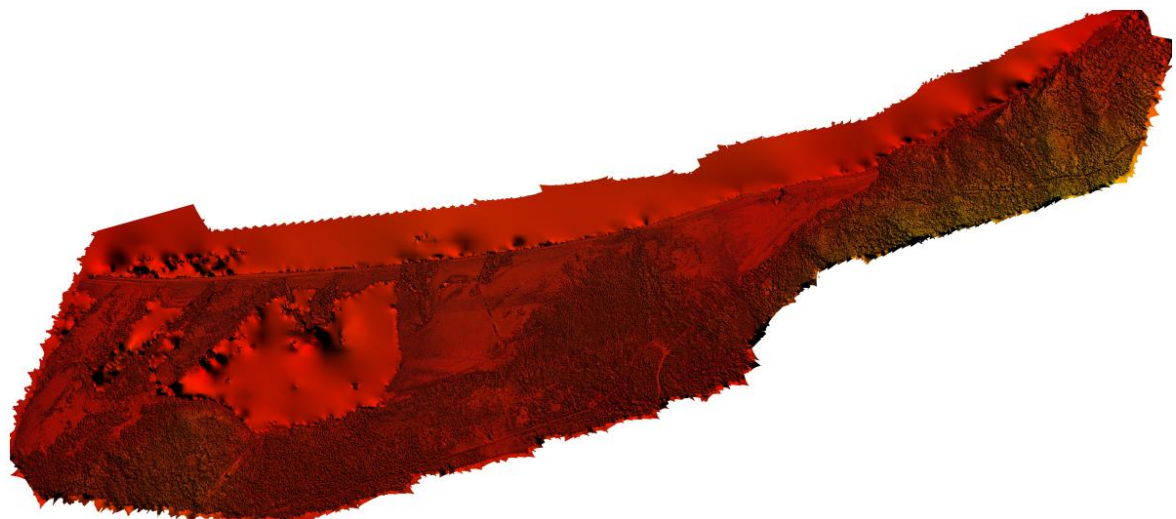
I. Modelos Digitales

- Modelo Digital Ortorectificado – MDO (Ortomosaico).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

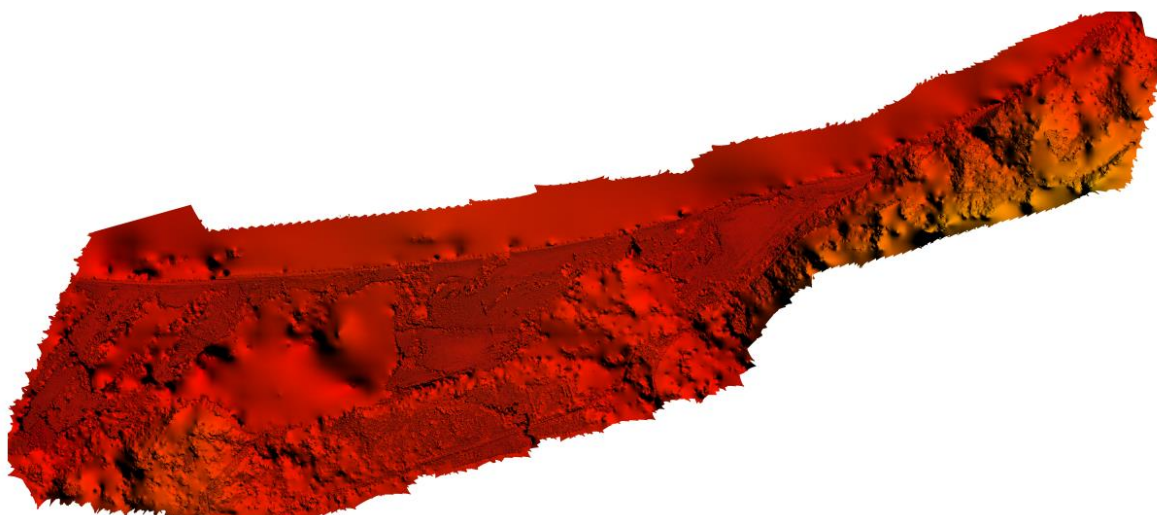


- Modelo Digital de Elevaciones – MDE

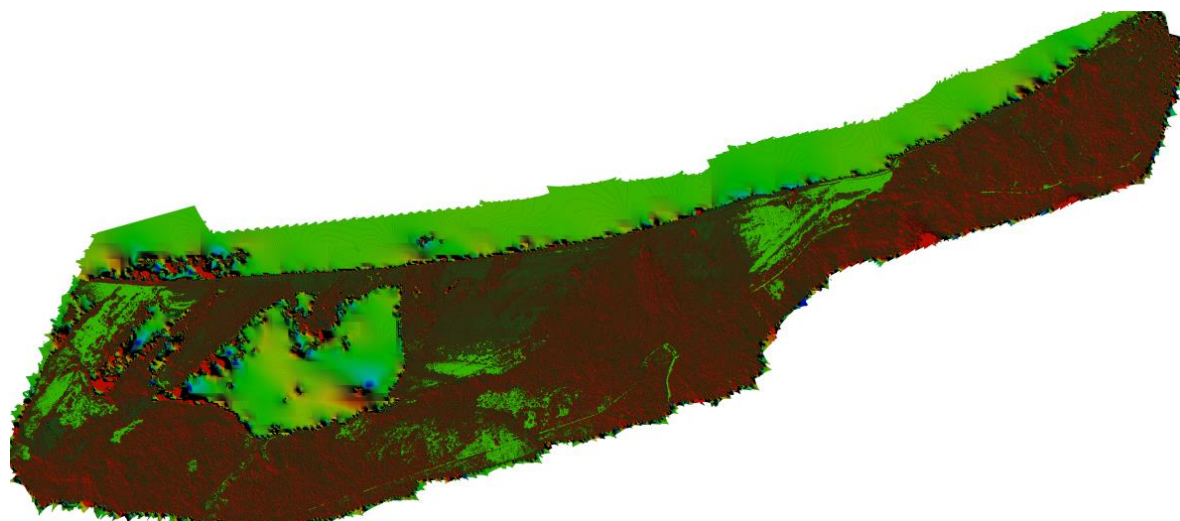


- Modelo Digital del Terreno – MDT.

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

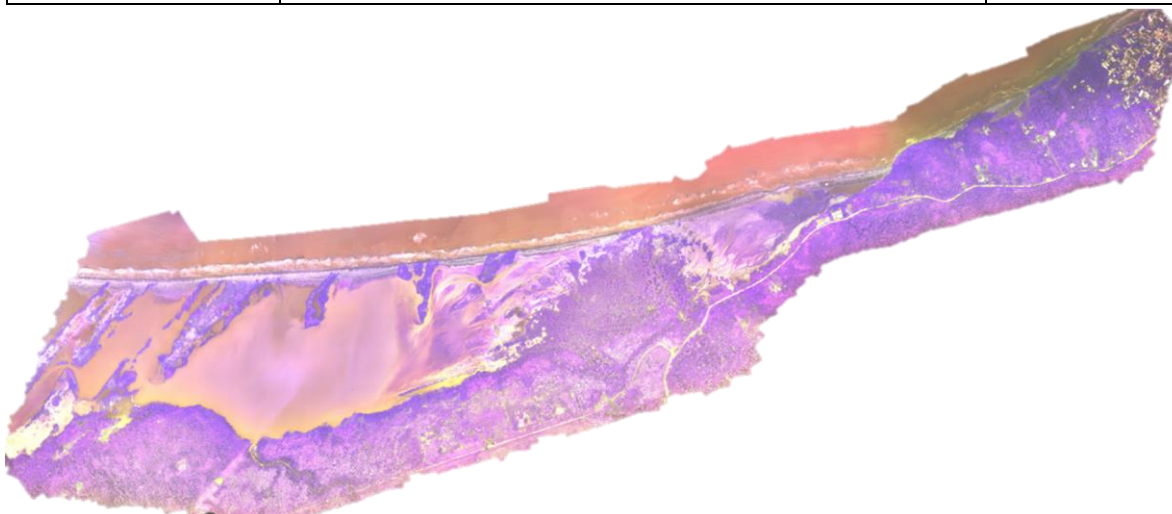


- Modelo Digital de Cobertura Forestal circundante a los cuerpos de agua – MDC.



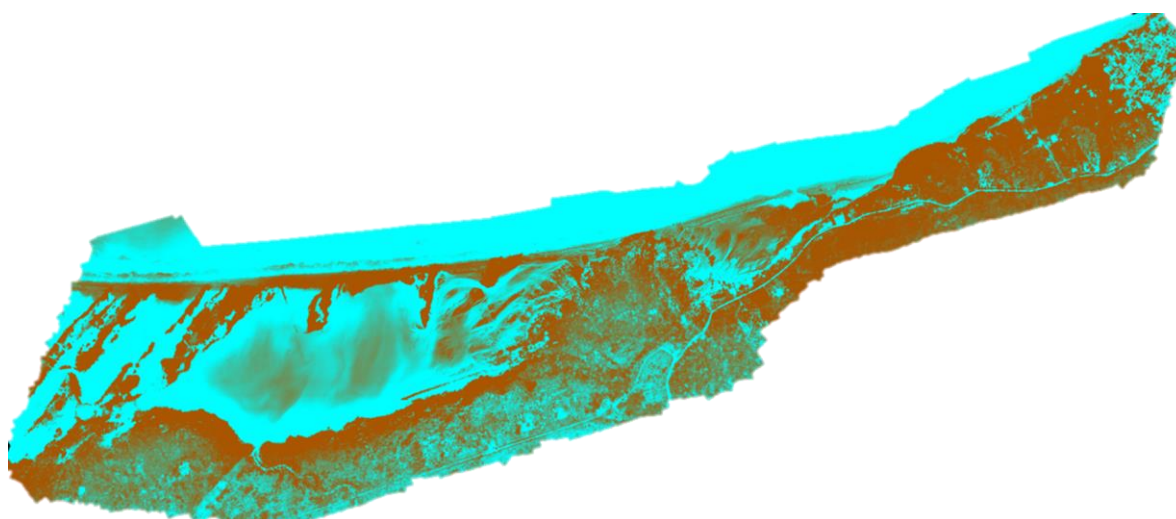
- Modelo Digital Multiespectral (mapa compuesto con las imágenes de todas las bandas superpuestas en este orden: verde, rojo, borde-rojo e infrarrojo cercano)

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



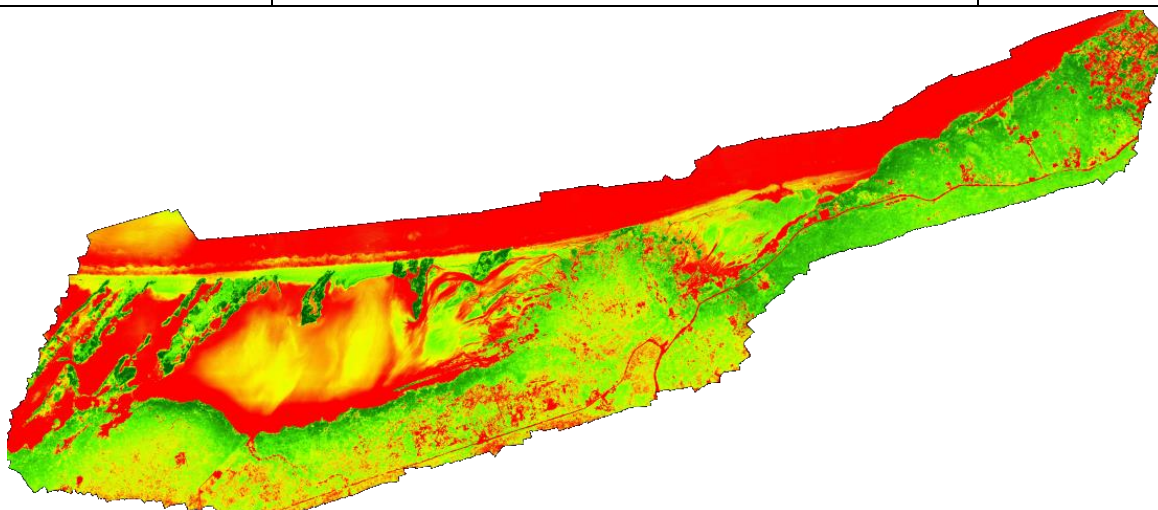
II. Índices Normalizados

- NDWI – Normalized Difference Water Index (Índice Diferencial Normalizado de Agua)

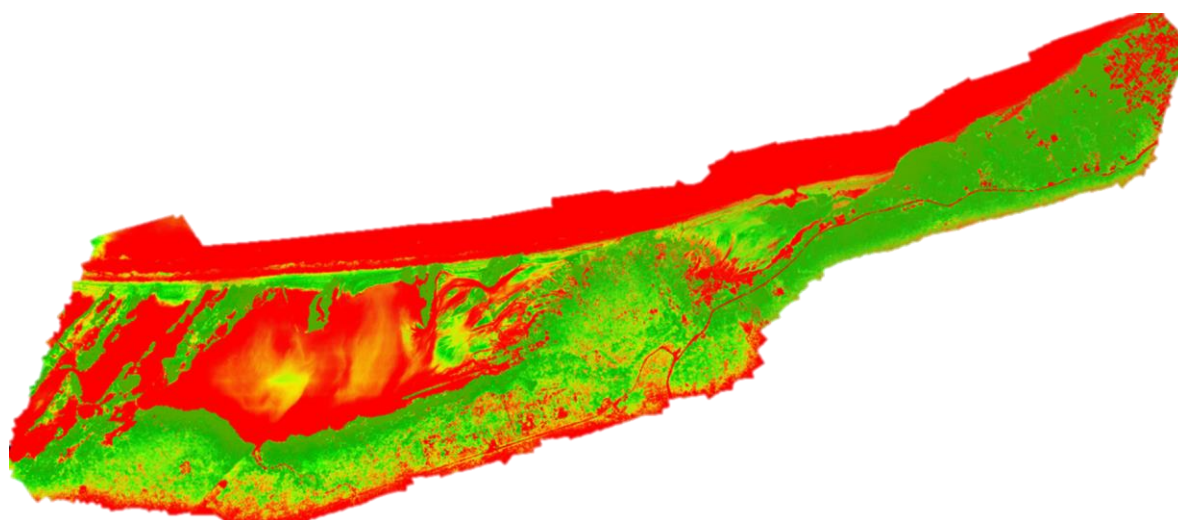


- NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

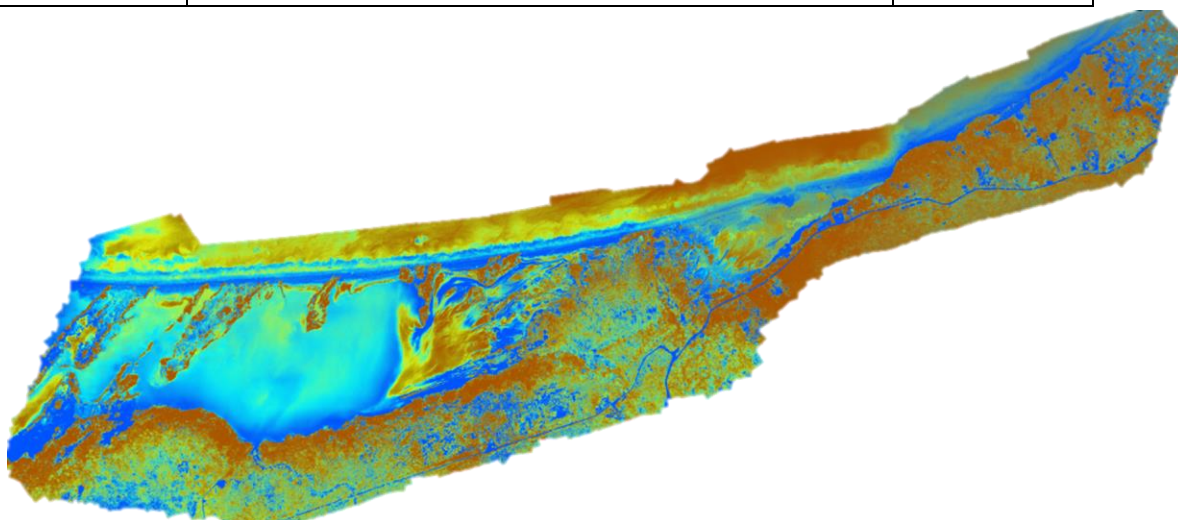


- NDCI – Normalized Difference Clorophyll Index (Índice Diferencial Normalizado de Clorofila)



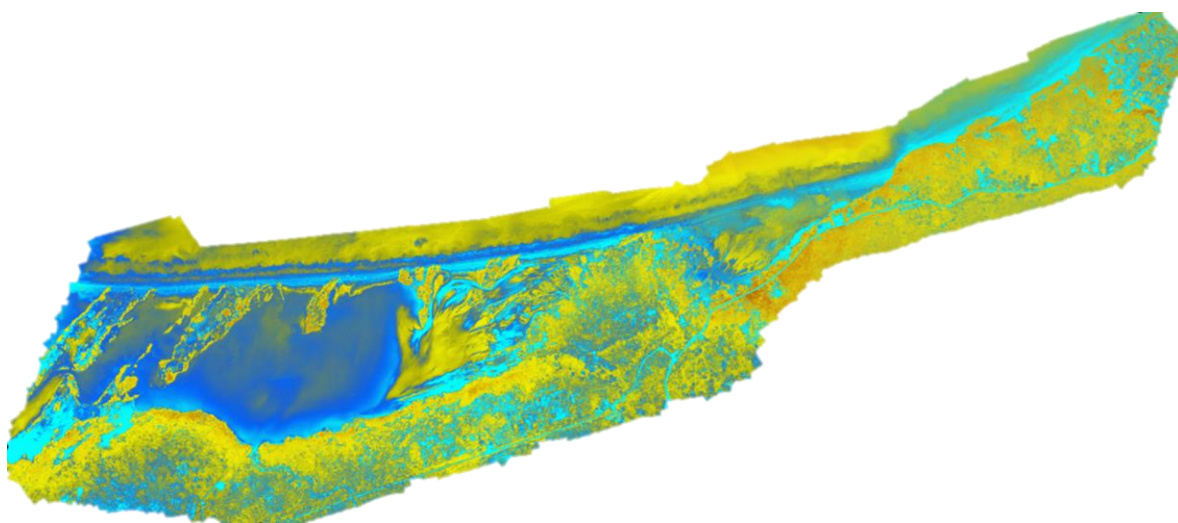
- NDTI (Normalized Difference Turbid Index (Índice Diferencial Normalizado de Turbidez)

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



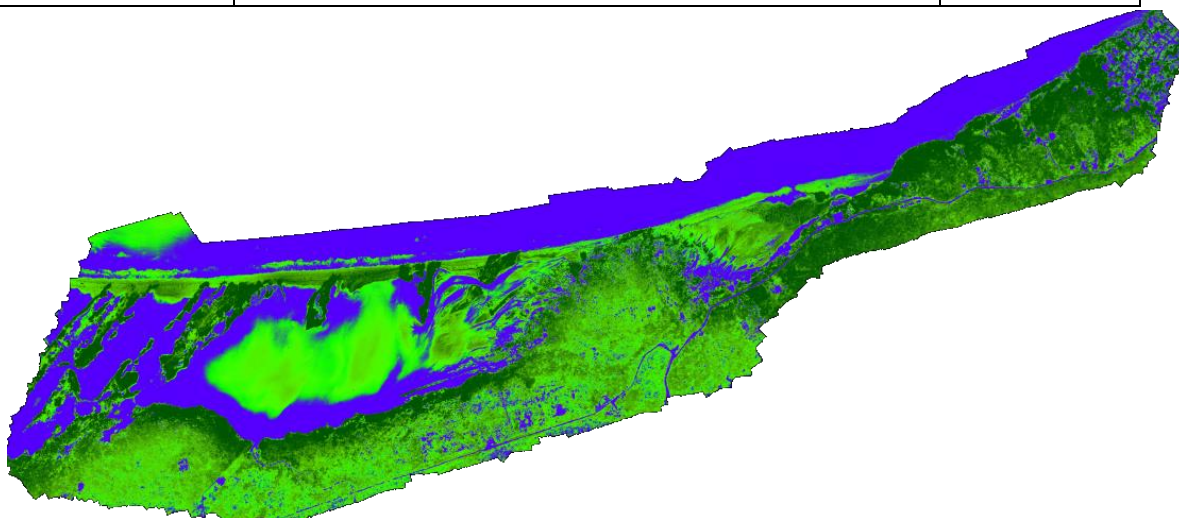
III. Índices Escalables

- TSM – Total Suspended Matter (Materia Total Suspendida)



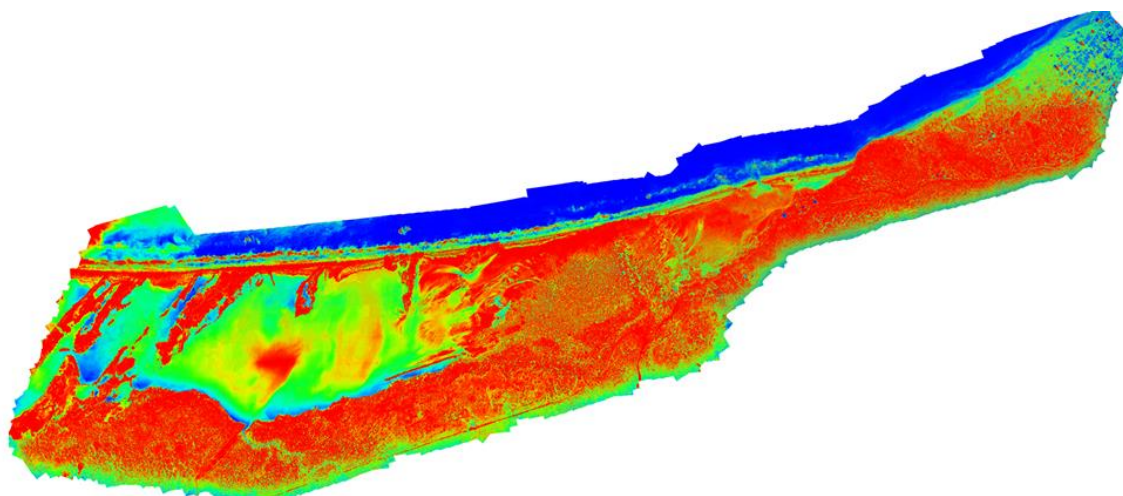
- CMRI - Combined Mangrove Recognition Index (Índice Combinado para Reconocimiento de Manglar)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



IV. Mapas-Productos de Análisis Geoestadístico

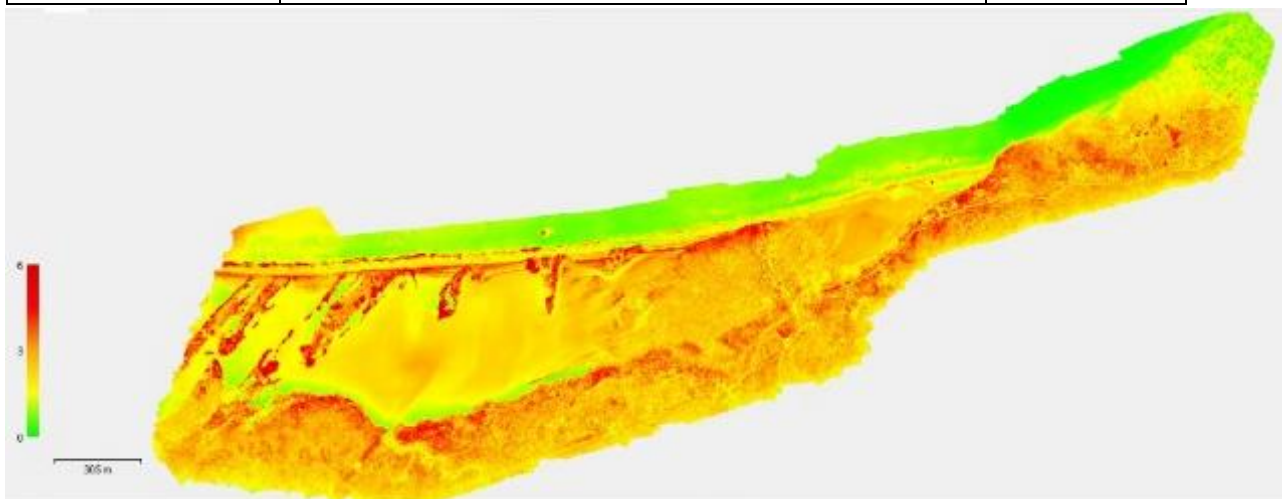
- Mapas de Concentración de Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) obtenido a través de Análisis de Regresión Múltiple (ARM).



- Mapas de Conteo de Cianobacterias (Individuos/L), obtenido a través de análisis de regresión múltiple (ARM)

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

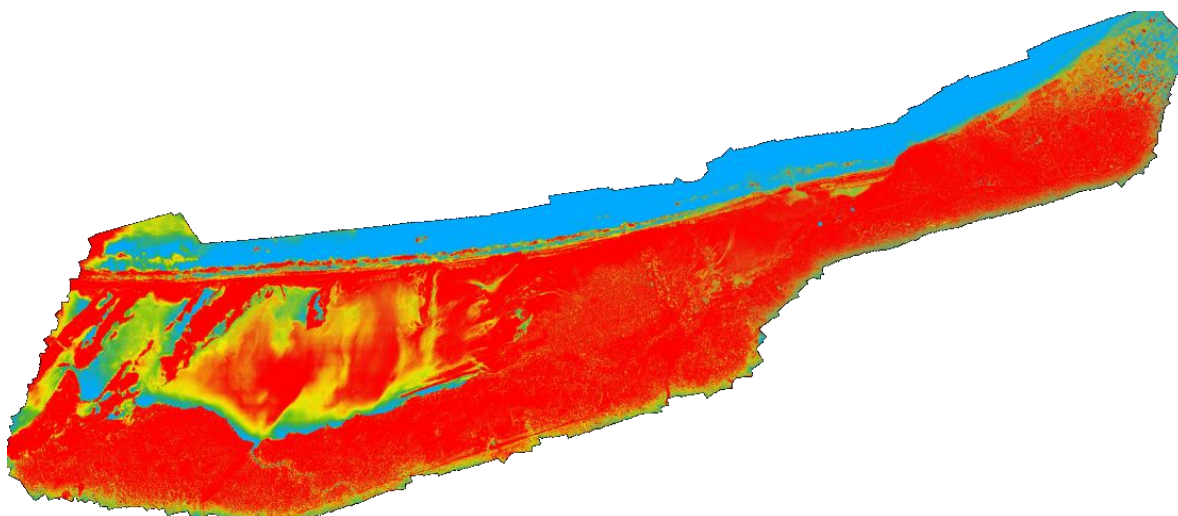
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Nota aclaratoria: Debido a la inexistencia de conteo de individuos (cianobacterias) por unidad de volumen para uno de los puntos muestreados, se ha optado por generar un modelo para todas las especies de Fitoplancton. Obsérvese la semejanza entre este mapa y el correspondiente al índice de identificación de cianobacterias opción 3. Asimismo, la semejanza en tonalidades para el caso del verde que se refleja en la composición RGB231 para los sensores del M3M.

V. Mapas Especiales

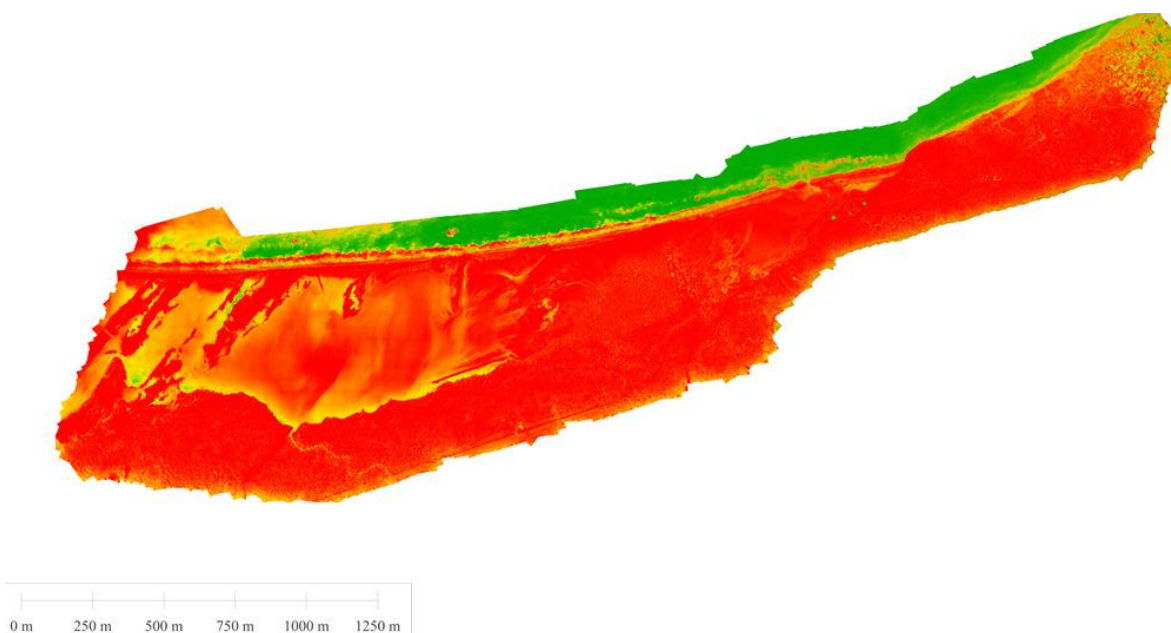
- Mapas de Calidad de Aguas (Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos - ICOSUS)



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

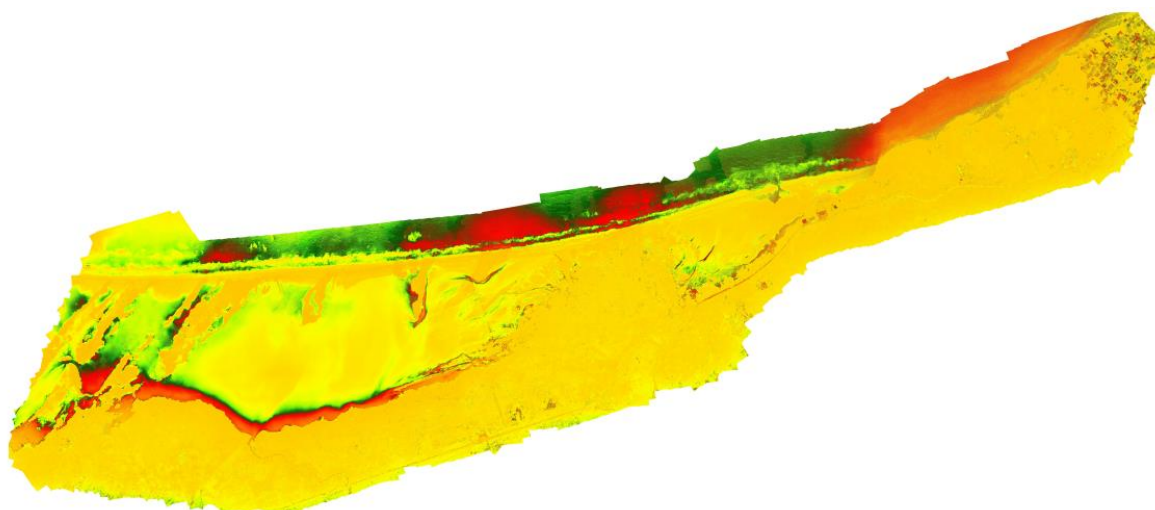
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

- Mapa Normativo para Sólidos Suspendidos Totales con los Límites establecidos para los cuerpos de agua estudiados según la normativa vigente de la C. R. A.



VI. Mapa de Índice de Identificación de Cianobacterias

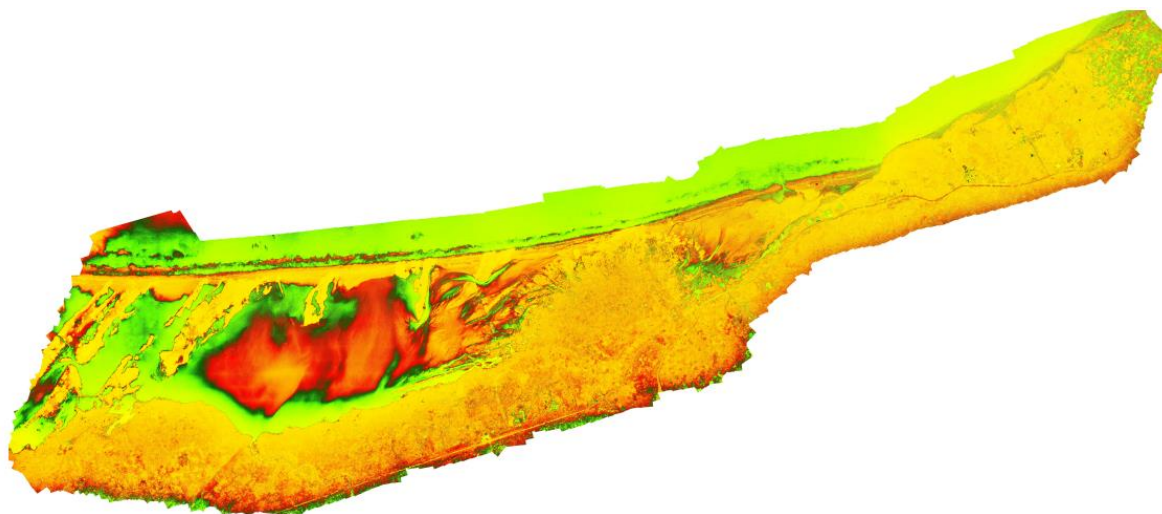
- ICI 1 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 1)



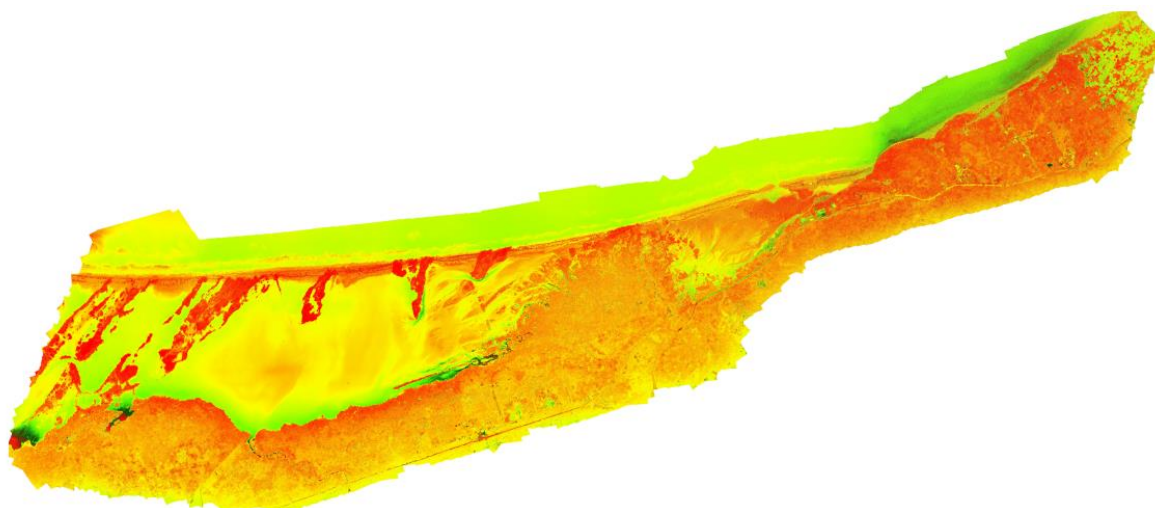
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- ICI 2 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 2)

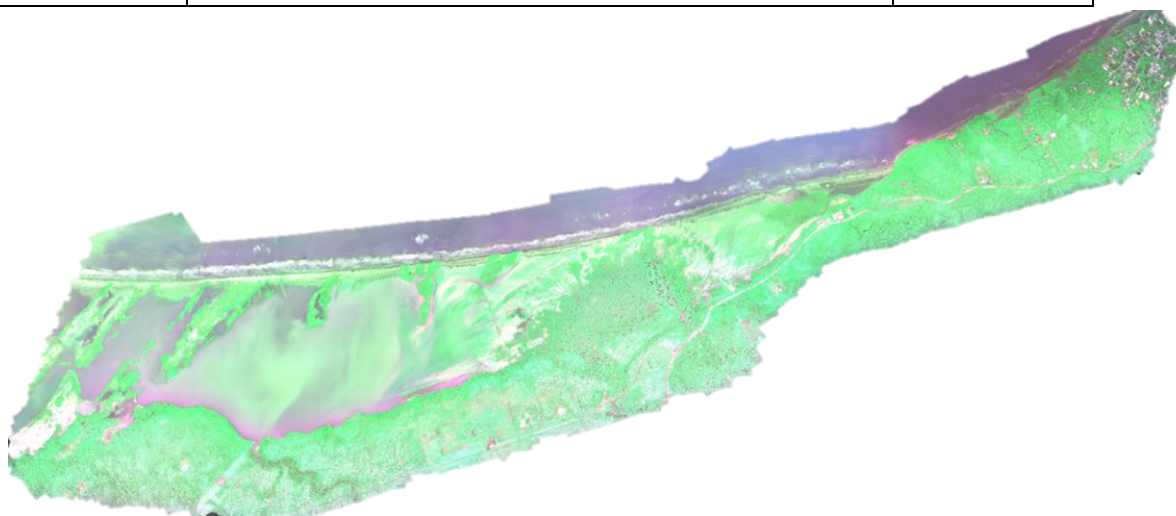


- ICI 3 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 3)

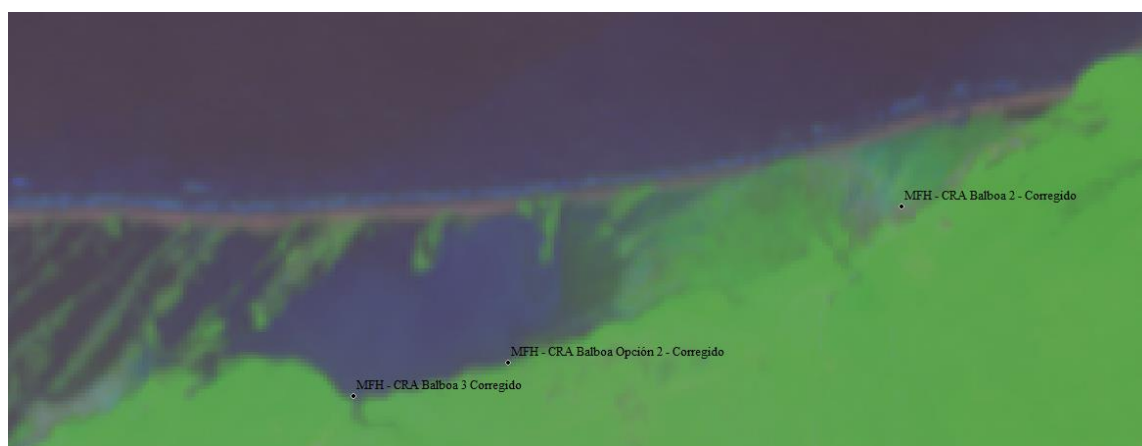


- Mapa de Composición RGB para identificación de Fitoplancton de Dron (M3M) vs. Satélite (S-2) en composiciones de Bandas Equivalentes.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Composición RGB231 obtenida con los ortomosaicos Multiespectrales elaborados a partir del Sensor del Mavic 3 Multispectral



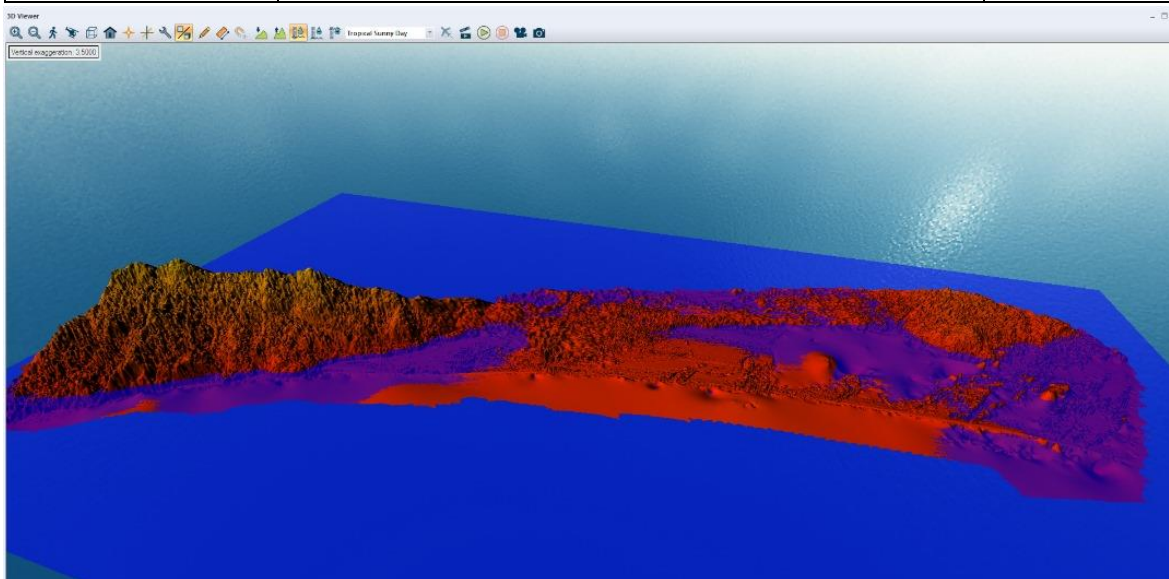
Composición RGB463 producto de la información proveniente del Satélite Sentinel 2, del Proyecto Copernicus captadas el 21 de Noviembre del 2024, mismo día de la campaña simultánea de vuelo y muestreo de aguas en el mencionado cuerpo.

VII. Mapa de Riesgos de Inundación

Basado en los niveles de marea y extremos históricos registrados (a la espera de confirmación de eventos de alto oleaje registrados en épocas anteriores).

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Nota aclaratoria: Este modelo se basa en la inundación del área en incrementos predeterminados de 3 metros. En condiciones de alto oleaje y viento, este límite es fácilmente superable por las condiciones mareométricas locales. En la visual mostrada (dirección Norte-Sur), se puede constatar que el cuerpo de agua sería inundado por la zona más septentrional (donde ya existe un rompimiento que permite la entrada del agua de mar) y la zona sur, justo en la zona de relictos de manglar y colindante al cuerpo principal de la ciénaga. La simulación ha sido realizada en software de información Geográfica Globalmapper®.

CIÉNAGA DE MALLORQUÍN

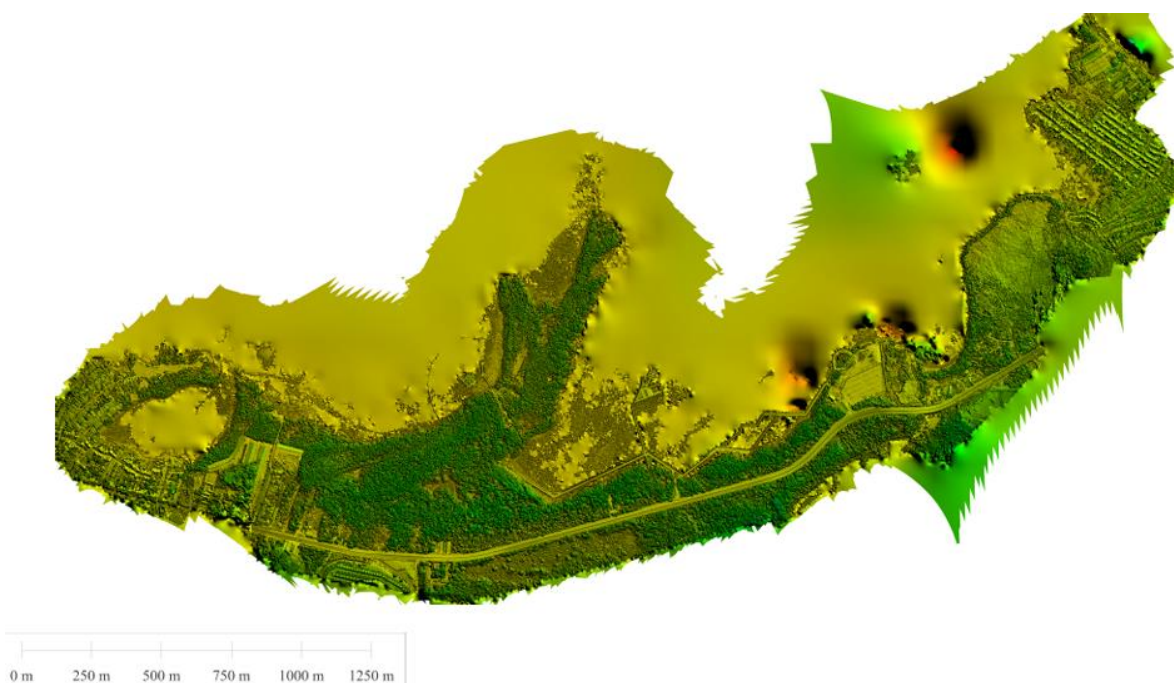
I. Modelos Digitales

- Modelo Digital Ortorectificado – MDO (Ortomosaico).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



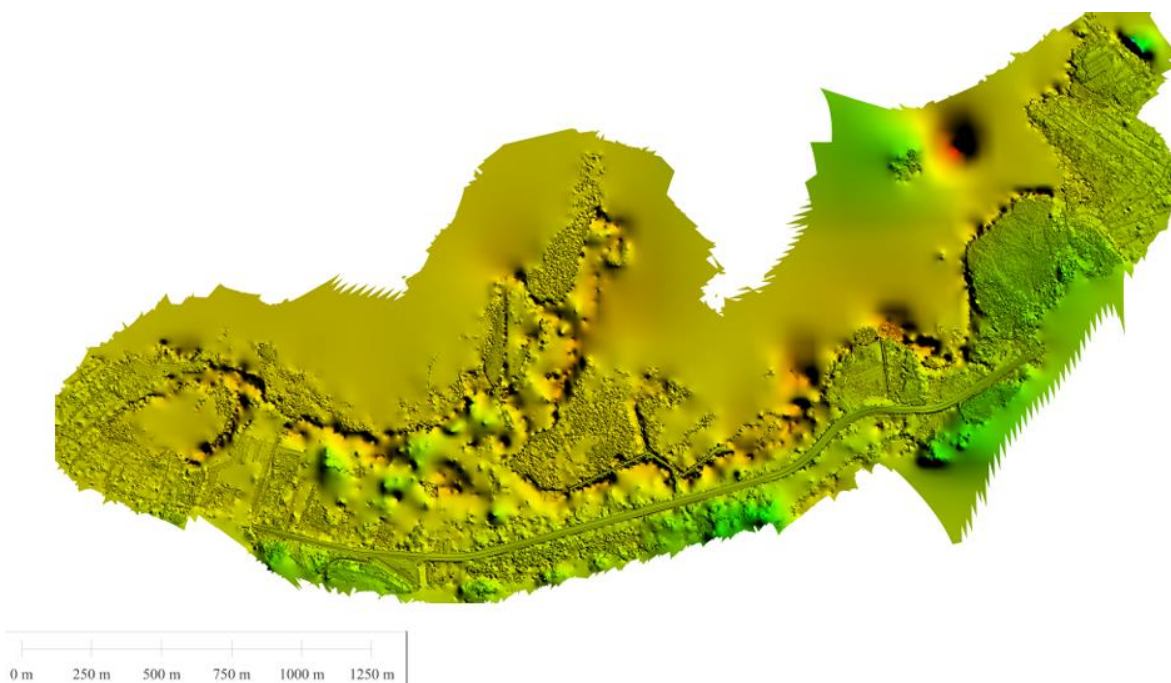
- Modelo Digital de Elevaciones – MDE



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

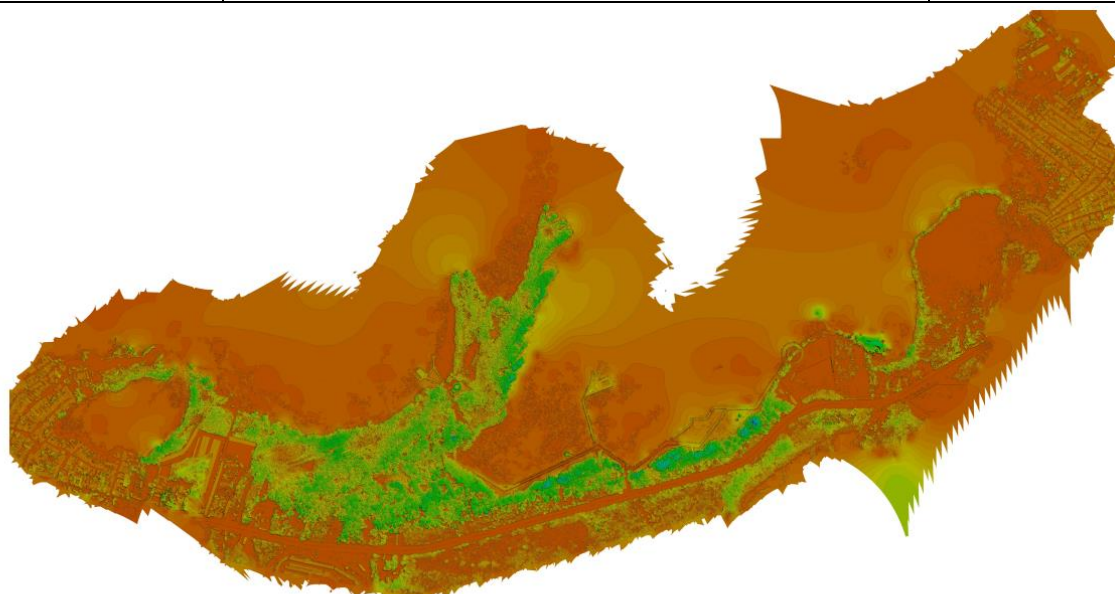
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- Modelo Digital del Terreno – MDT.

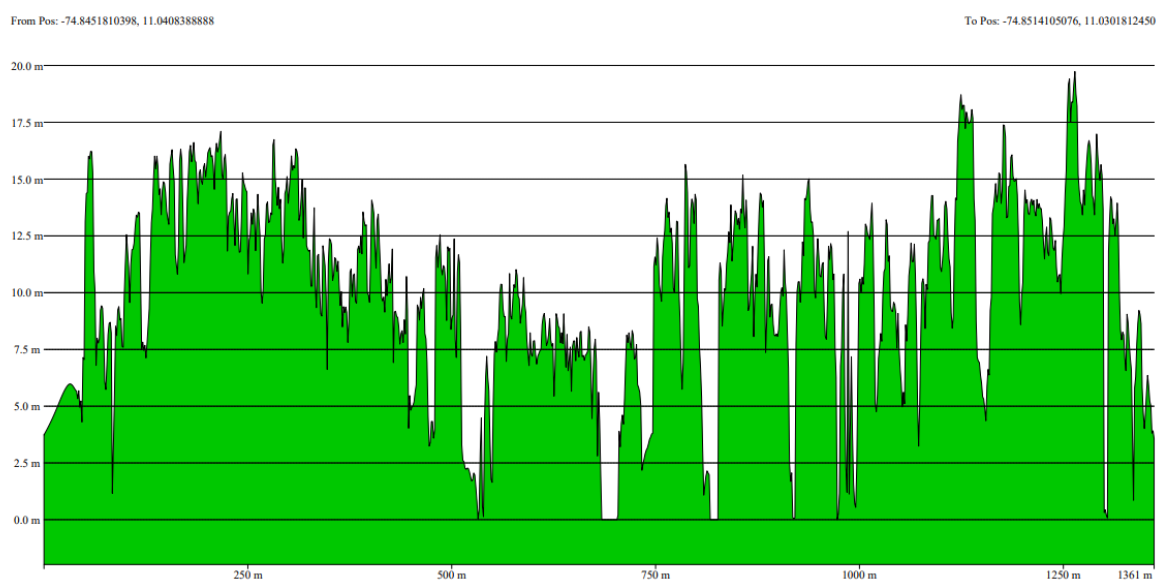


- Modelo Digital de Cobertura Forestal circundante a los cuerpos de agua – MDC.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Adicionalmente, se han obtenido Perfiles de Elevación de la Cobertura Forestal en la Península de Manglar donde se encuentra el mirado del Ecoparque Ciénaga de Mallorquín, tal como se muestra a continuación,



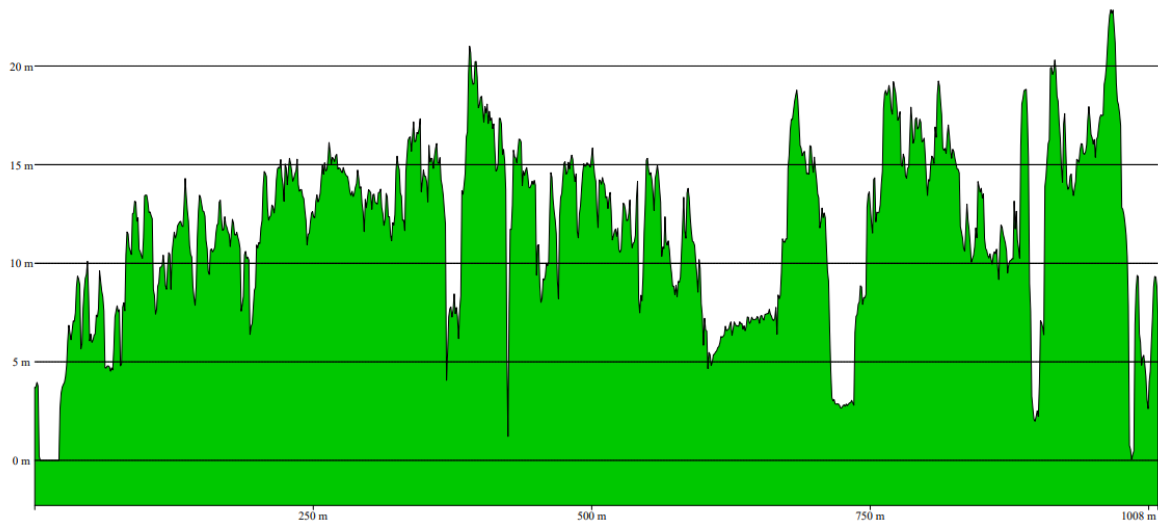
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Perfil Longitudinal de Elevación de la Cobertura Forestal (copa de los árboles de Mangle) a lo largo de la península de Manglar.

From Pos: -74.8561388989, 11.0342591697

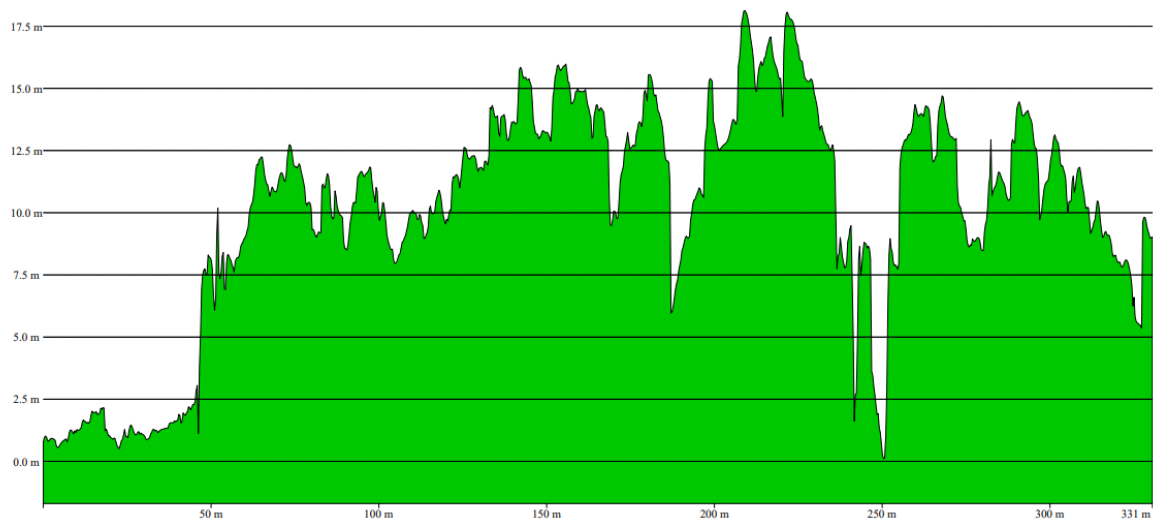
To Pos: -74.8475577444, 11.0309067654



Perfil Transversal de Elevación de la Cobertura Forestal (copa de los árboles de Mangle) a lo largo de la península de Manglar. La línea del eje de este perfil es transversal a la base de la península en las cercanías de la de acceso al Ecoparque.

From Pos: -74.8517607588, 11.0340840441

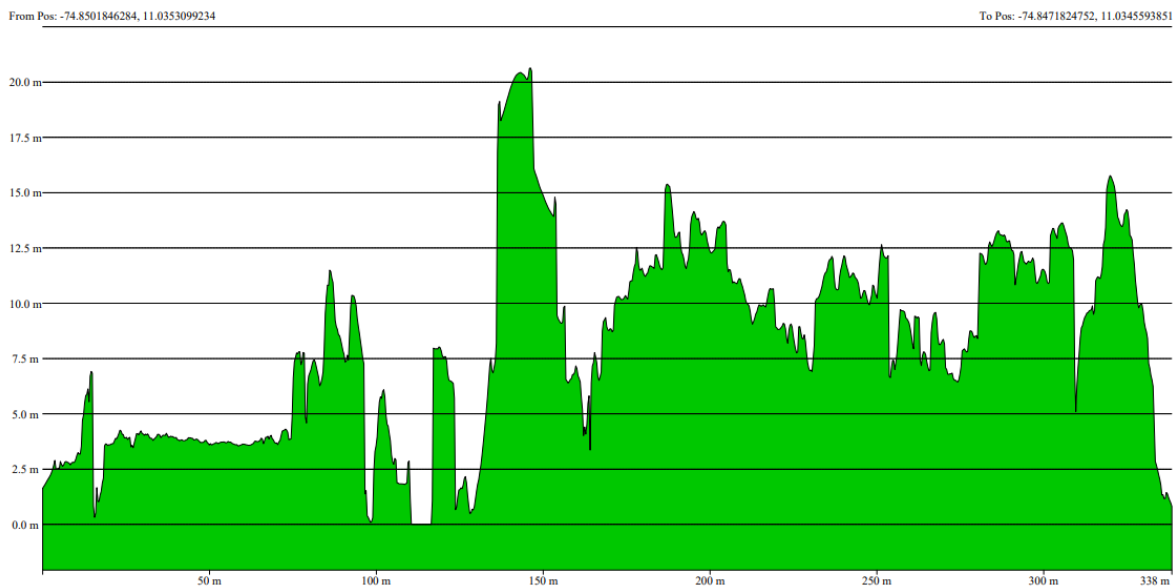
To Pos: -74.8489587492, 11.0329582367



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Perfil Transversal de Elevación de la Cobertura Forestal (copa de los árboles de Mangle) a lo largo de la península de Manglar. La línea del eje de este perfil se encuentra al sur del sitio donde se encuentra el mirador de aves del Ecoparque.

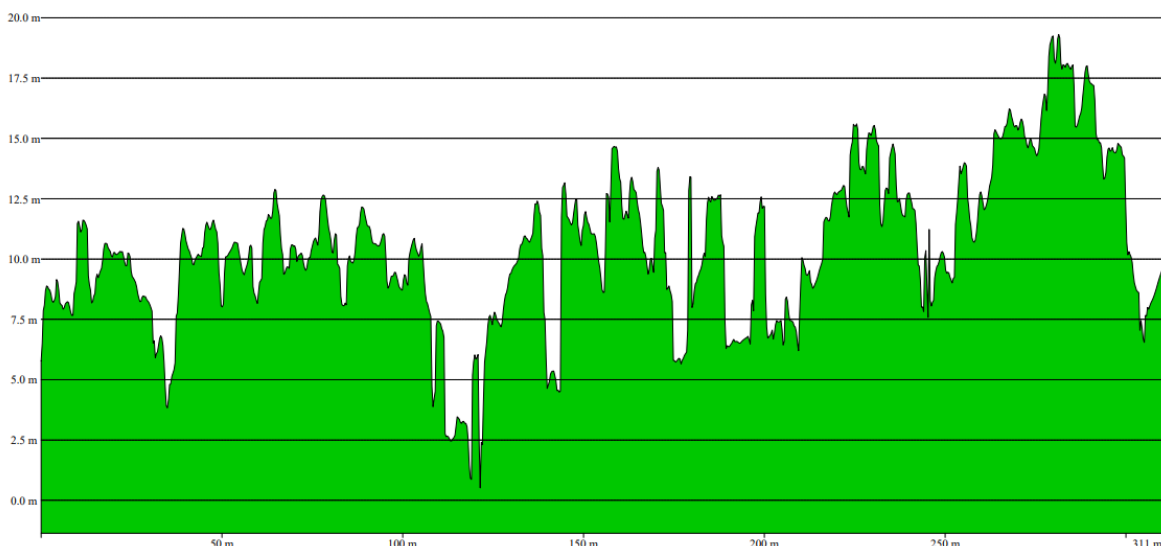


Perfil Transversal de Elevación de la Cobertura Forestal (copa de los árboles de Mangle) a lo largo de la península de Manglar. La línea del eje de este perfil se encuentra al norte del sitio donde se encuentra el mirador de aves del Ecoparque.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

From Pos: -74.8490338030, 11.0379368074

To Pos: -74.8462818293, 11.0372363050

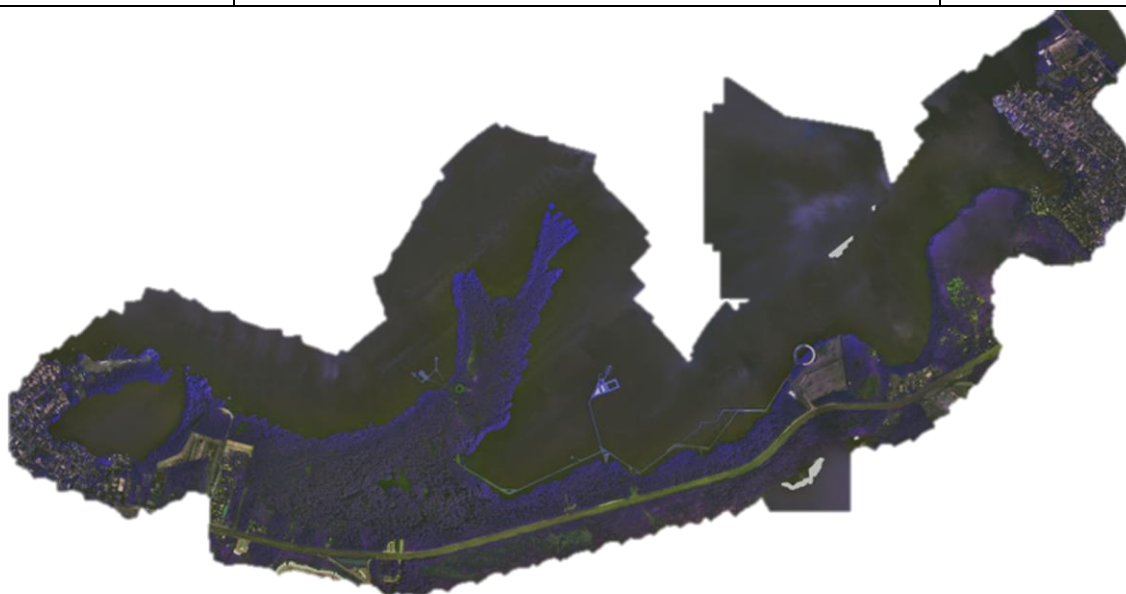


Perfil Transversal de Elevación de la Cobertura Forestal (copa de los árboles de Mangle) a lo largo de la península de Manglar. La línea del eje de este perfil se encuentra en el extremo norte de la península de Manglar.

Estos perfiles permiten conocer la altura de los árboles de Mangle Rojo (*Rizophora Manglae*) en este cuerpo forestal de la Ciénaga Mallorquín, la cual es la principal reserva forestal en la Ciénaga de Mallorquín de esta especie. Estos datos se basan en el Modelo Digital de Cobertura Forestal elaborado mediante el levantamiento aerofotogramétrico con los datos RGB capturados con la aeronave M3M.

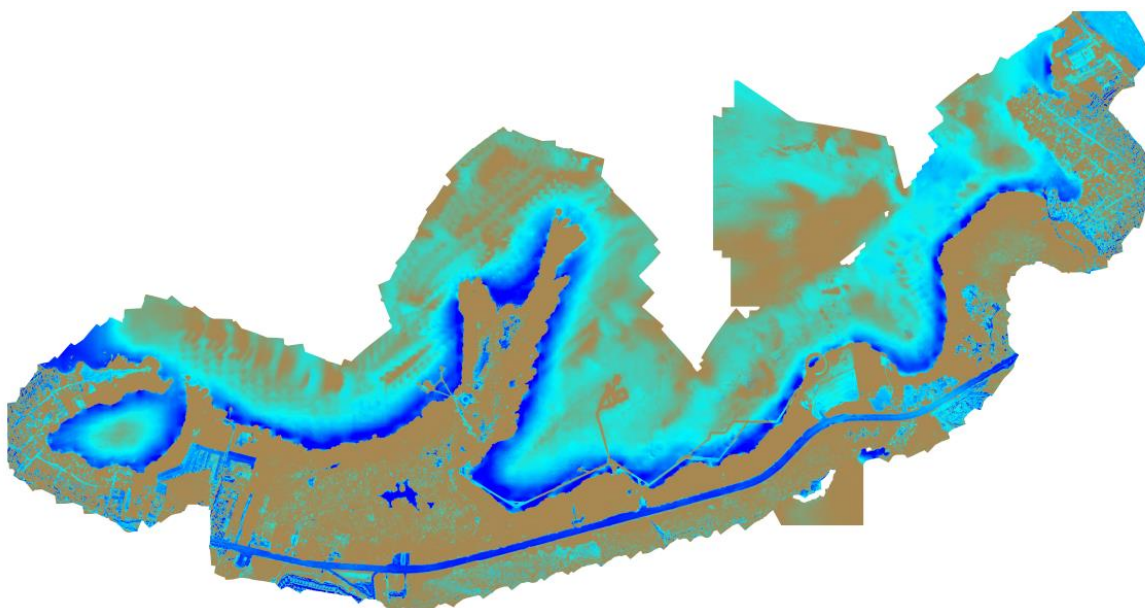
- Modelo Digital Multiespectral (mapa compuesto con las imágenes de todas las bandas en este orden: verde, rojo, borde-rojo e infrarrojo cercano)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



II. Índices Normalizados

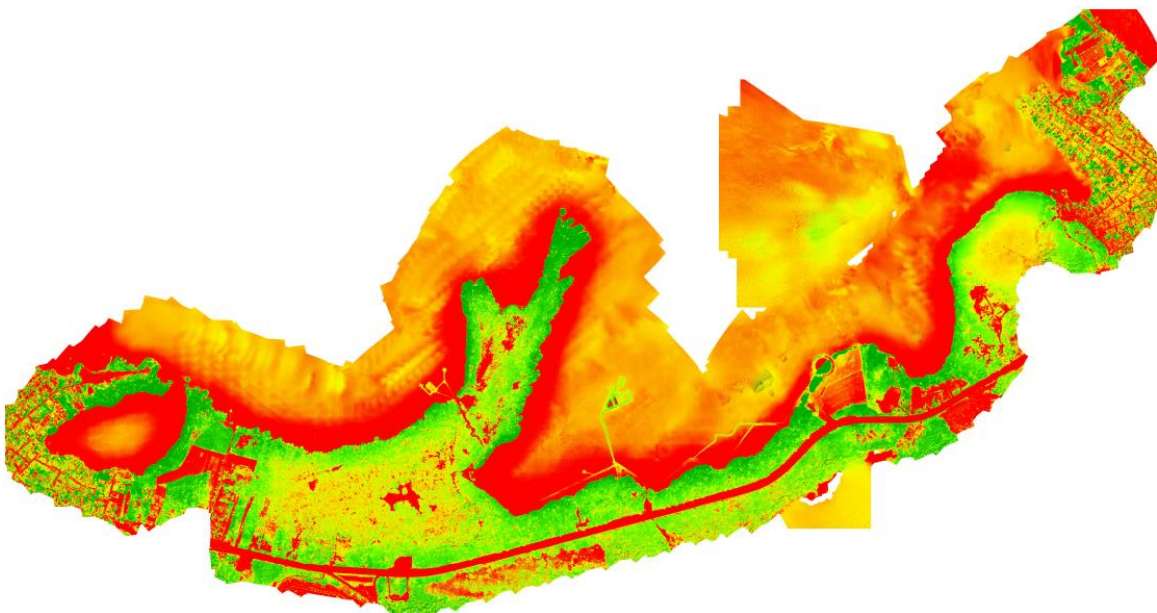
- NDWI – Normalized Difference Water Index (Índice Diferencial Normalizado de Agua)



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

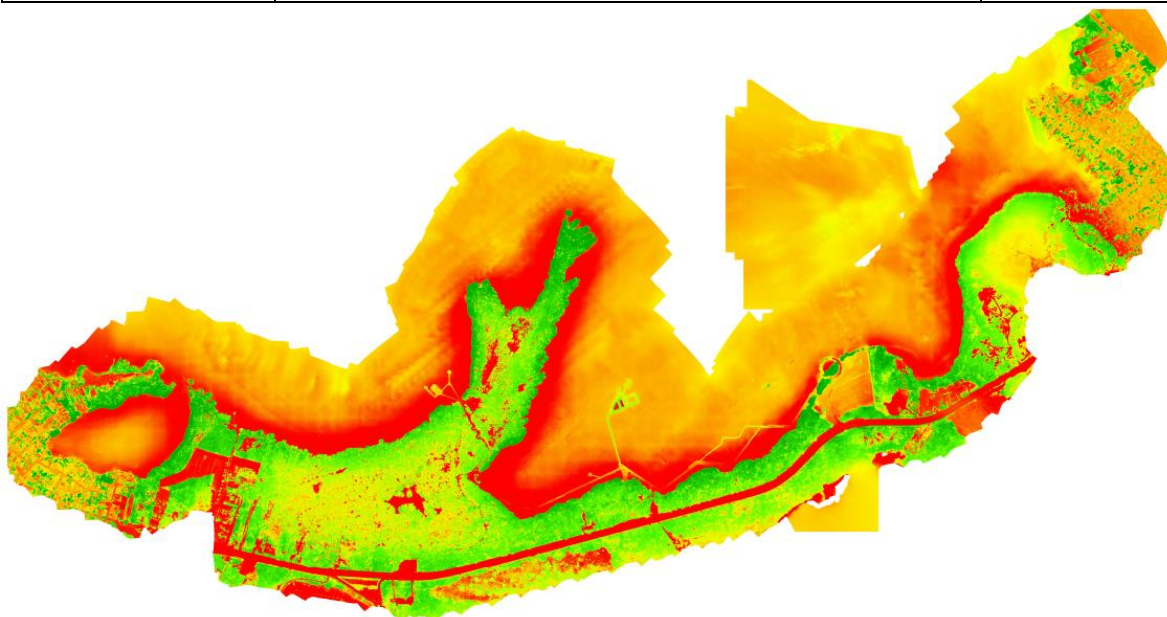
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación)

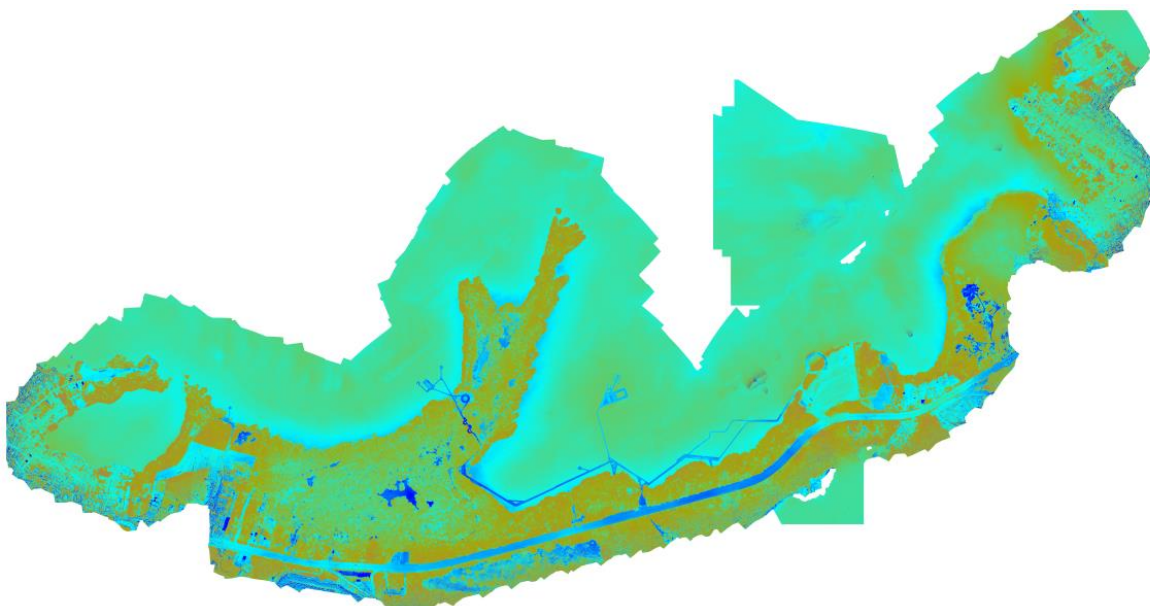


- NDCI – Normalized Difference Chlorophyll Index (Índice Diferencial Normalizado de Clorofila)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- NDTI (Normalized Difference Turbid Index (Índice Diferencial Normalizado de Turbidez)

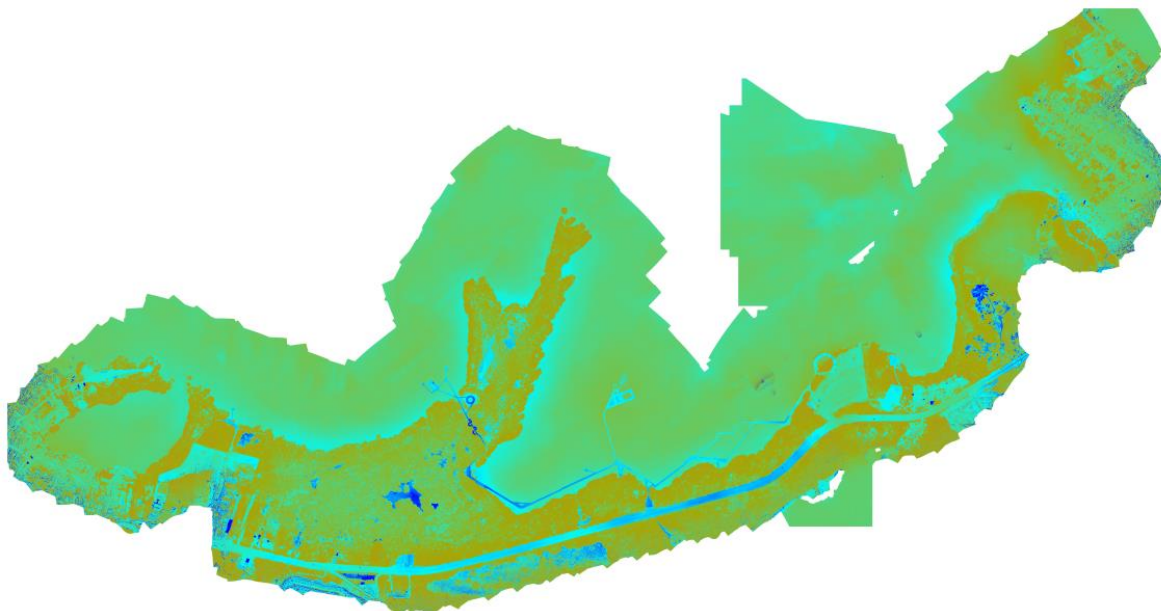


III. Índices Escalables

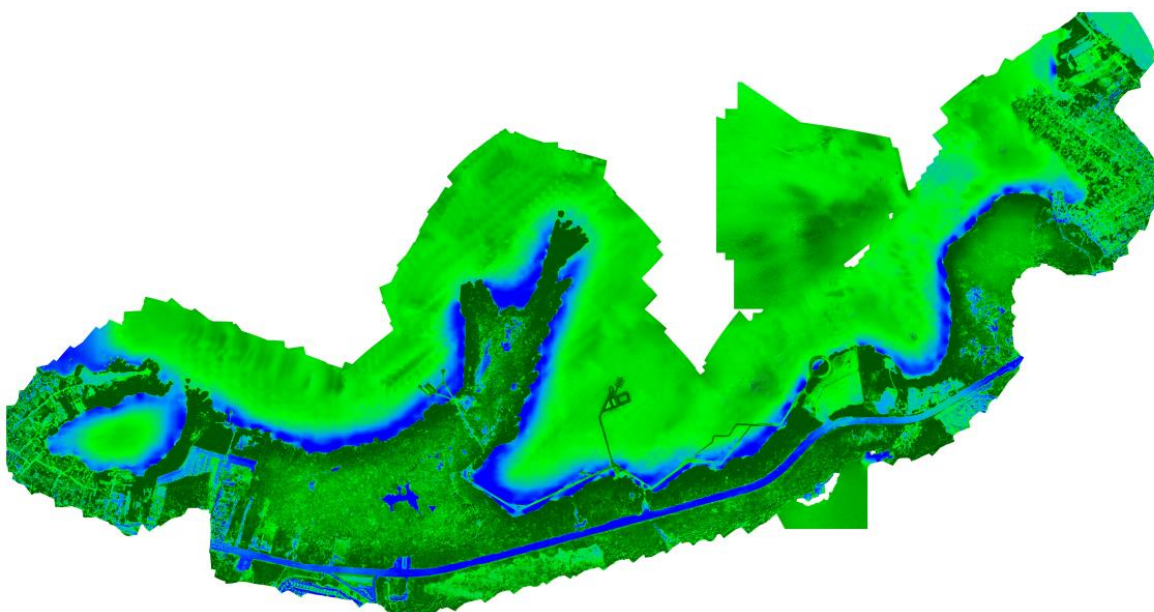
- TSM – Total Suspended Matter (Materia Total Suspendida)

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- CMRI – Combined Mangrove Recognition Index (Índice Combinado para Reconocimiento de Manglar)

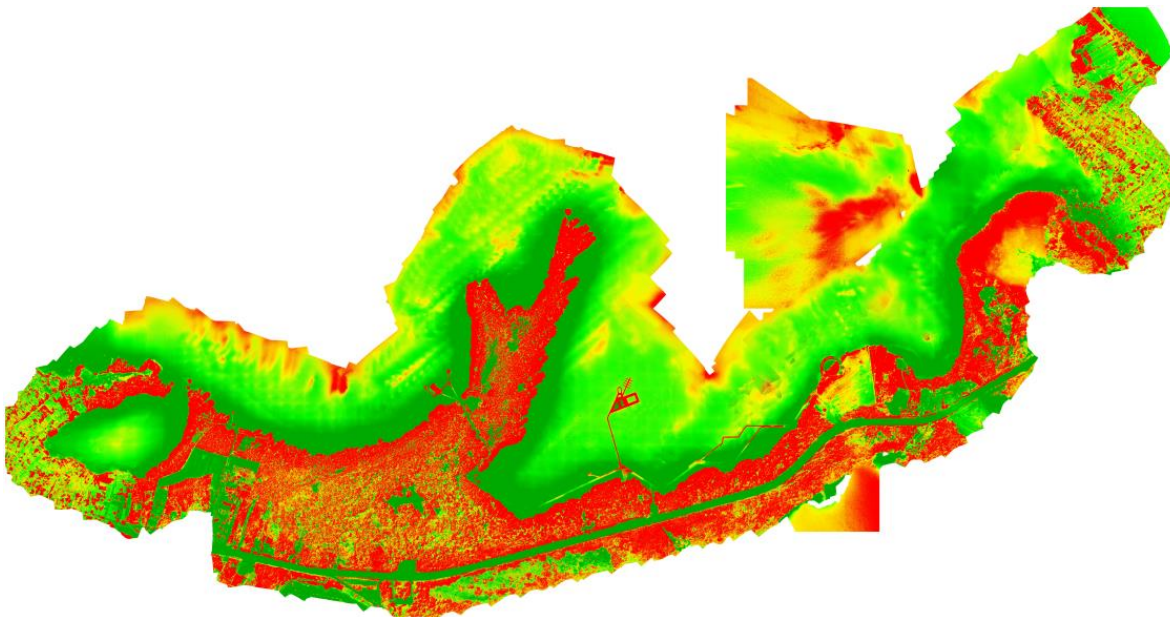


IV. Mapas-Productos de Análisis Geoestadístico

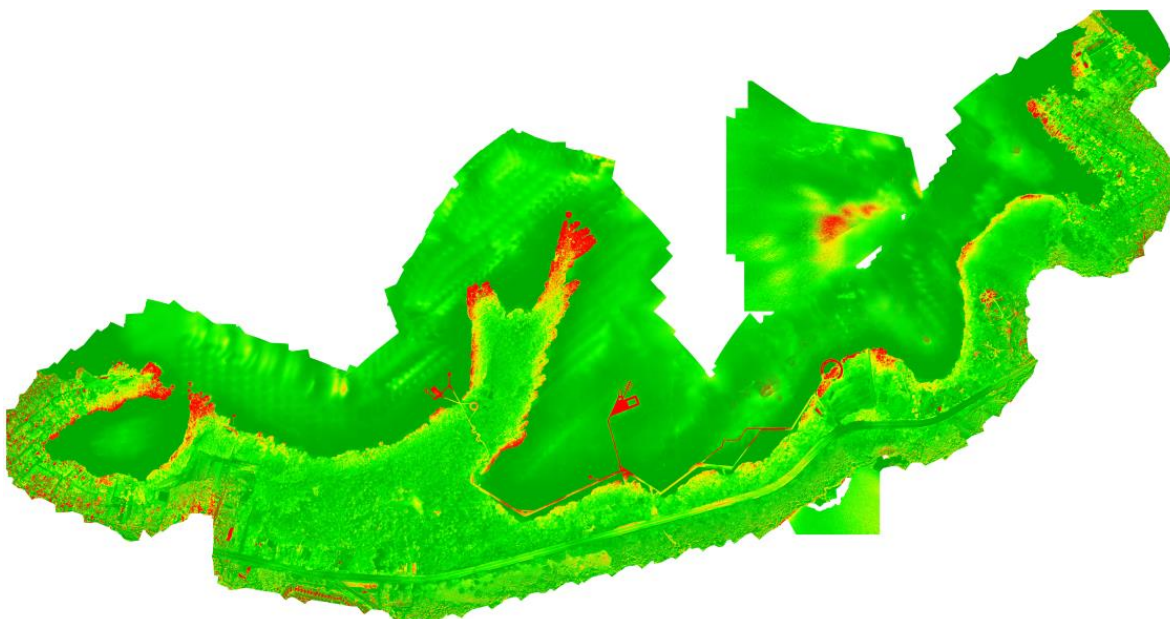
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- Mapas de Concentración de Sólidos Suspendedos Totales (mg/L) obtenido a través de Análisis de Regresión Múltiple (ARM).



- Mapas de Conteo de Cianobacterias (Individuos/L), obtenido a través de análisis de regresión múltiple (ARM).

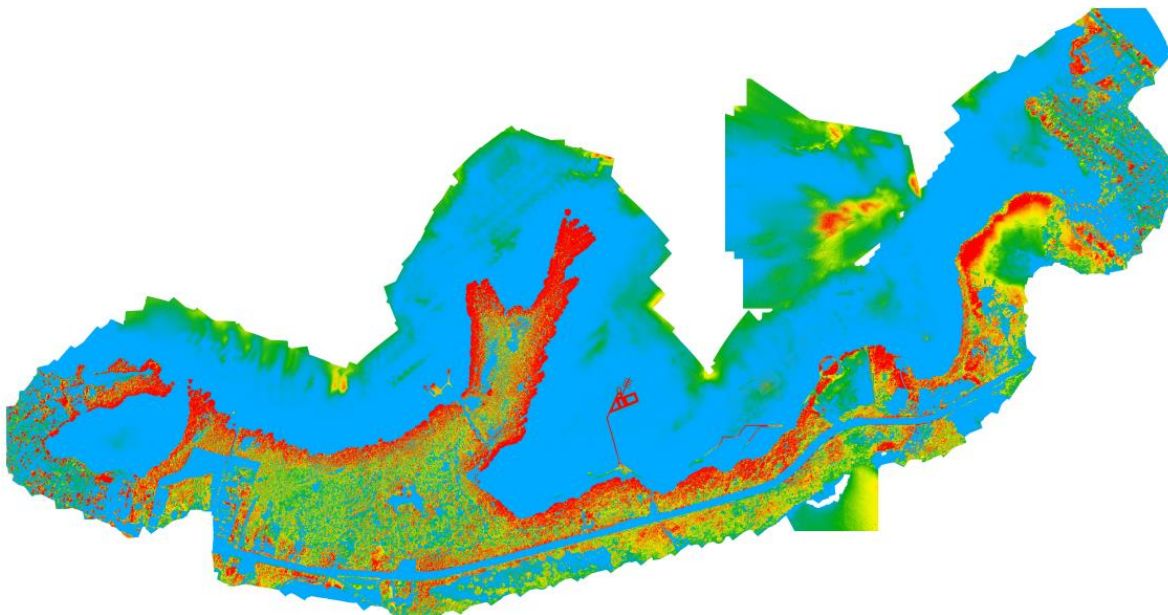


Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

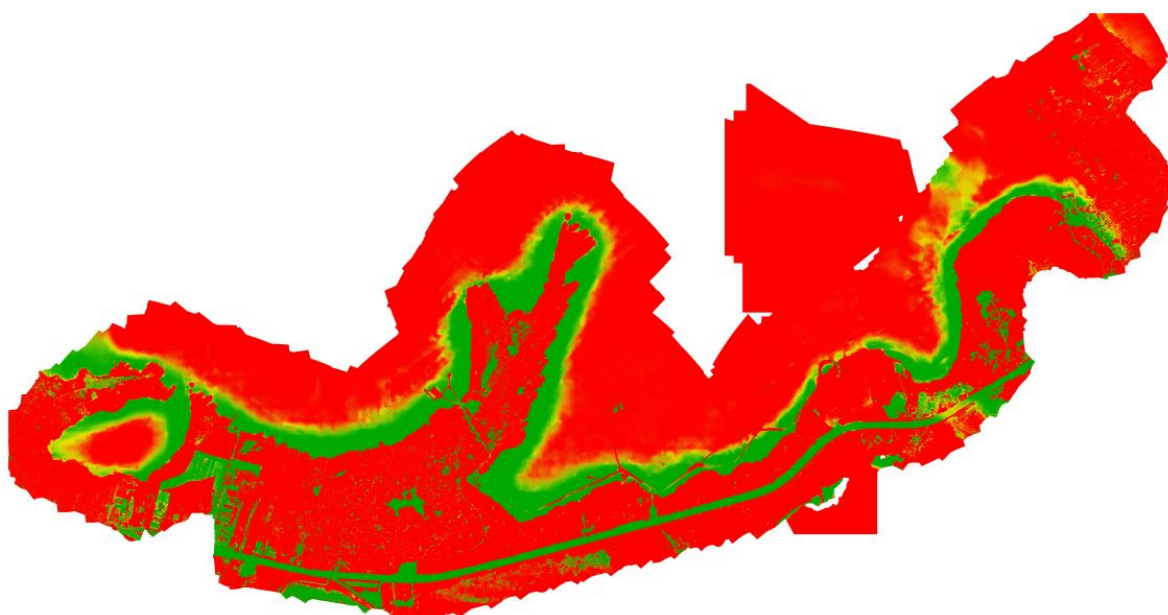
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

V. Mapas Especiales

- Mapas de Calidad de Aguas (Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos - ICOSUS)



- Mapa Normativo para Sólidos Suspendidos Totales con los Límites establecidos para los cuerpos de agua estudiados según la normativa vigente de la CRA.

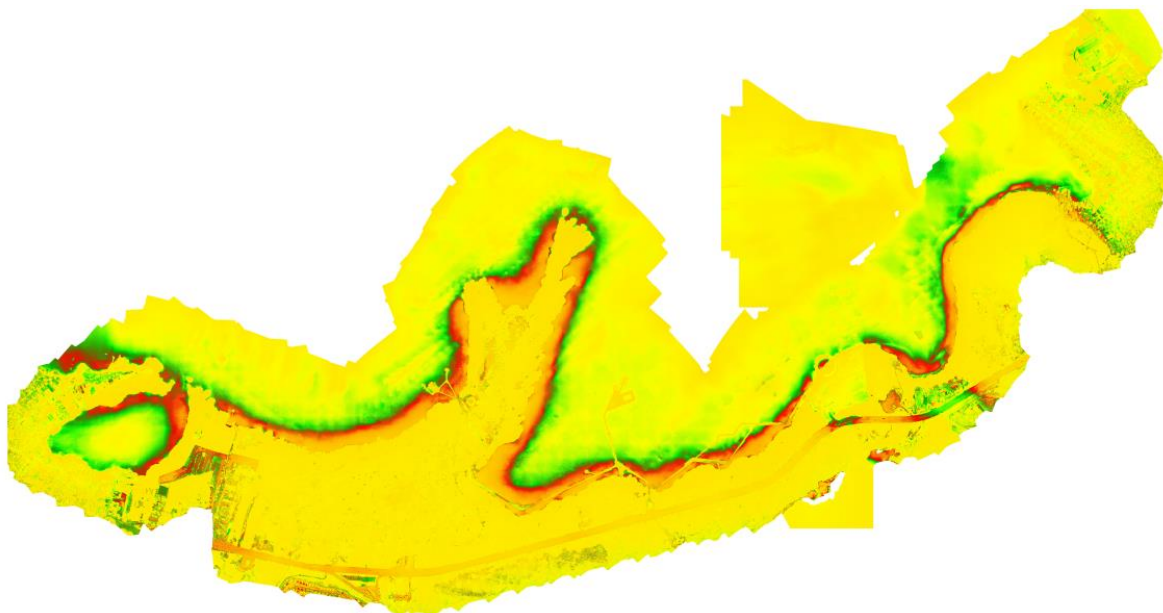


Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

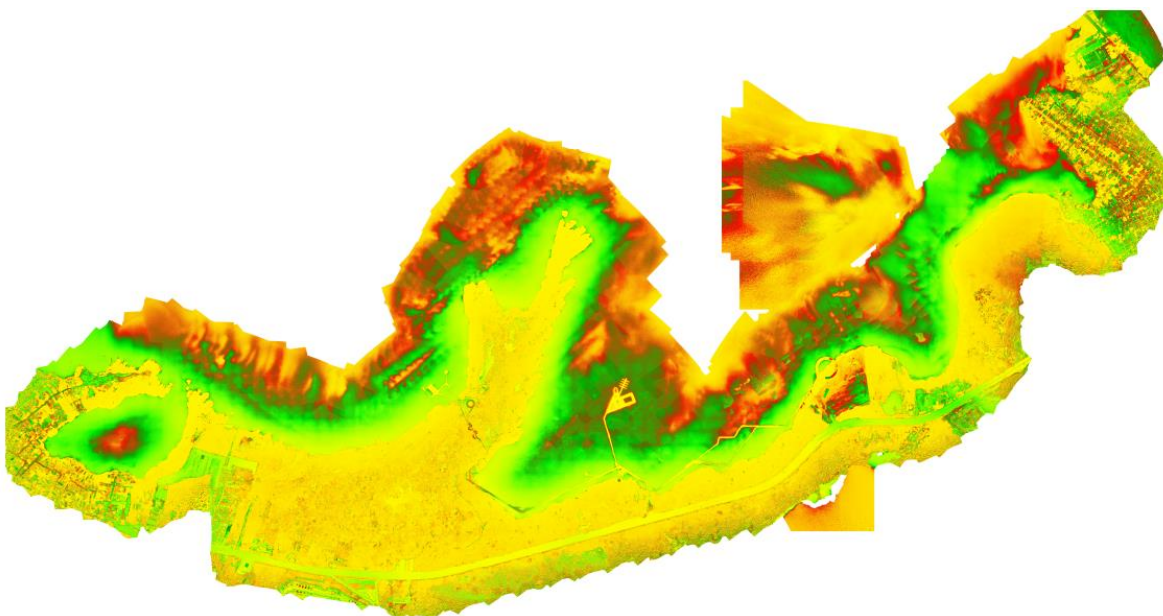
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

VI. Mapa de Índice de Identificación de Cianobacterias

- ICI 1 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción1)



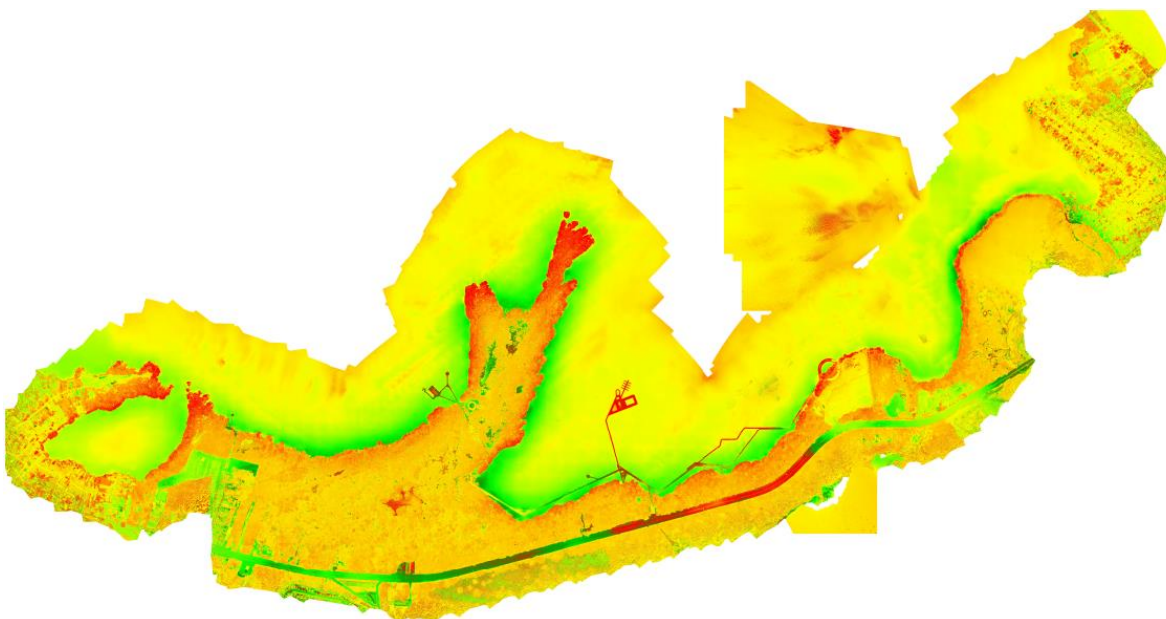
- ICI 2 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 2)



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

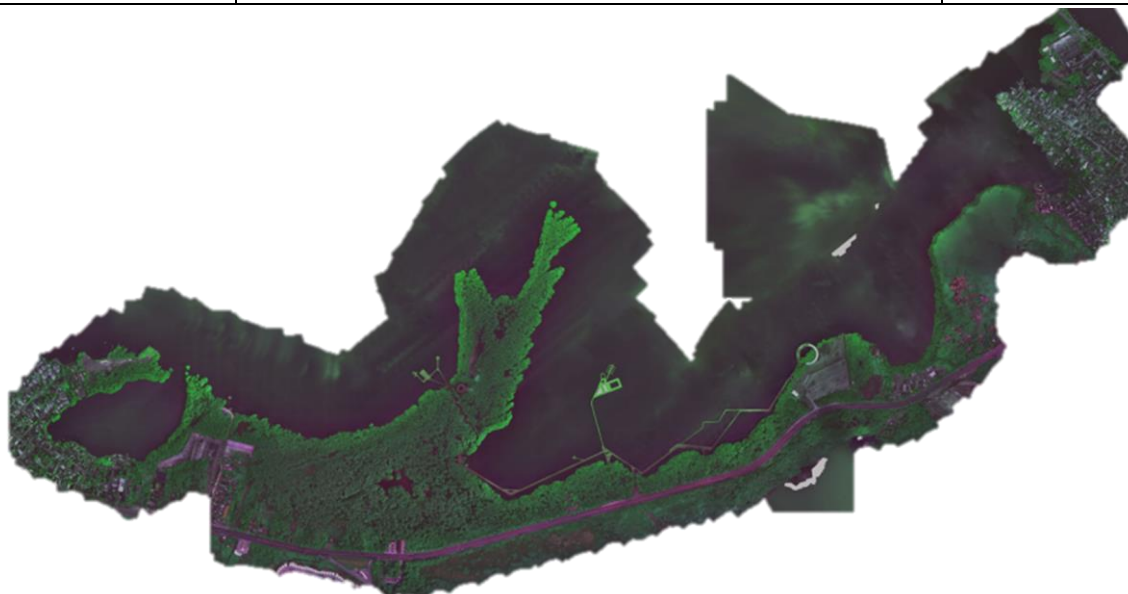
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- ICI 3 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 3)

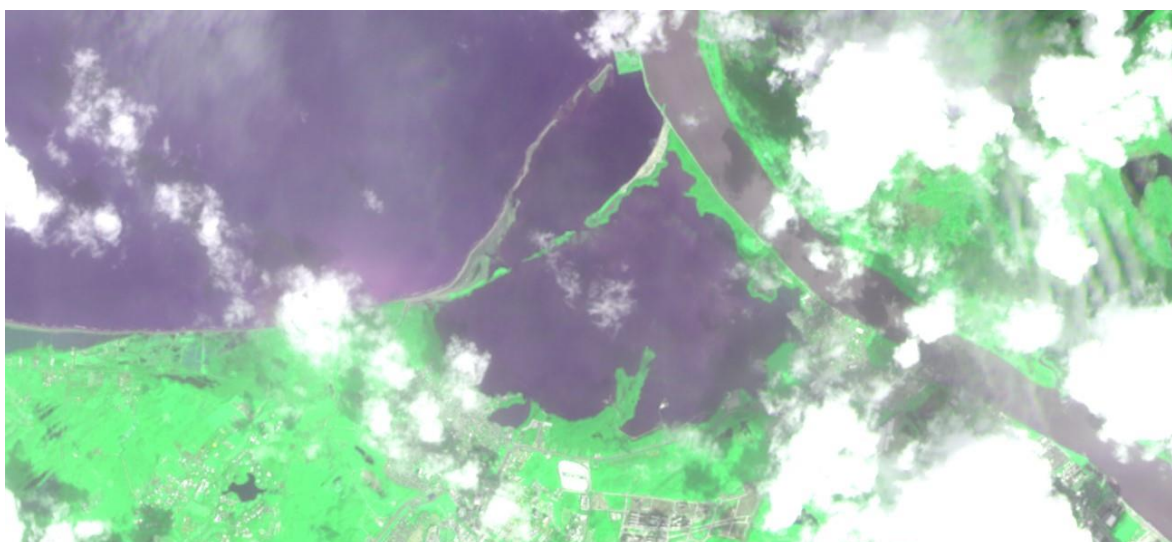


- Mapa de Composición RGB para identificación de Fitoplancton de Dron vs. Satélite (S-2A) en composiciones de Bandas Equivalentes.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Composición RGB231 obtenida con los ortomosaicos Multiespectrales elaborados a partir del Sensor del Mavic 3 Multispectral



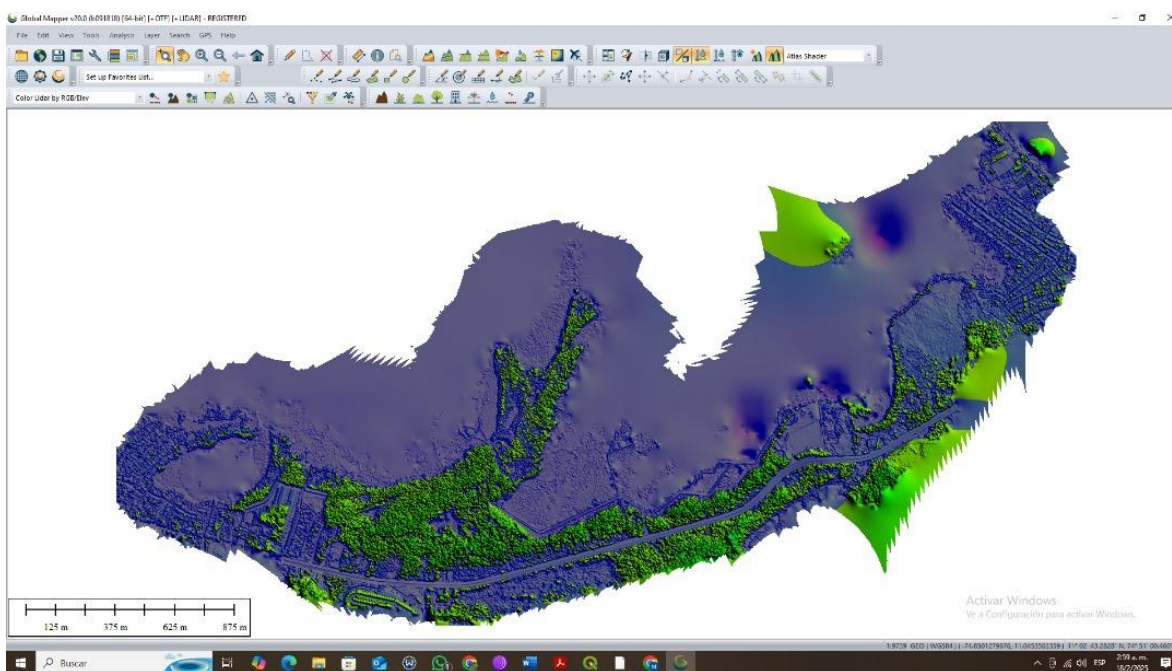
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

Composición RGB463 producto de la información proveniente del Satélite Sentinel 2, del Proyecto Copernicus captadas el 21 de Noviembre del 2024, mismo día de la campaña simultánea de vuelo y muestreo de aguas en el mencionado cuerpo.

VII. Mapa de Riesgos de Inundación

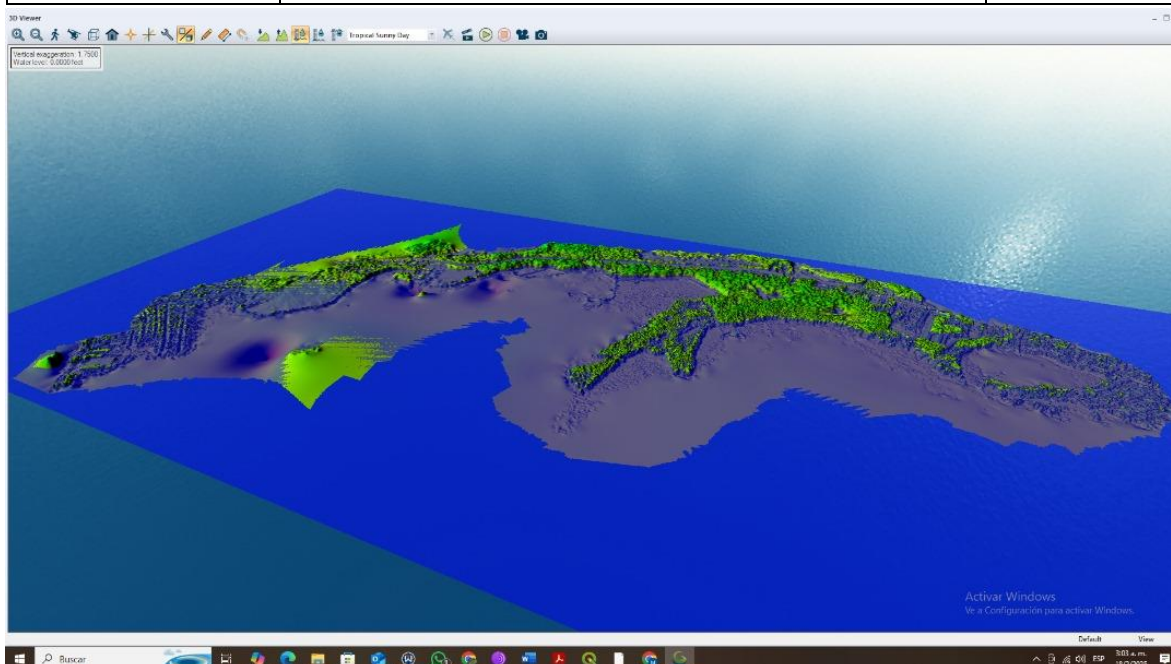
Basado en los niveles de marea y extremos históricos registrados.



Mapa de Inundación bajo un incremento de 10 pies (aprox. 3 metros). En esta visual se puede confirmar el estado inundable de toda la zona que rodea el manglar y el ecoparque.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



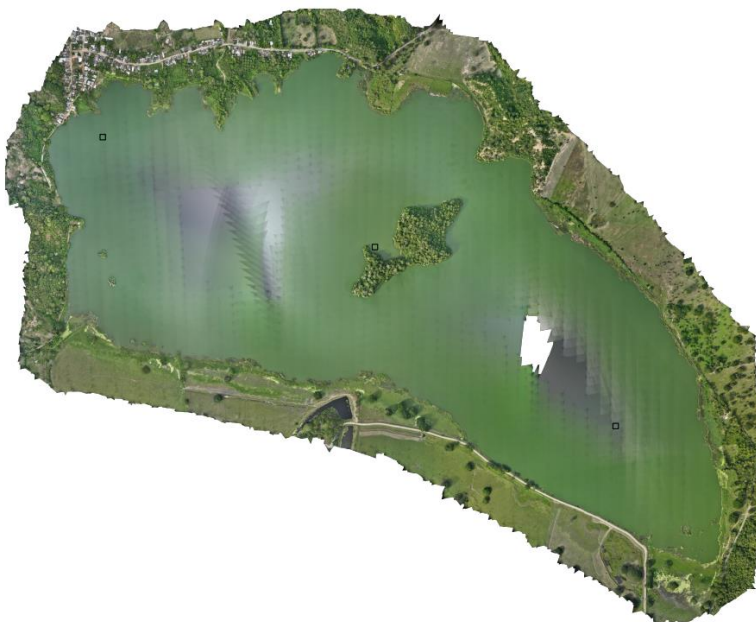
Visual 3D del mismo mapa mostrado anteriormente. Se observa cómo se inundaría la zona del Sector Las Flores (a la izquierda) y La Playa, así como la ensenada de Puerto Mosquito (estos últimos a la derecha).

CIÉNAGA DE TOCAGUAS

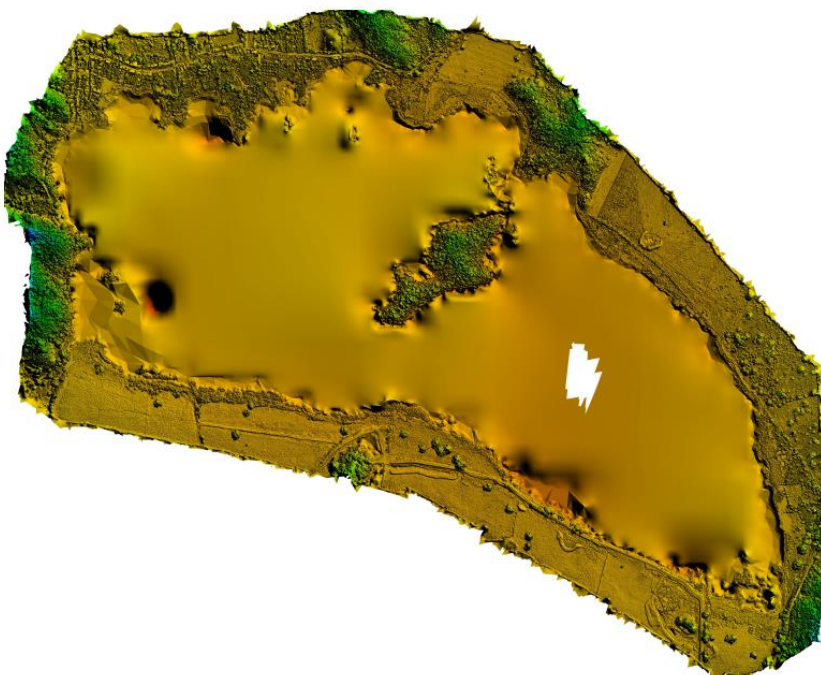
I. Modelos Digitales

- Modelo Digital Ortorectificado – MDO (Ortomosaico).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



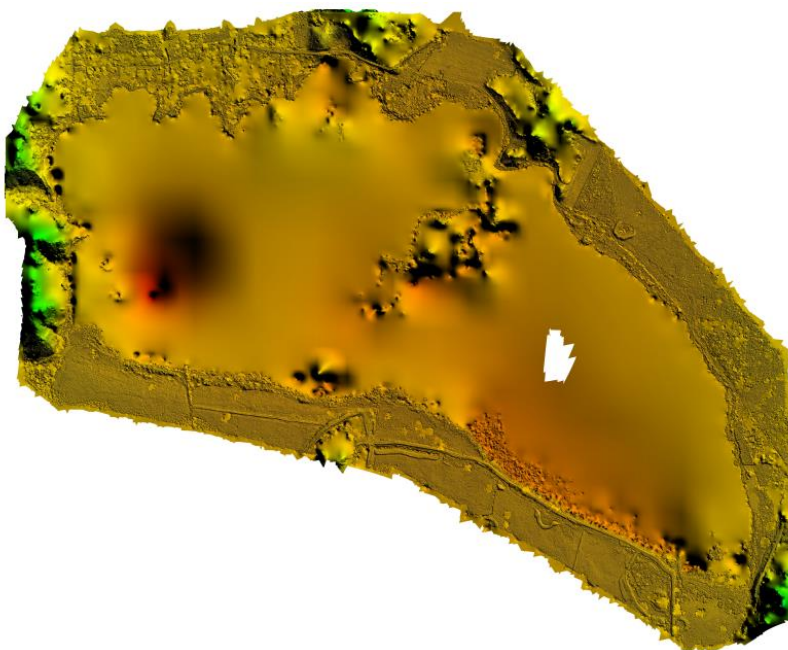
- Modelo Digital de Elevaciones – MDE



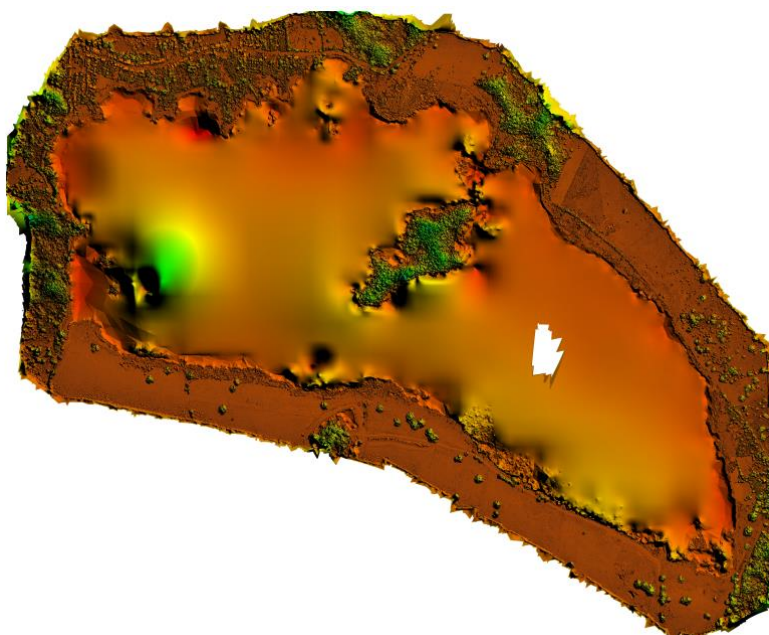
- Modelo Digital del Terreno – MDT

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



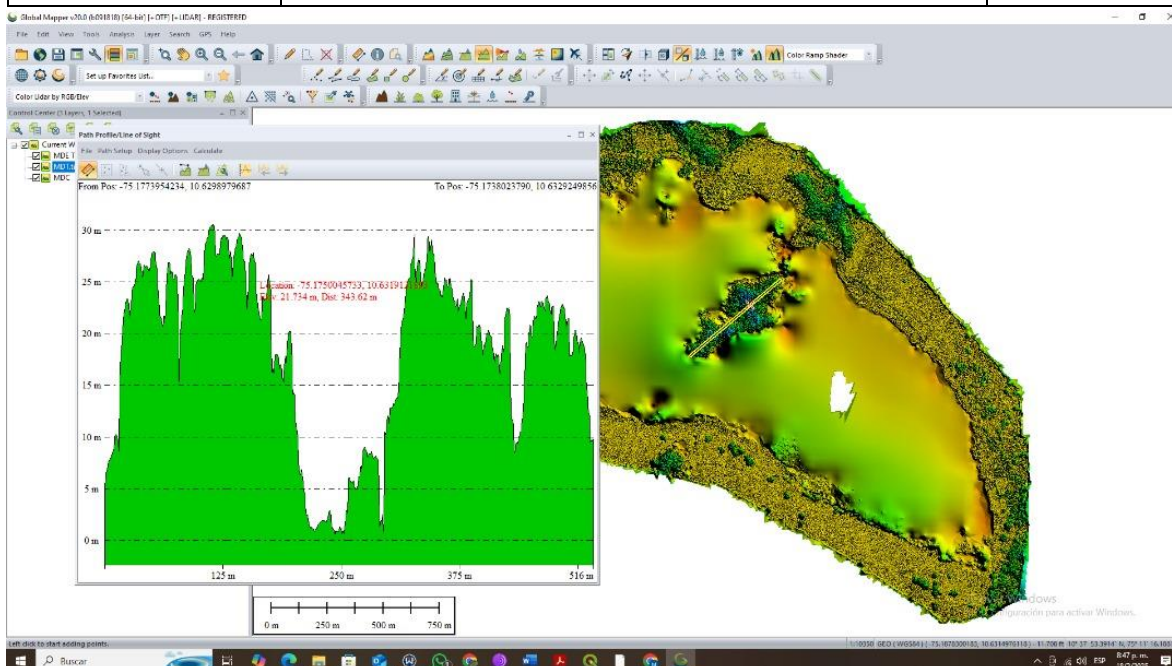
- Modelo Digital de Cobertura Forestal circundante a los cuerpos de agua – MDC



Como parte del análisis, en el presente caso, se han realizado dos perfiles de elevación de la cobertura forestal en el islote central de la Ciénaga,

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

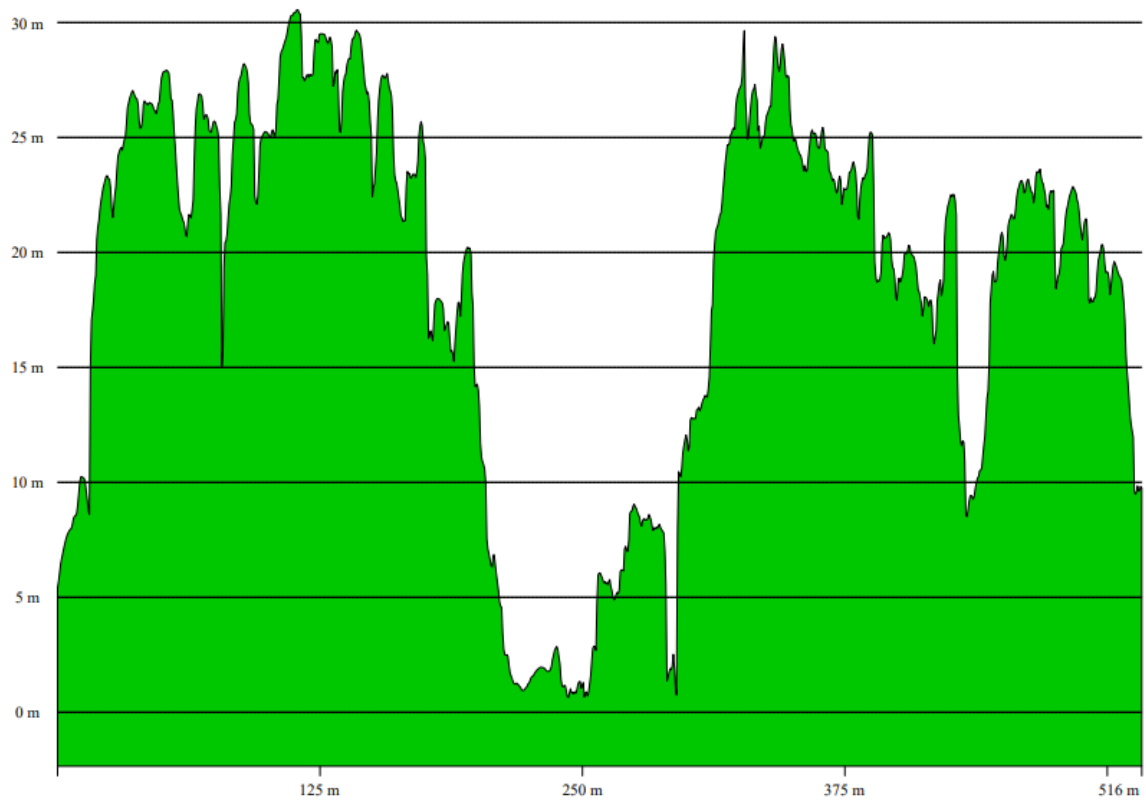


Ubicación del Trazo del Perfil de Elevación de la Cobertura Forestal longitudinal islote.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

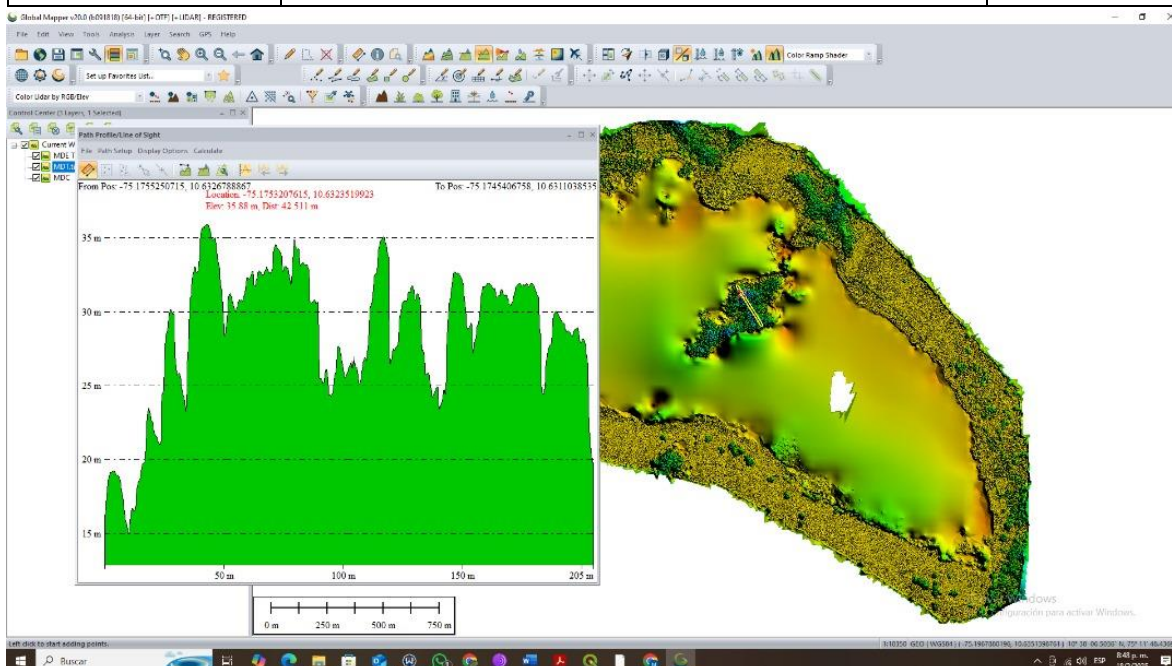
From Pos: -75.1773954234, 10.6298979687

To Pos: -75.1738023790, 10.6329249856



Perfil de Elevación de la Cobertura Forestal en Islote Central de la Ciénaga de Tocaguas. Corte Longitudinal.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



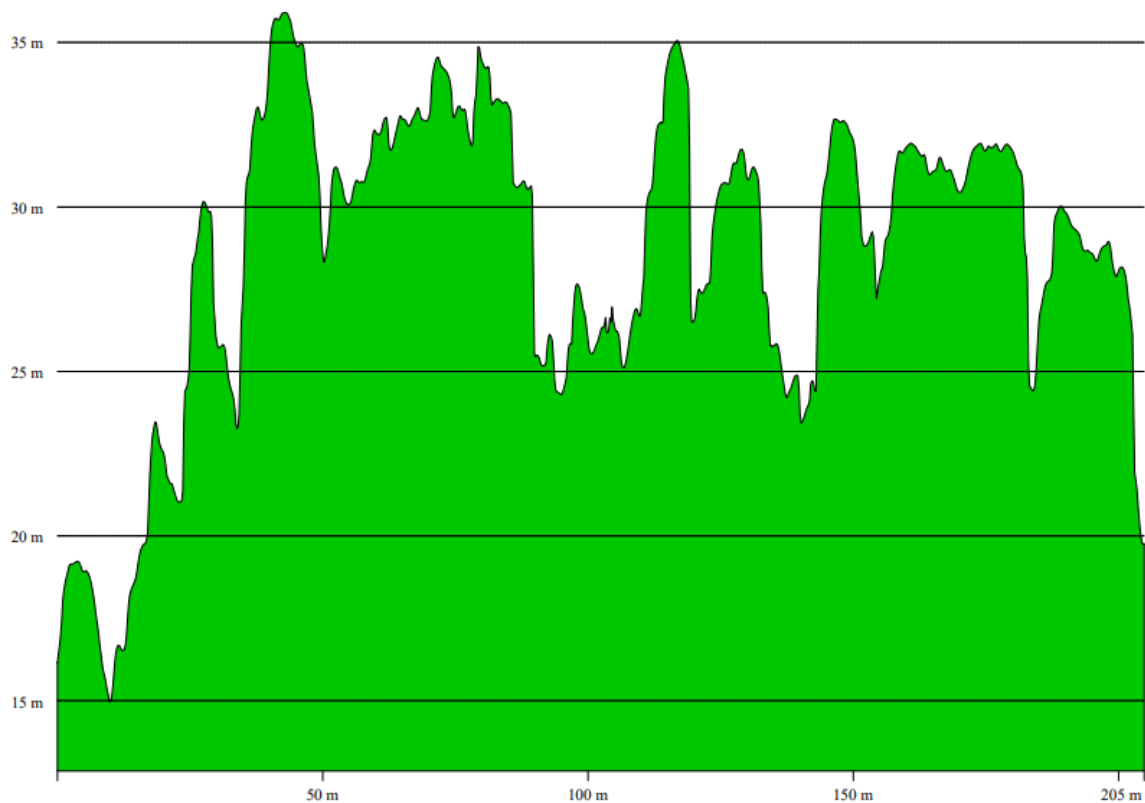
Trayectoria del Corte Transversal para el Perfil de Cobertura Forestal

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

From Pos: -75.1755250715, 10.6326788867

To Pos: -75.1745406758, 10.6311038535

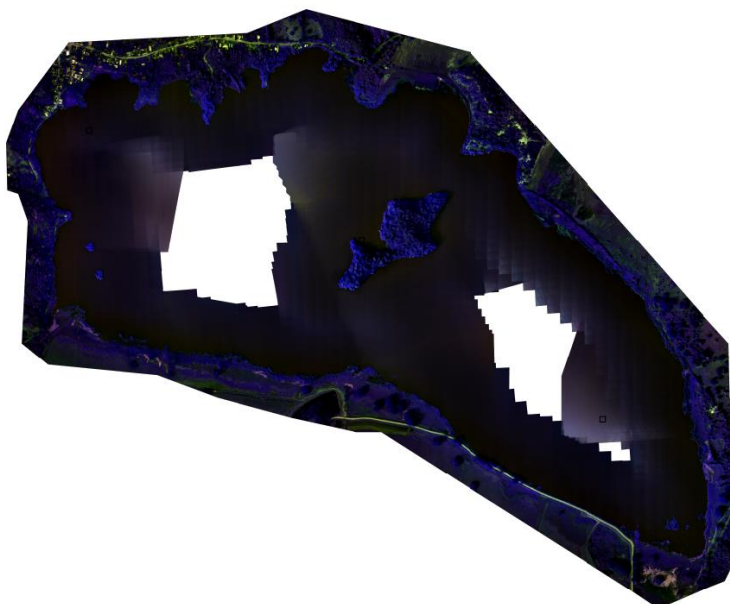


Corte Transversal de la Cobertura Forestal en el Islote de la Ciénaga de Tocaguas.

- Modelo Digital Multiespectral (mapa compuesto con las imágenes de todas las bandas en este orden: verde, rojo, borde-rojo e infrarrojo cercano)

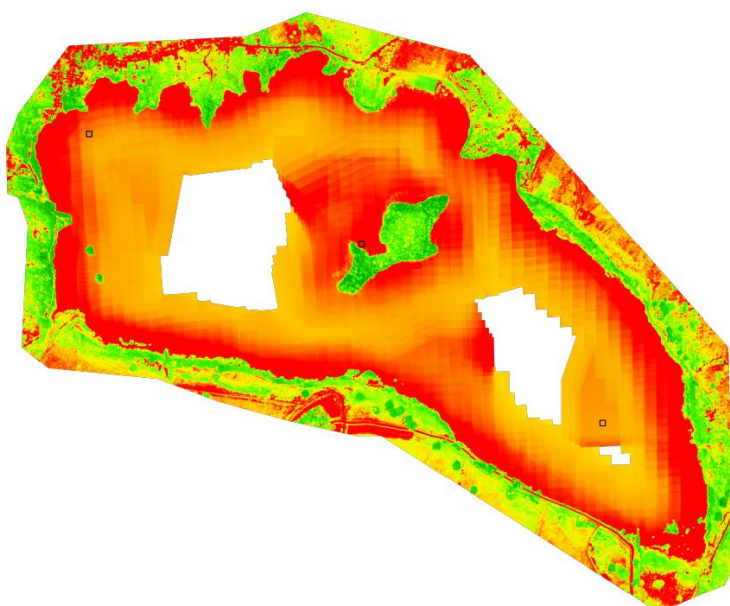
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



II. Índices Normalizados

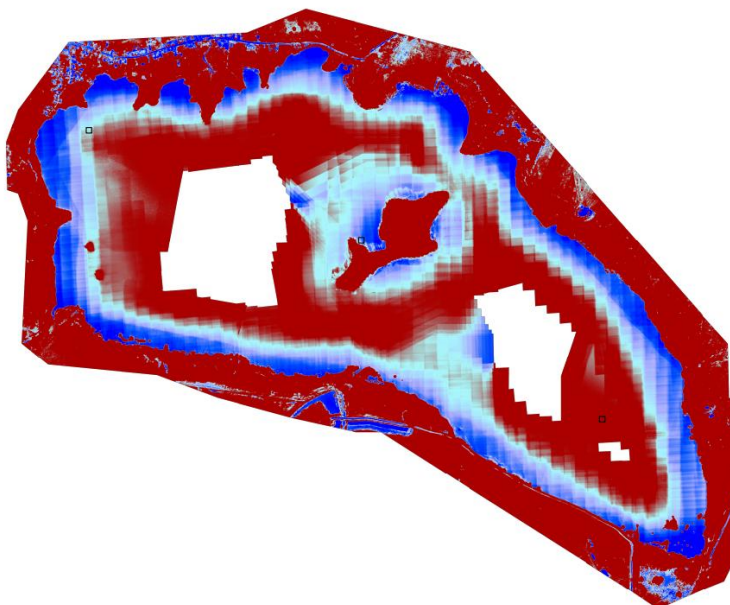
- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index



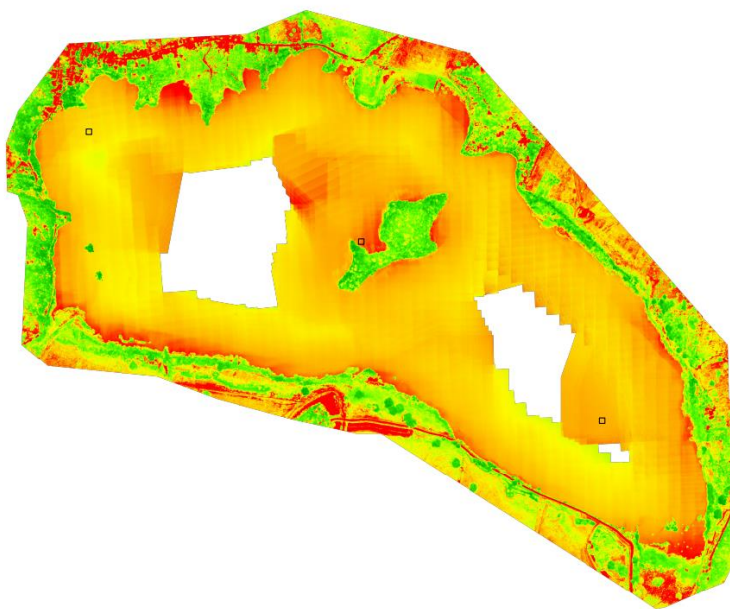
- NDWI – Normalized Difference Water Index (Índice Diferencial Normalizado de Agua)

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



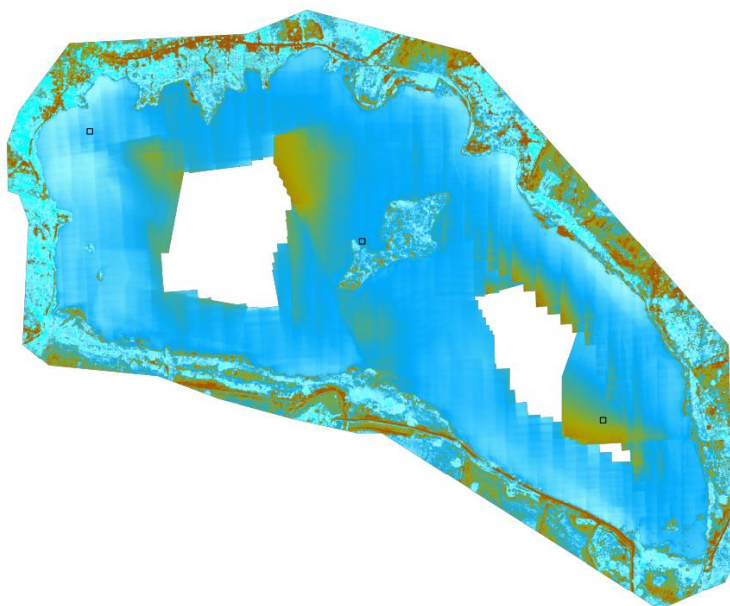
- NDCI – Normalized Difference Clorophyll Index (Índice Diferencial Normalizado de Clorofila)



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

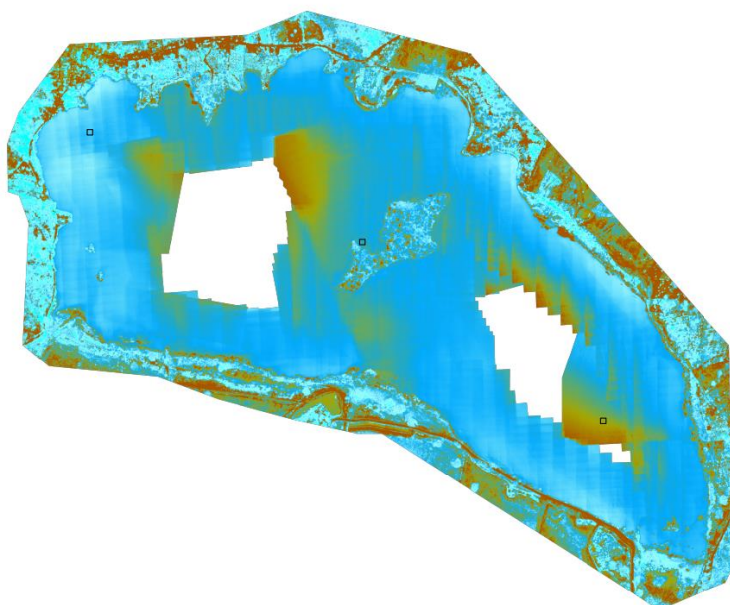
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- NDTI (Normalized Difference Turbid Index (Índice Diferencial Normalizado de Turbidez)



III. Índices Escalables

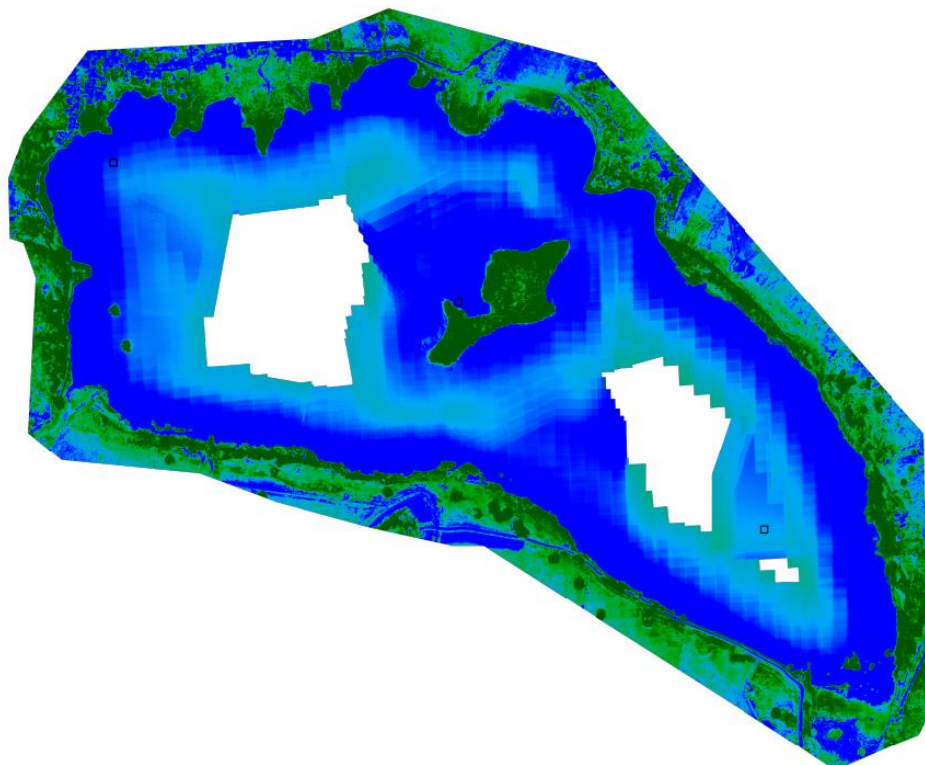
- TSM – Total Suspended Matter (Materia Total Suspendida)



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

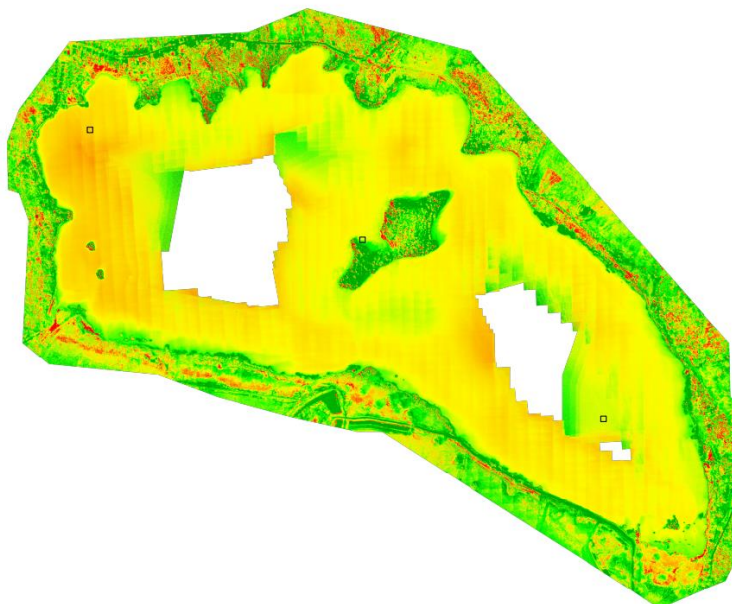
- CMRI - Combined Mangrove Recognition Index (Índice Combinado para Reconocimiento de Manglar)



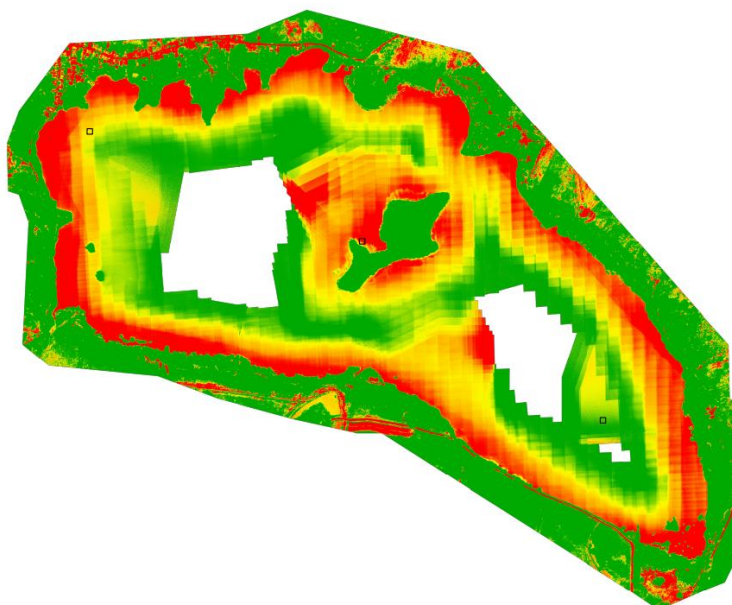
I. Mapas-Productos de Análisis Geoestadístico

- Mapas de Concentración de Sólidos Suspendedos Totales (mg/L) obtenido a través de Análisis de Regresión Múltiple (ARM).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- Mapas de Conteo de Cianobacterias (Individuos/L), obtenido a través de análisis de regresión múltiple.

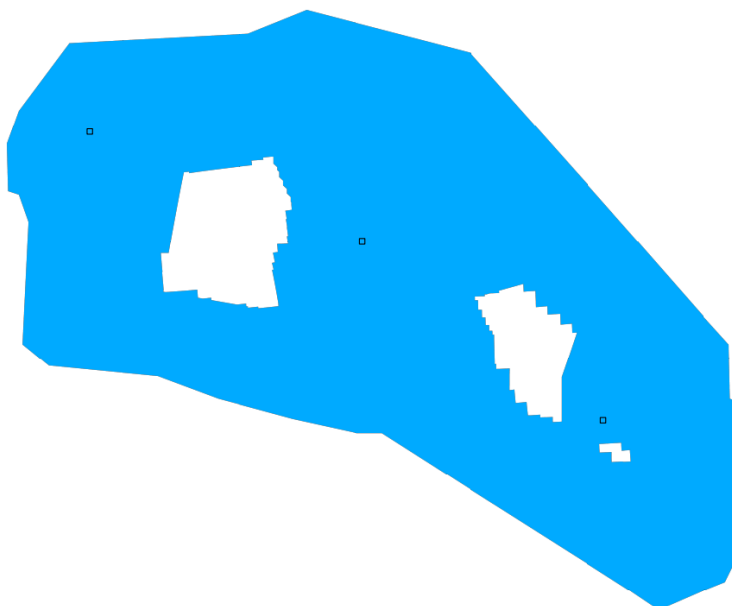


II. Mapas Especiales

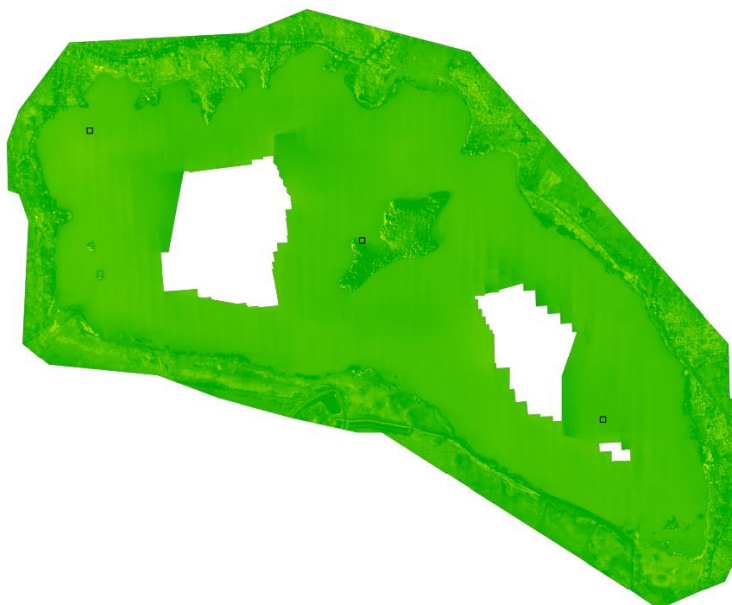
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

- Mapas de Calidad de Aguas (ICA de Sólidos Suspendidos Totales - ICOSUS)



- Mapa Normativo para Sólidos Suspendidos Totales con los Límites establecidos para los cuerpos de agua estudiados según la normativa vigente de la CRA.

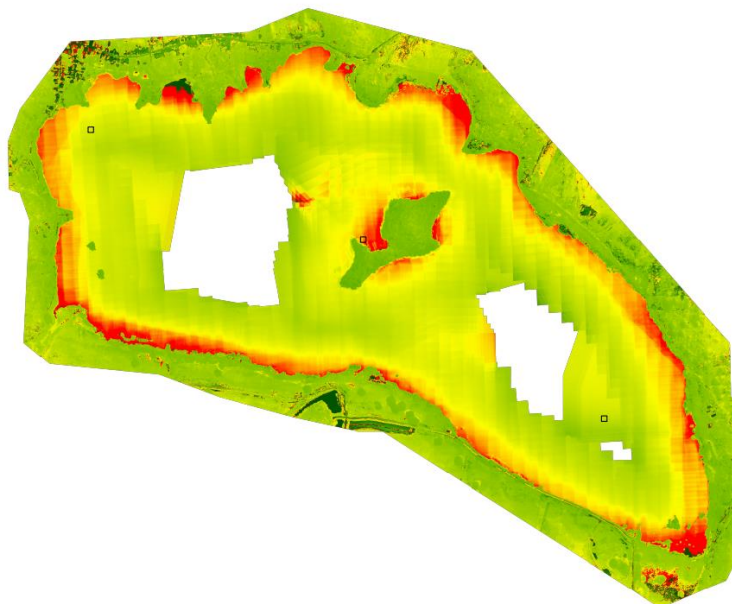


Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

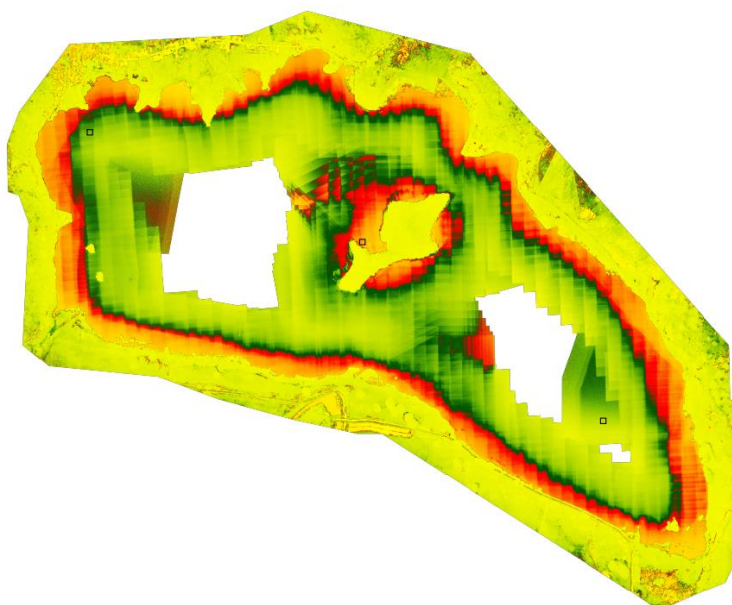
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

III. Mapa de Índice de Identificación de Cianobacterias

- ICI 1 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción1)



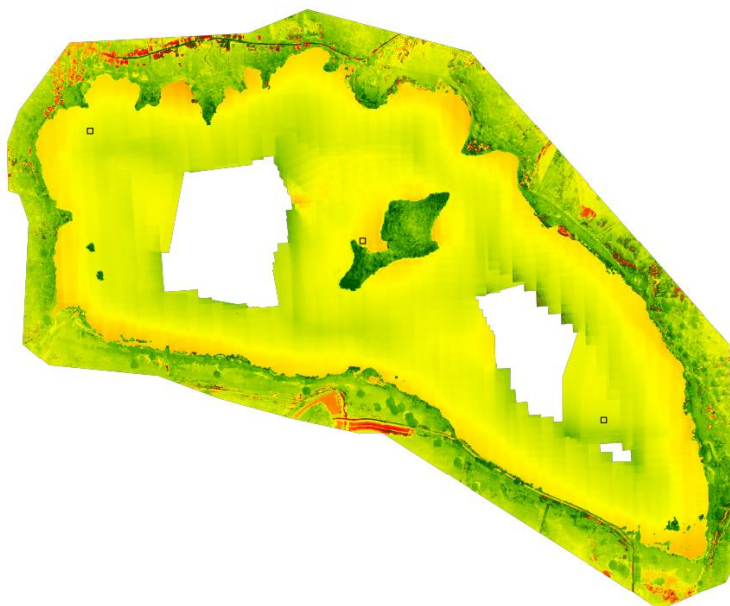
- ICI 2 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 2)



Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

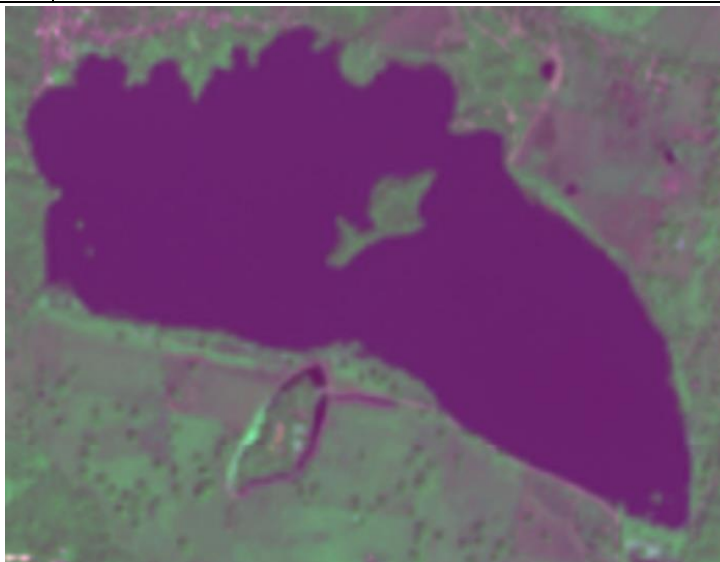
- ICI 3 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 3)



- Mapa de Composición RGB para identificación de Fitoplancton de Dron vs. Satélite (S-2A) en composiciones de Bandas Equivalentes.

Composición RGB231 obtenida con los ortomosaicos Multiespectrales elaborados a partir del Sensor del Mavic 3 Multiespectral.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

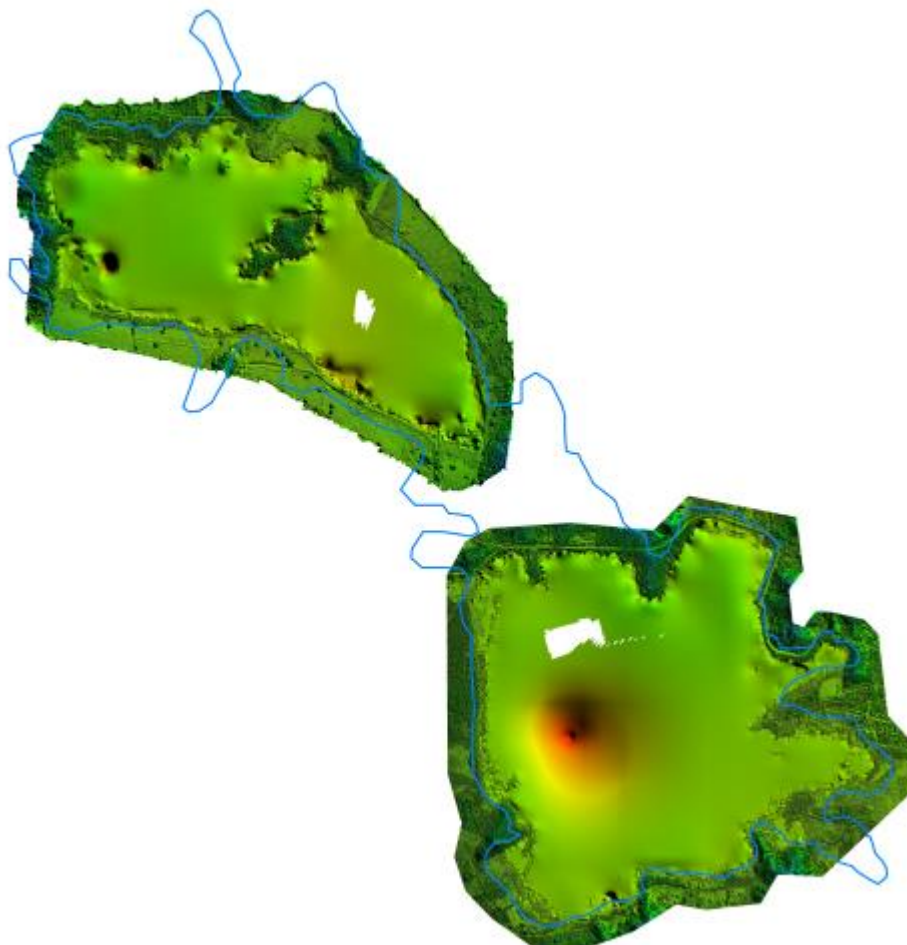


Composición RGB463 producto de la información proveniente del Satélite Sentinel 2, del Proyecto Copernicus, captadas el 11 de Diciembre del 2024, mismo día de la campaña simultánea de vuelo y muestreo de aguas en el mencionado cuerpo.

IV. Mapa de Riesgos de Inundación

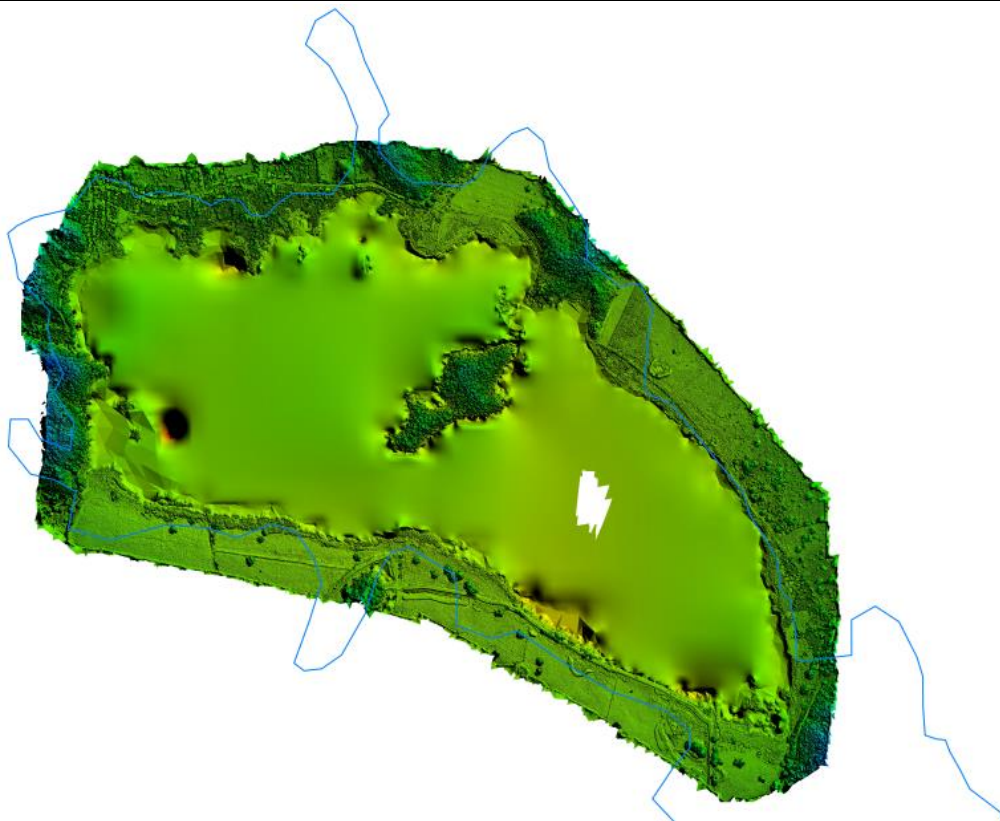
Basado en los niveles máximos registrados durante la oleada invernal del Fenómeno La Niña del año 2011.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



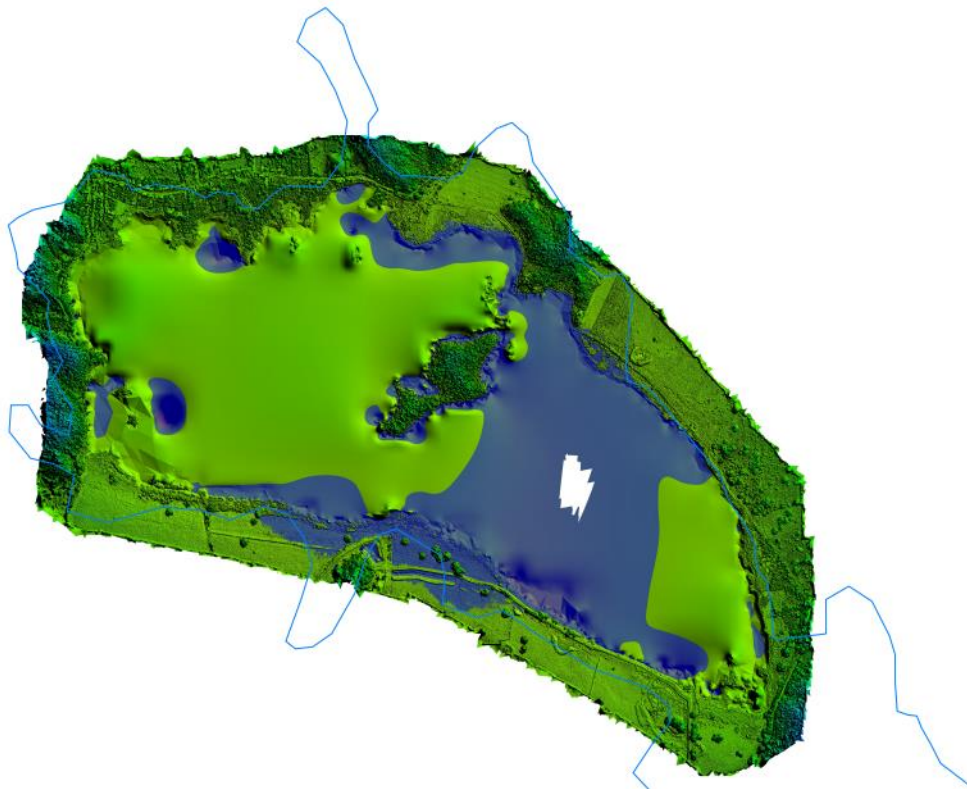
Perfiles de Elevación de las Ciénagas de Tocaguas y Luruaco, con el nivel de inundación de la ola invernal del 2011 (Evento La Niña) mostrado en azul claro.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



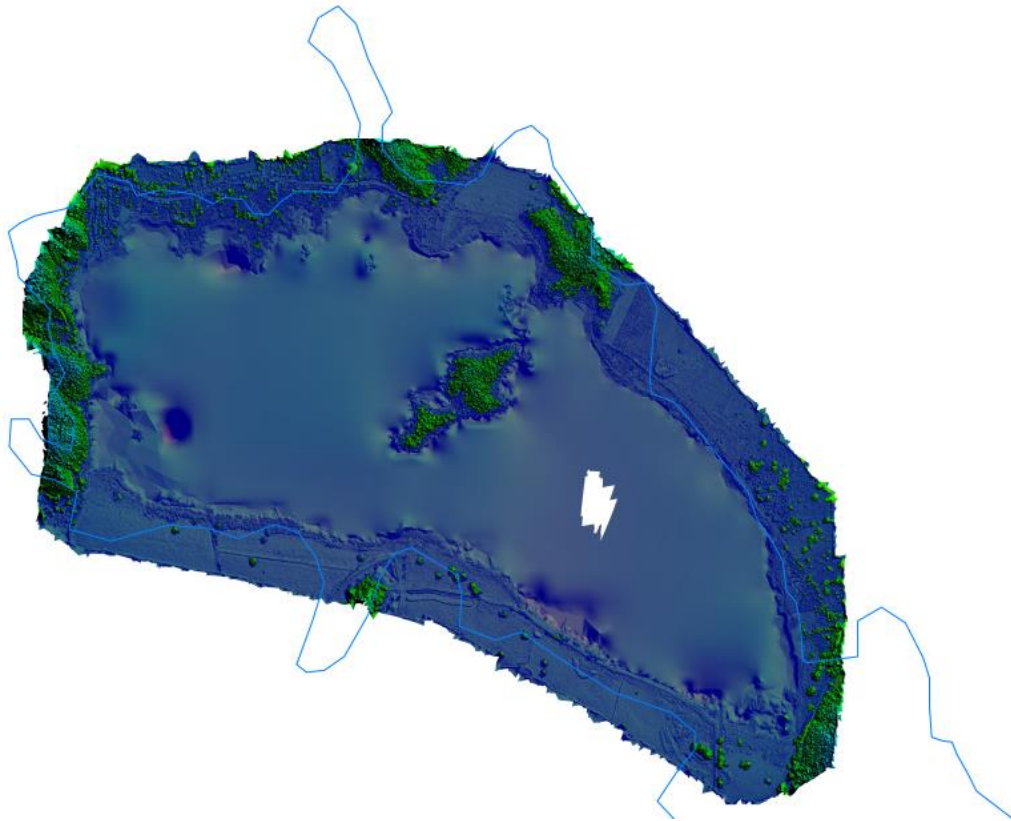
Límite de Inundación del Evento La Niña – Ola Invernal 2011 y Modelo Digital de Elevaciones.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



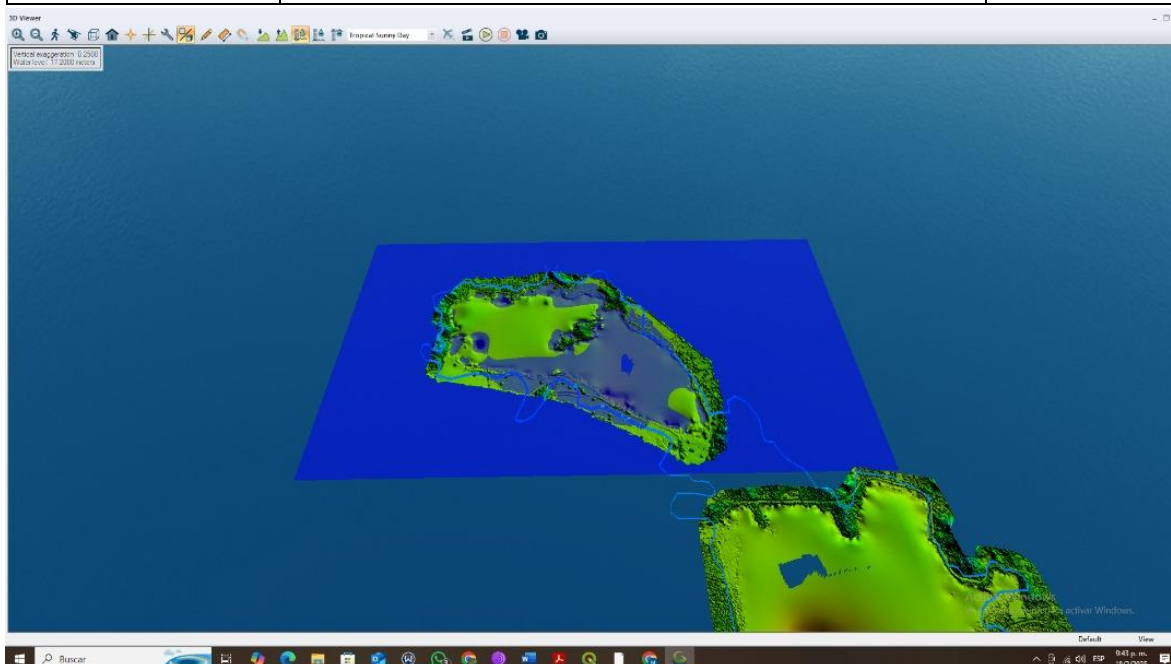
Elevación actual de la línea de inundación del espejo de agua en la Ciénaga de Tocaguas. Las áreas sin inundar corresponden a errores de interpolación del software fotogramétrico en el área del espejo de agua.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Condición Límite de Inundación para la Ciénaga de Tocaguas. A 17,2 metros de Elevación (1,2 metros por encima del nivel o elevación actual del espejo de agua) se verían afectados los poblados y demás elementos presentes en la ribera del cuerpo de agua. Esta simulación se realiza en función de los niveles teóricamente alcanzados según los registros cartográficos del IGAC.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



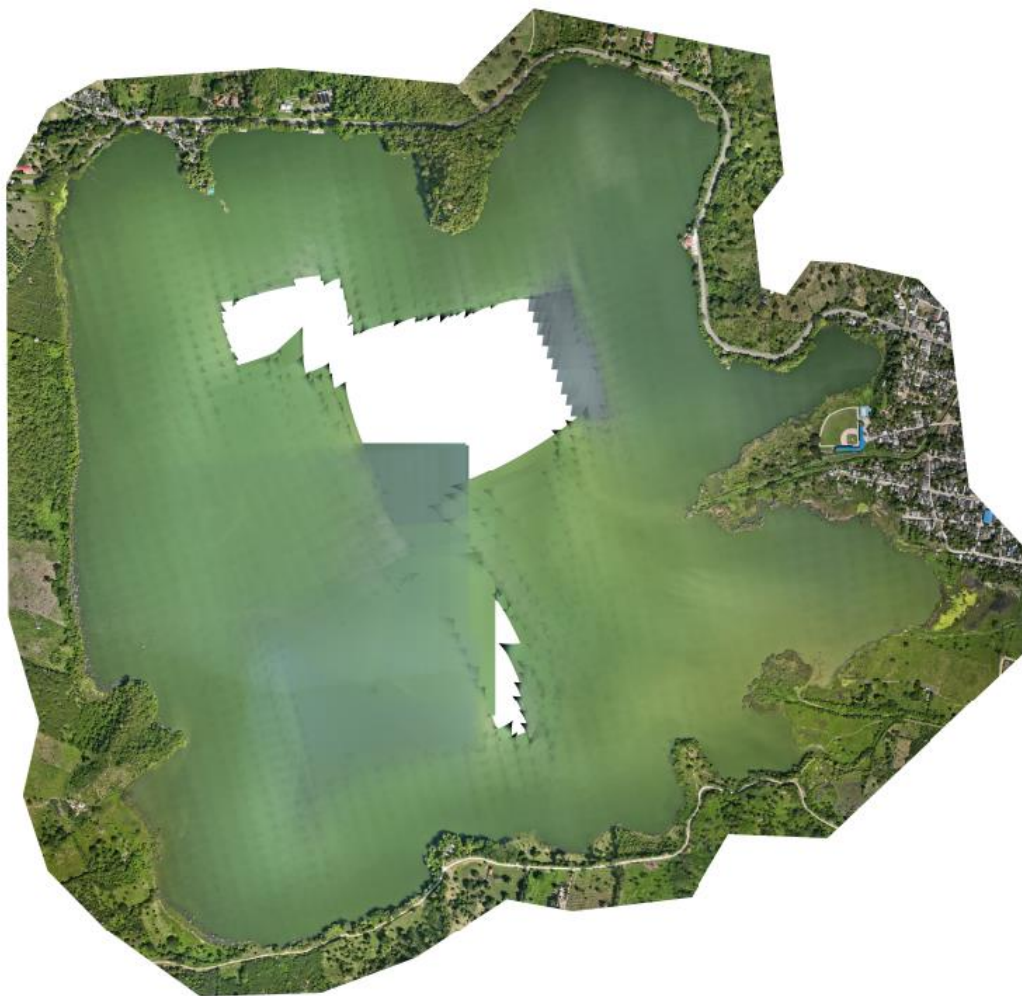
Simulación de Inundación en Ciénaga de Tocaguas. A los 17,2 metros del nivel de agua (1,2 metros por encima de la cota levantada de 16 metros de elevación actual) ya se afectan los poblados en las riberas del cuerpo de agua.

CIÉNAGA DE LURUACO

I. Modelos Digitales

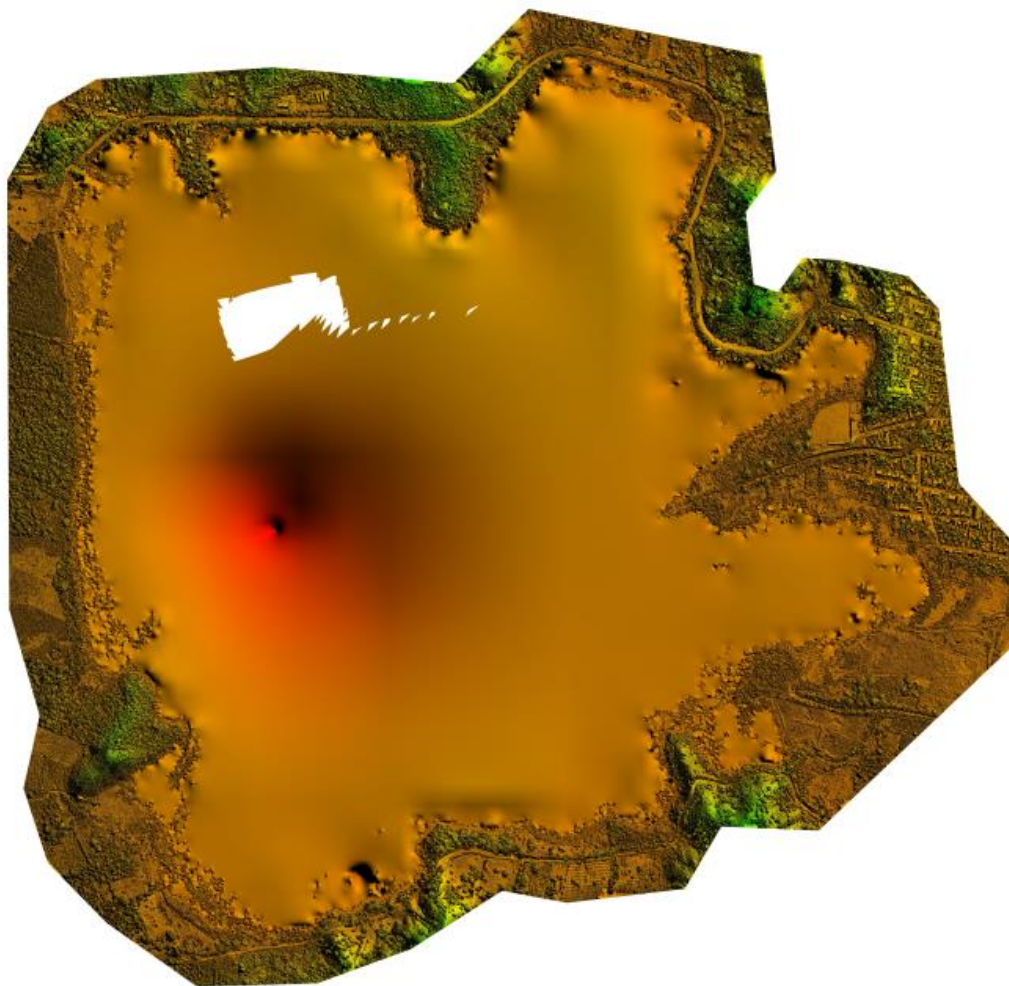
- Modelo Digital Ortorectificado – MDO (Ortomosaico).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



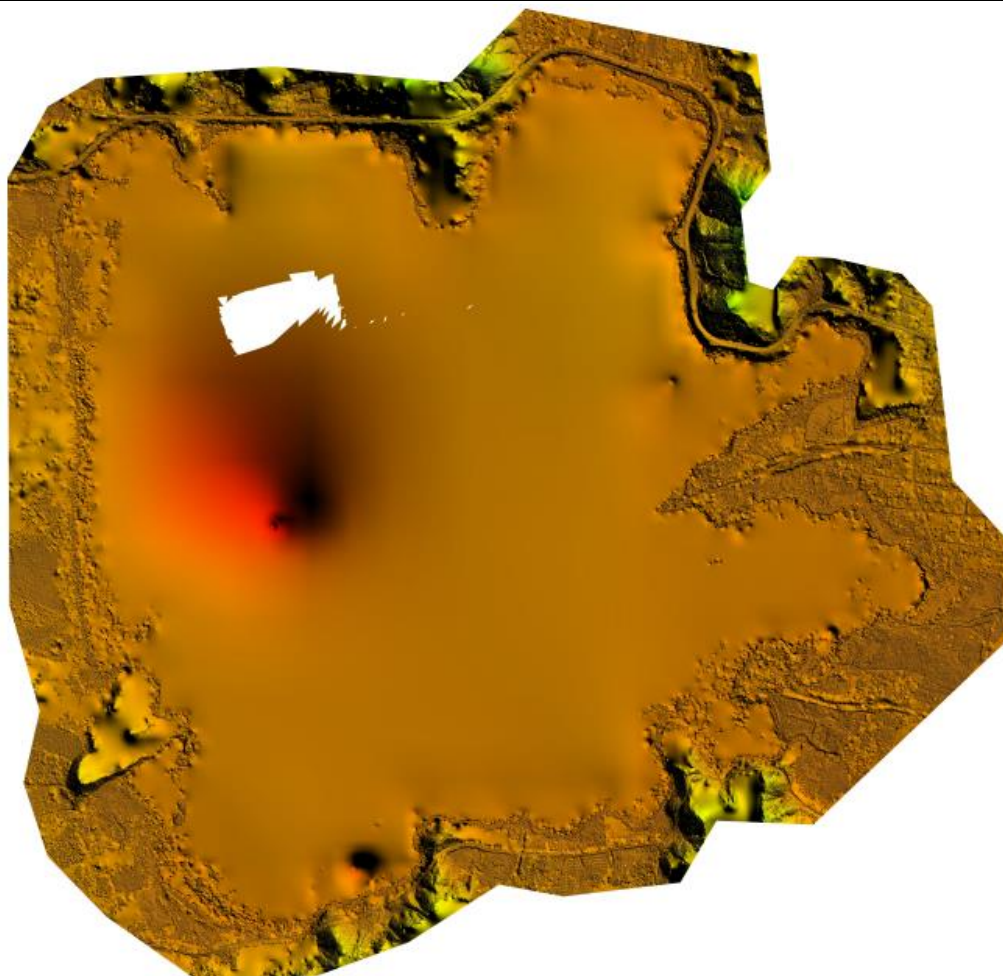
- Modelo Digital de Elevaciones – MDE

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



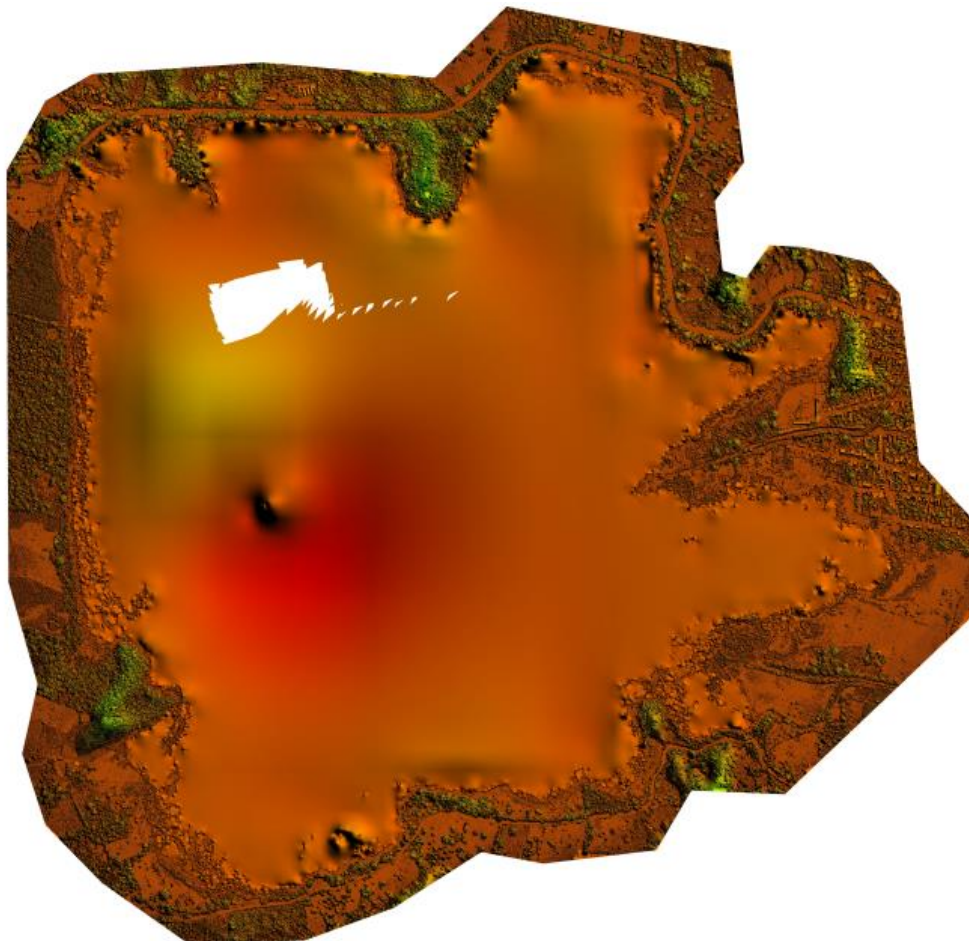
- Modelo Digital del Terreno – MDT

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



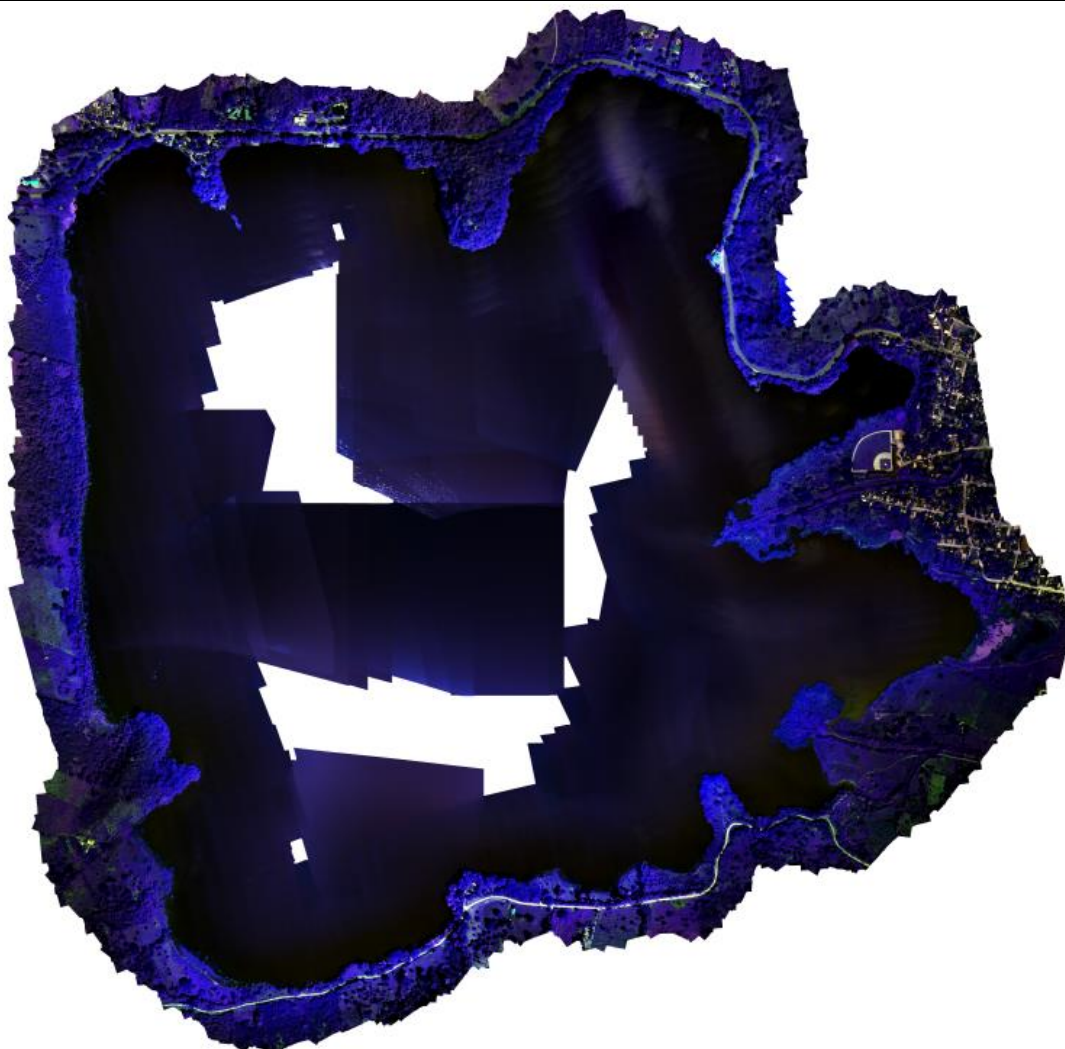
- Modelo Digital de Cobertura Forestal circundante a los cuerpos de agua – MDC

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- Modelo Digital Multiespectral (mapa compuesto con las imágenes de todas las bandas en este orden: verde, rojo, borde-rojo e infrarrojo cercano)

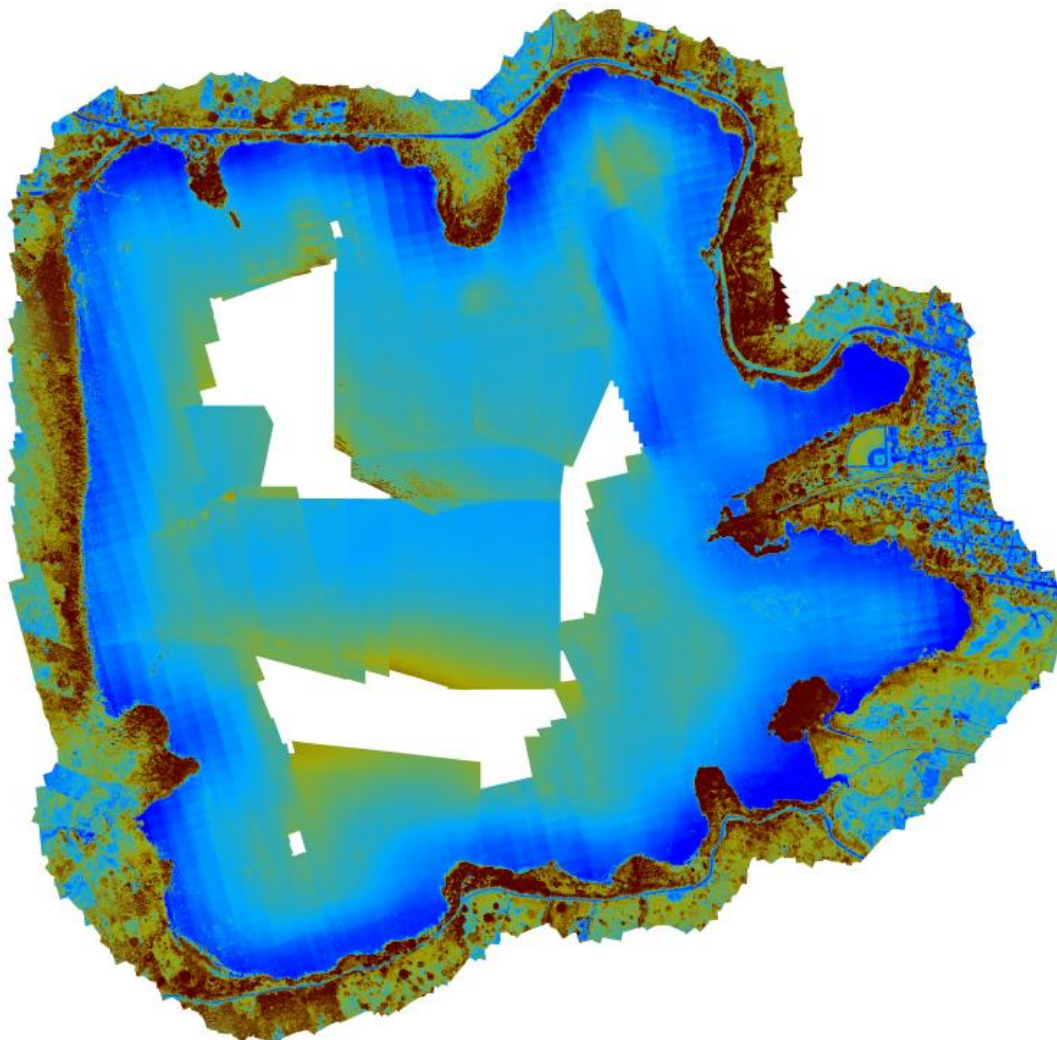
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



II. Índices Normalizados

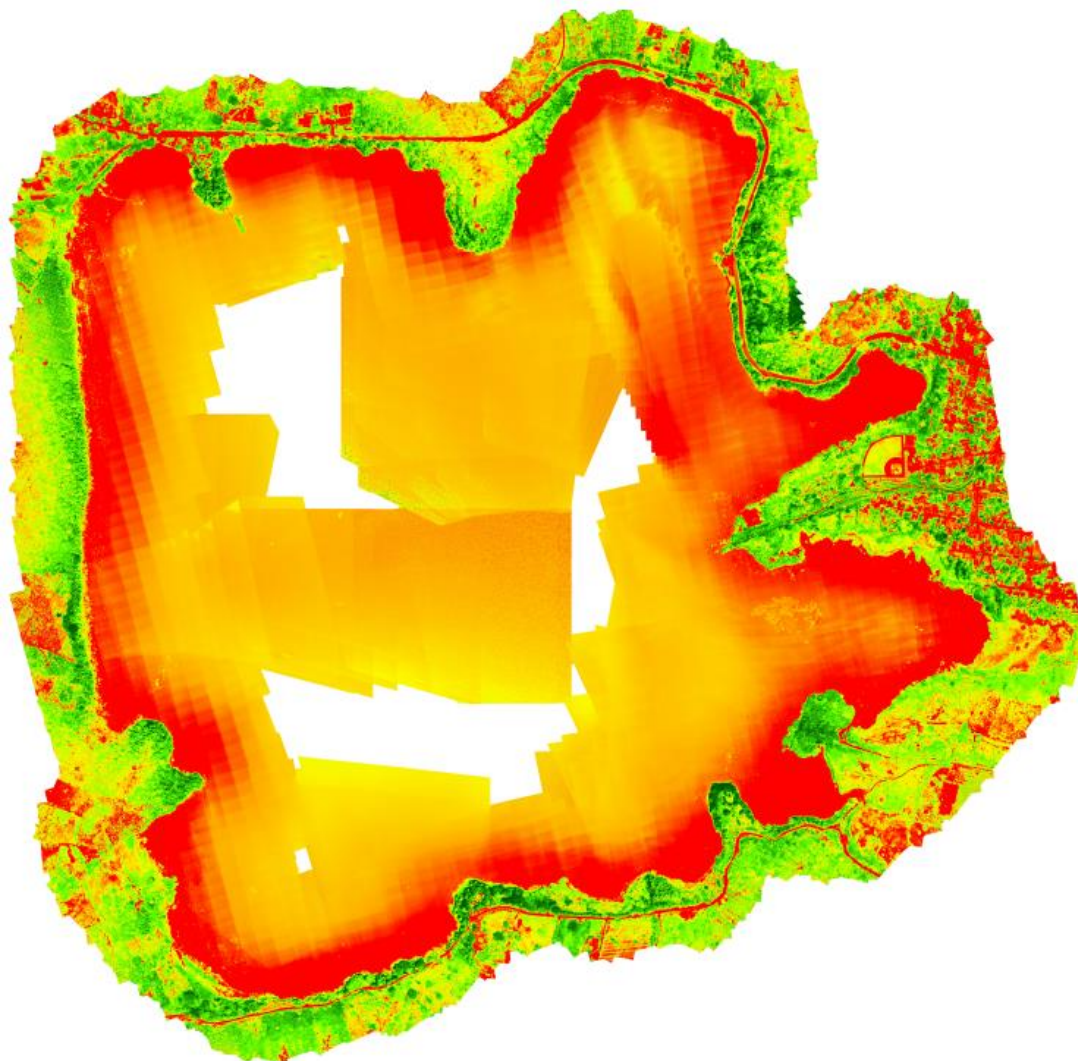
- NDWI – Normalized Difference Water Index (Índice Diferencial Normalizado de Agua)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación)

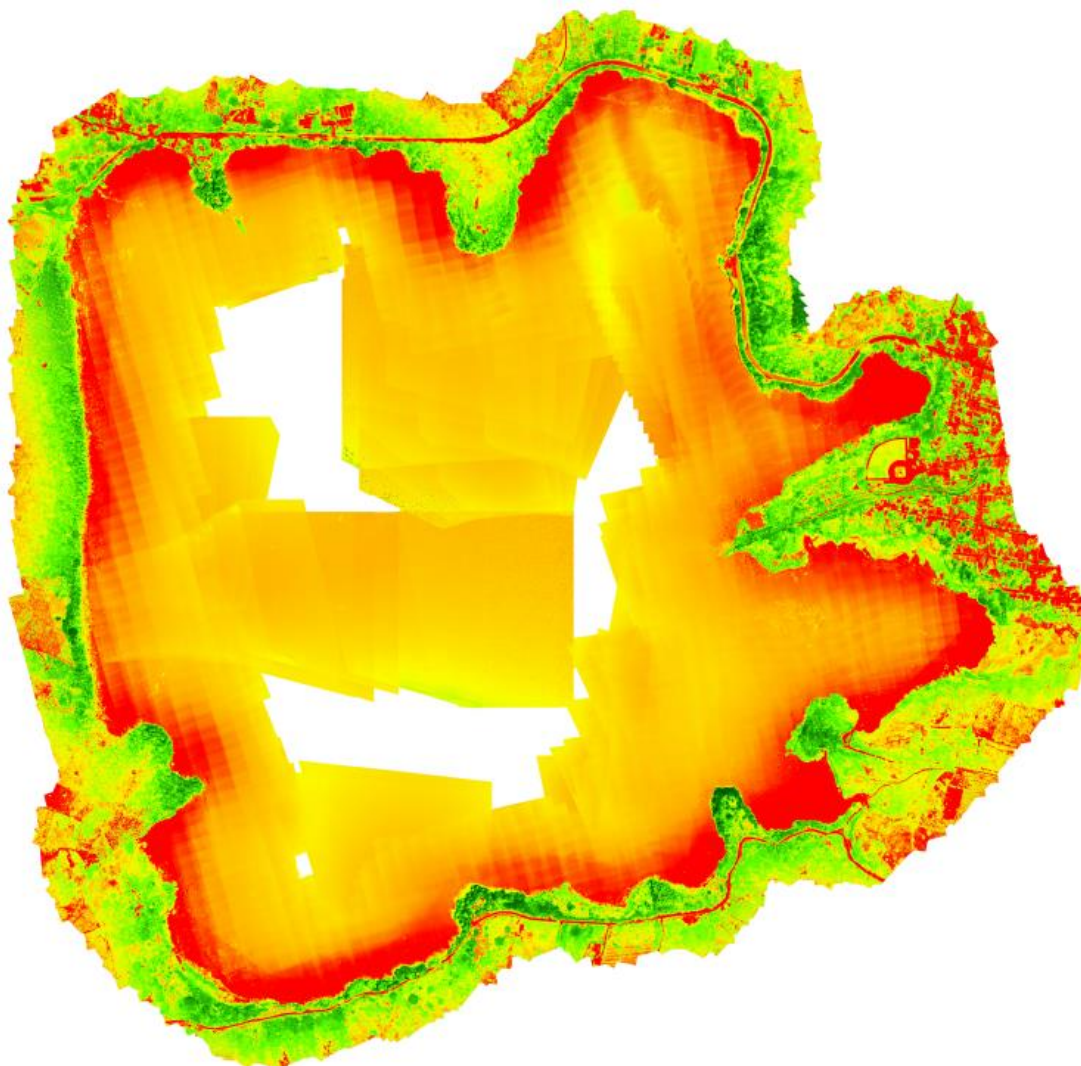
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- NDCI – Normalized Difference Chlorophyll Index (Índice Diferencial Normalizado de Clorofila)

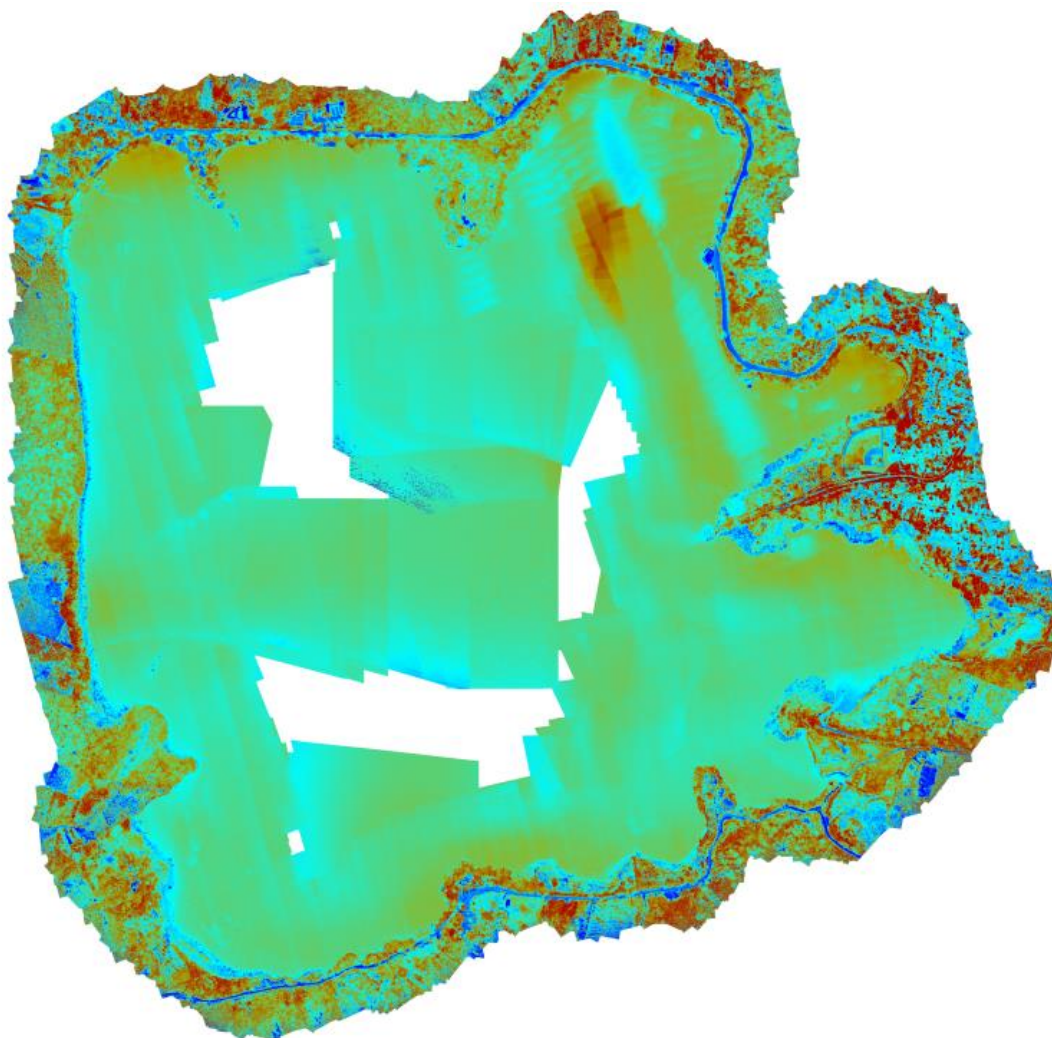
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- NDTI (Normalized Difference Turbid Index (Índice Diferencial Normalizado de Turbidez)

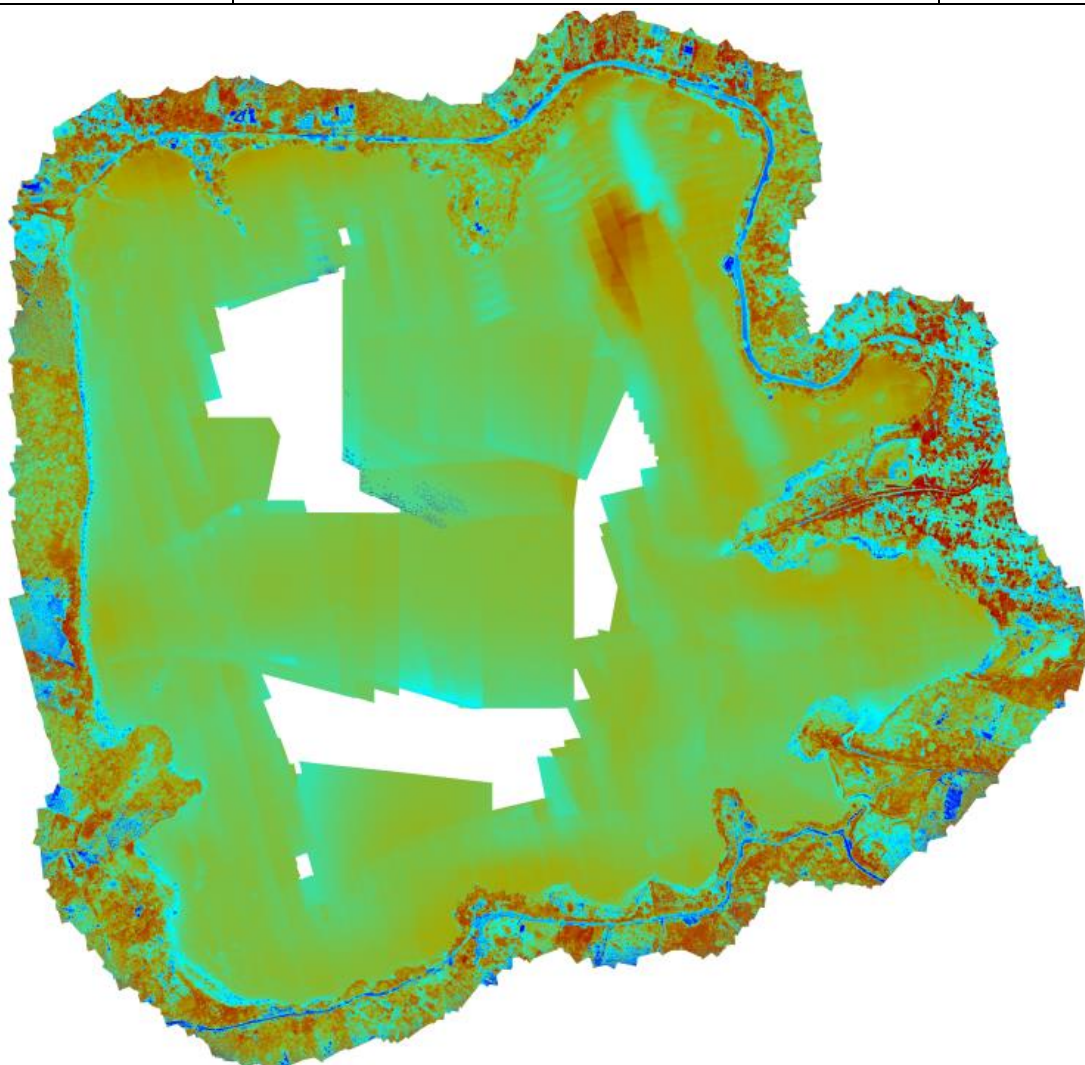
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



III. Índices Escalables

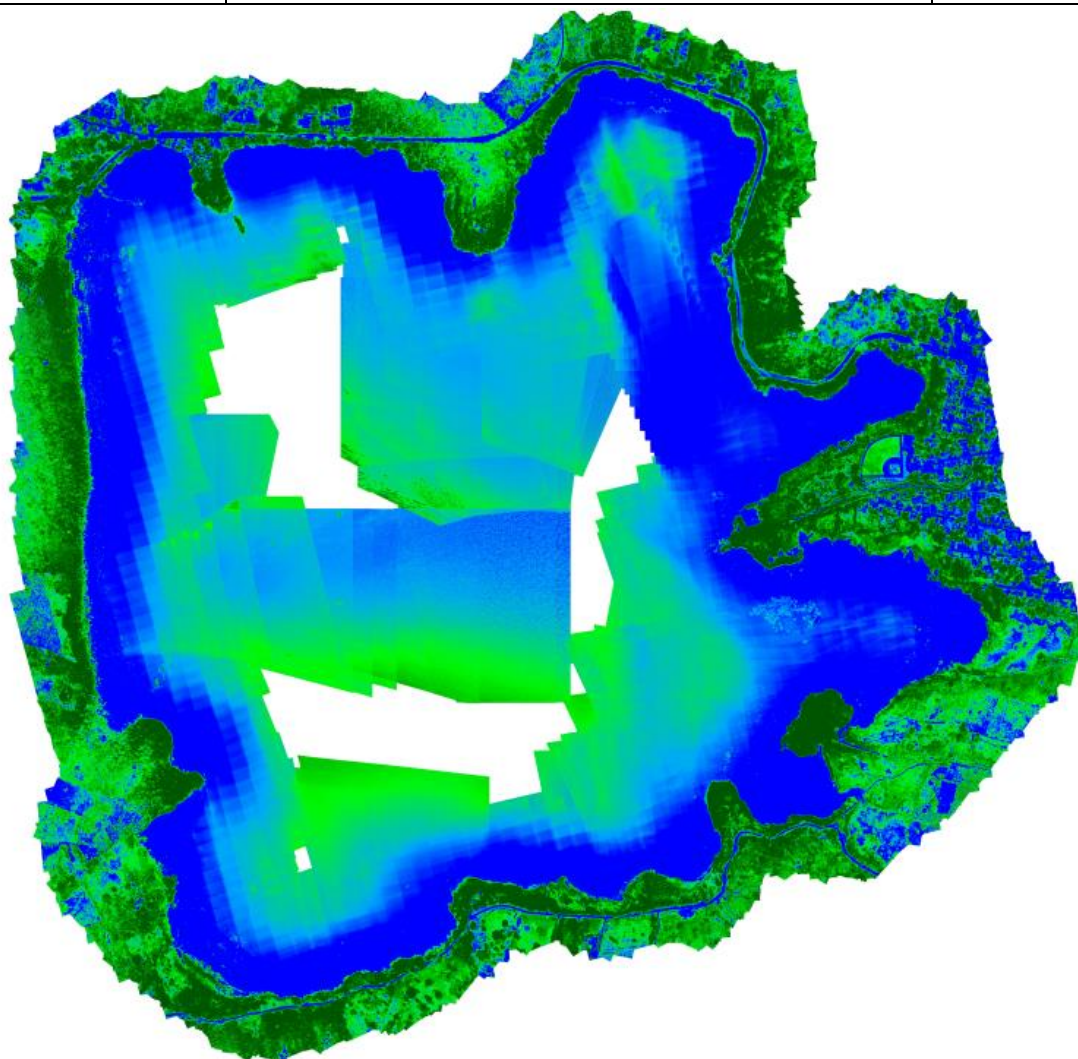
- TSM – Total Suspended Matter (Materia Total Suspendida)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- CMRI – Combined Mangrove Recognition Index (Índice Combinado de Reconocimiento de Manglares)

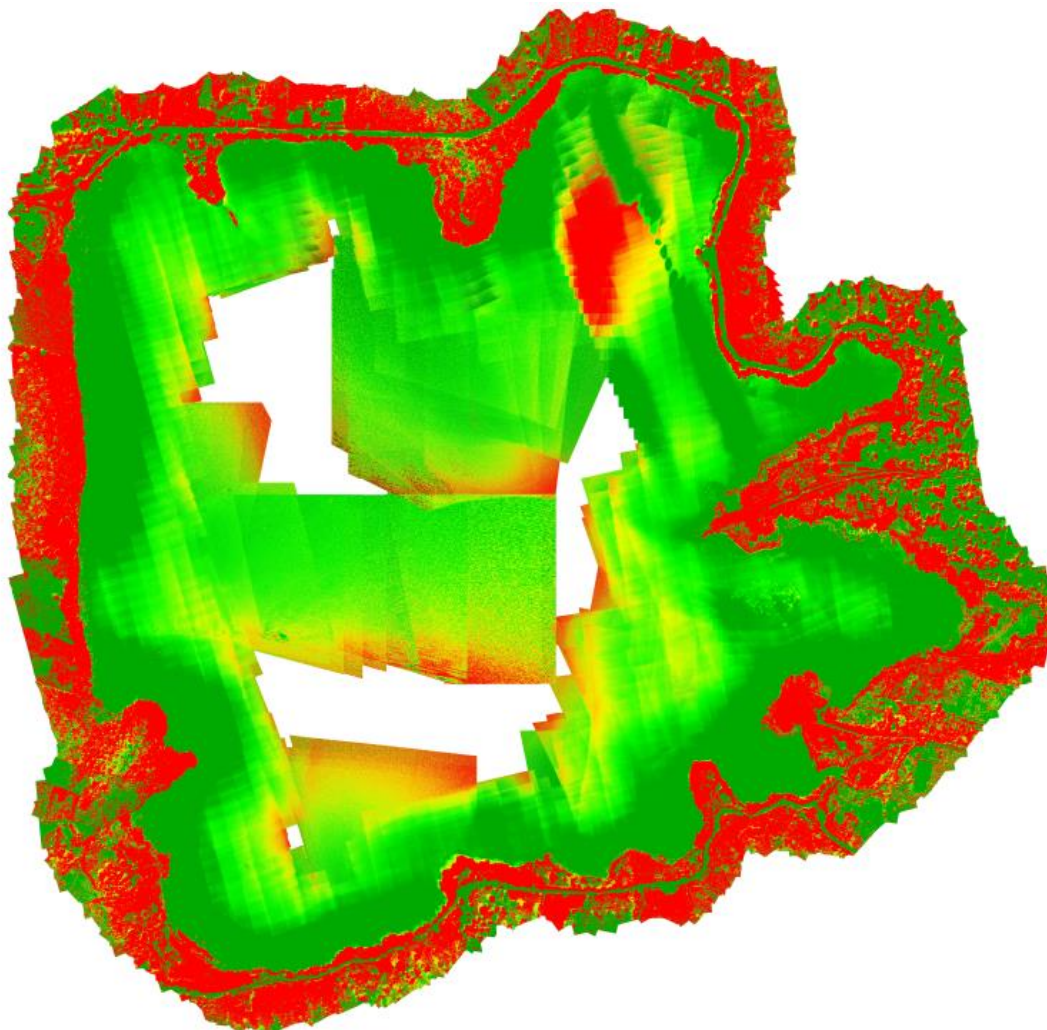
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



IV. Mapas-Productos de Análisis Geoestadístico

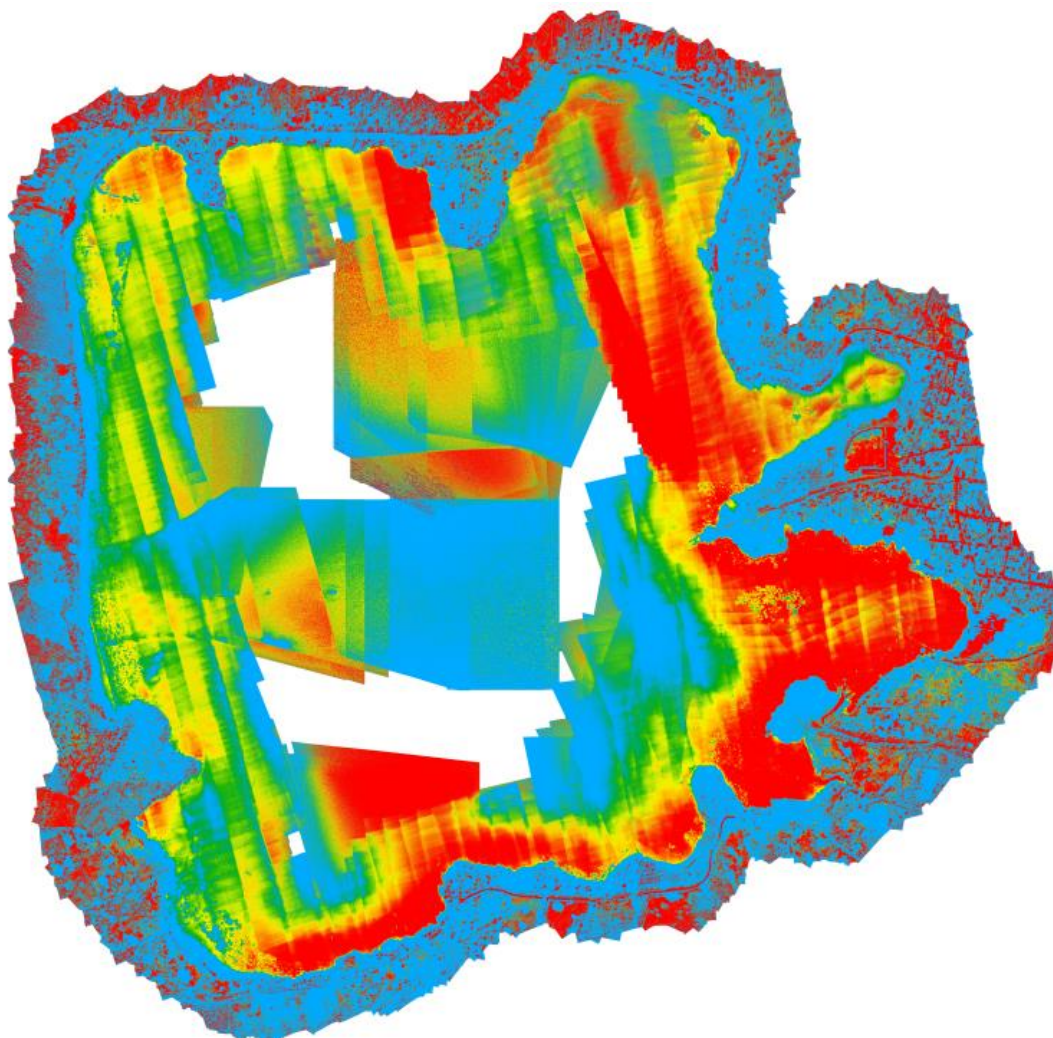
- Mapas de Concentración de Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) obtenido a través de Análisis de Regresión Múltiple (ARM)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- Mapas de Conteo de Cianobacterias (Individuos/mL), obtenido a través de análisis de regresión múltiple.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



V. Mapas Especiales

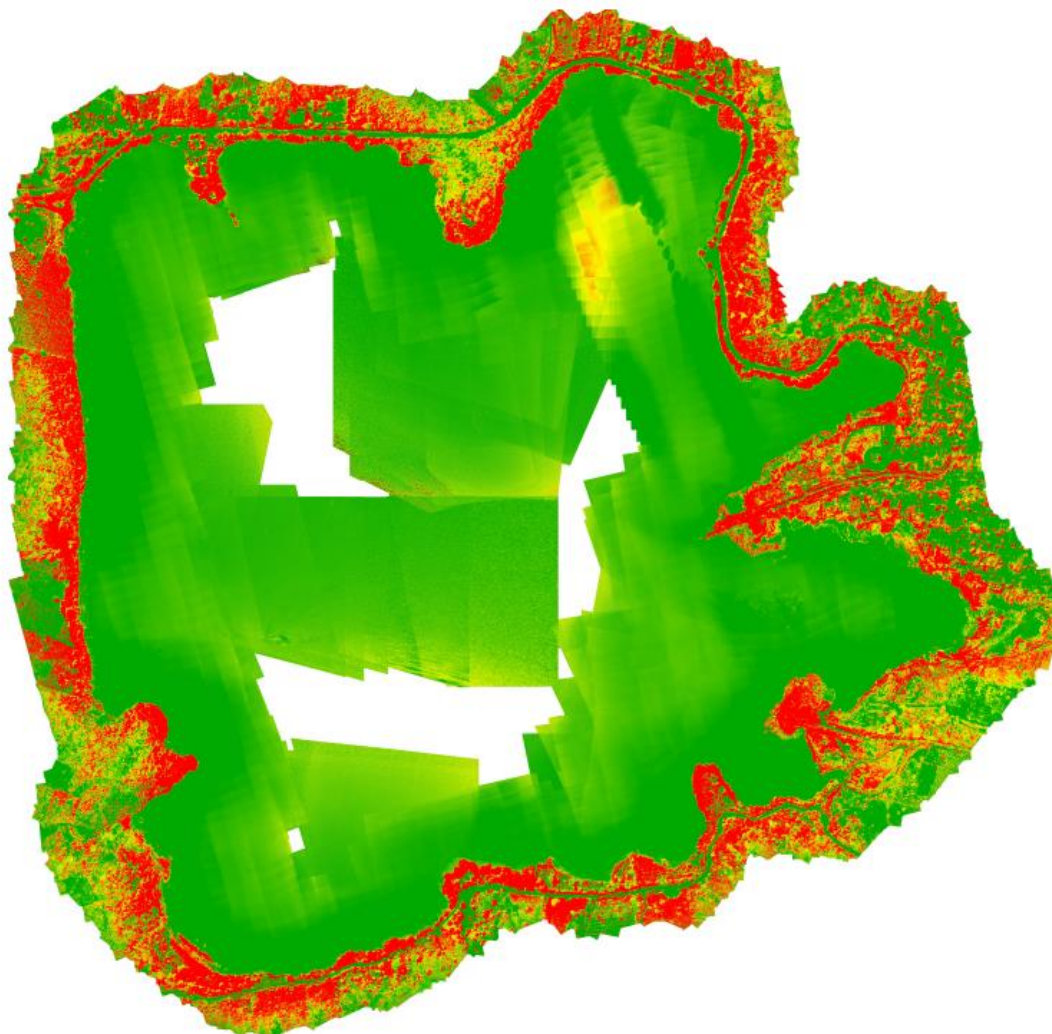
- Mapas de Calidad de Aguas (ICOSUS)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



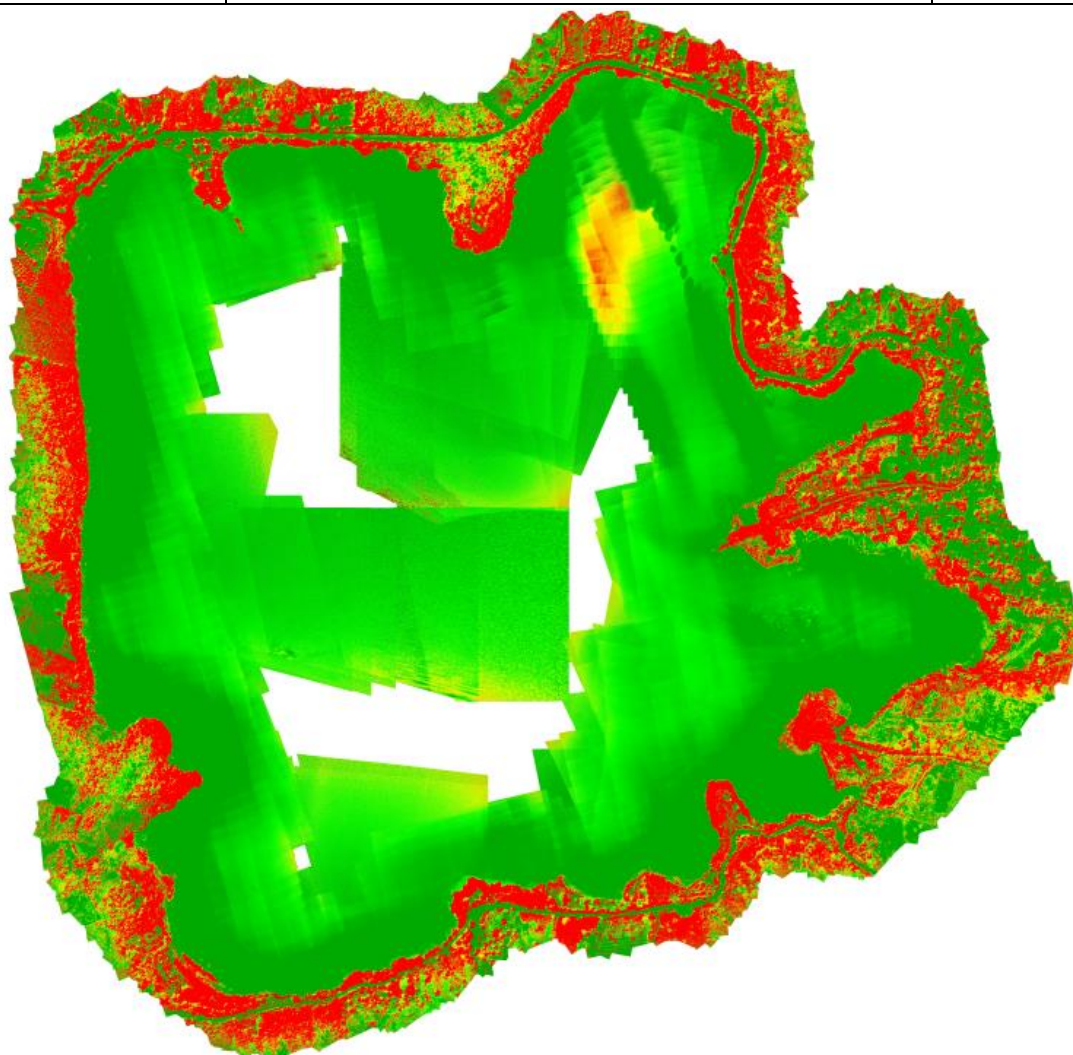
- Mapa Normativo para Sólidos Suspendidos Totales con los Límites establecidos para los cuerpos de agua estudiados según la normativa vigente de la CRA.

LABORMAR	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



- Mapa Normativo para Sólidos Suspendedos Totales con los Límites en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) para la Ciénaga de Luruaco (Resolución No. 000216 del 23 de Abril de 2015).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



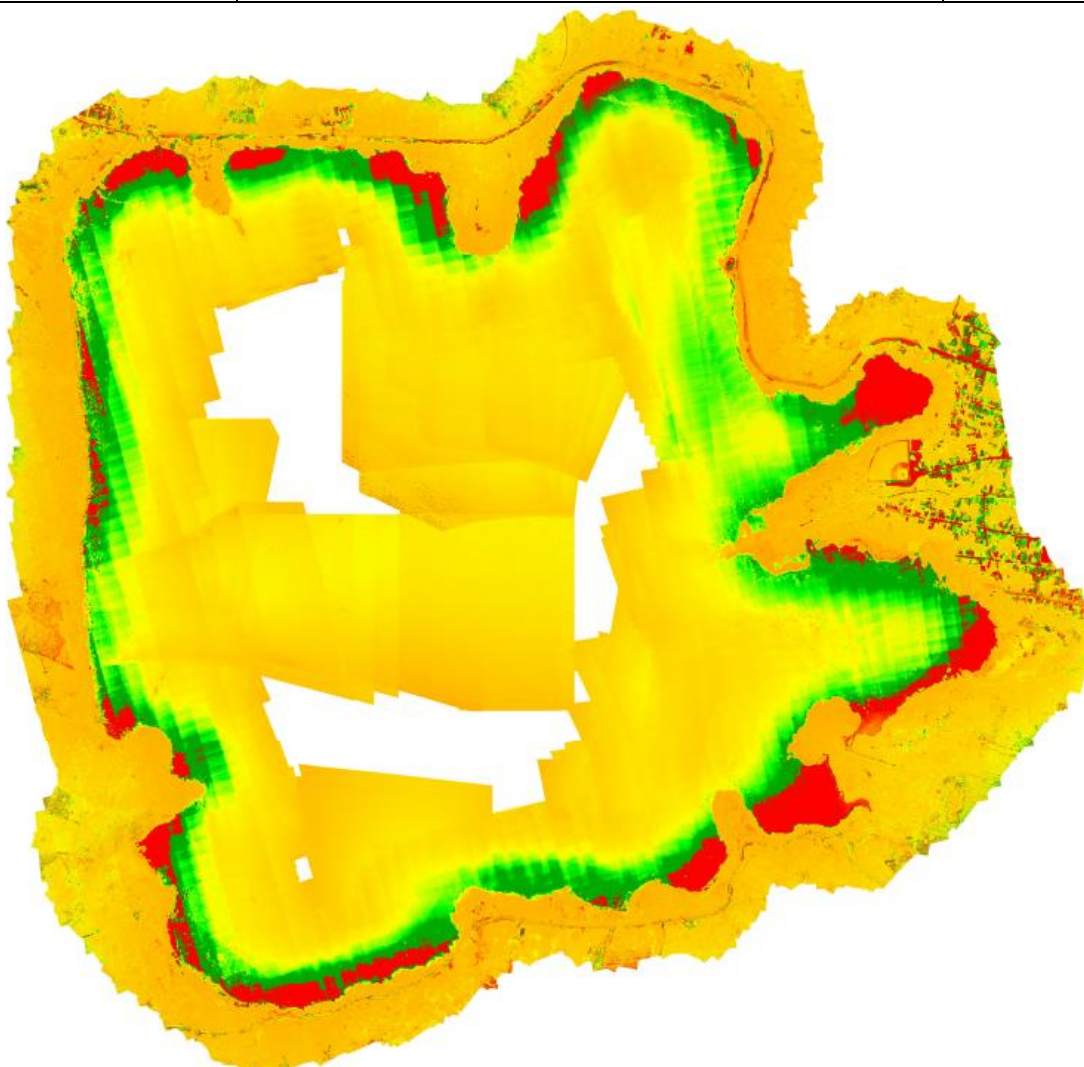
Nota Aclaratoria: Según el Artículo 2 de la mencionada Resolución, el límite a largo plazo en la Ciénaga de Luruaco deberá ser menor a 15 mg/L para el parámetro de Sólidos Suspendidos Totales. Por ende, este mapa refleja en rojo los valores por encima de ese límite, en amarillo los iguales al mismo y en verde aquellas zonas por debajo.

VI. Mapa de Índice de Identificación de Cianobacterias

- ICI 1 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción1)

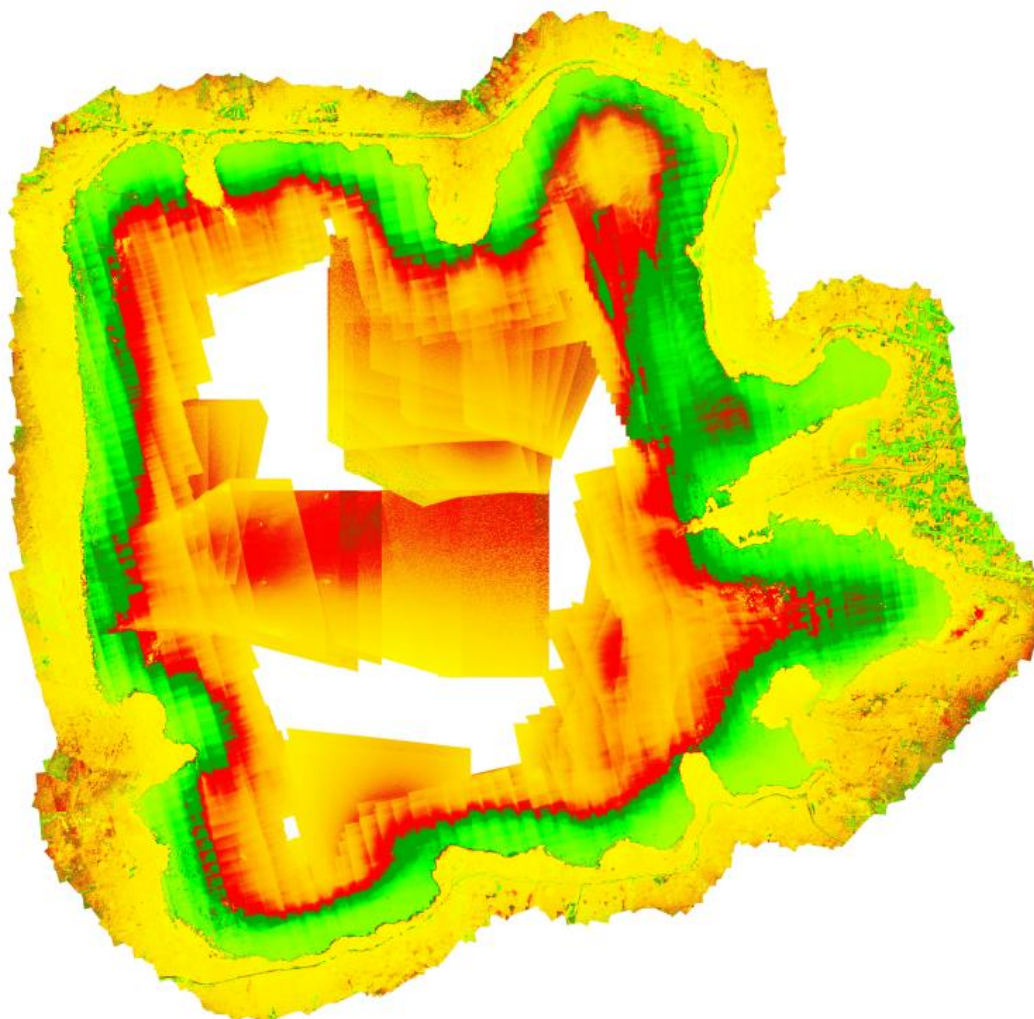
Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTs)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



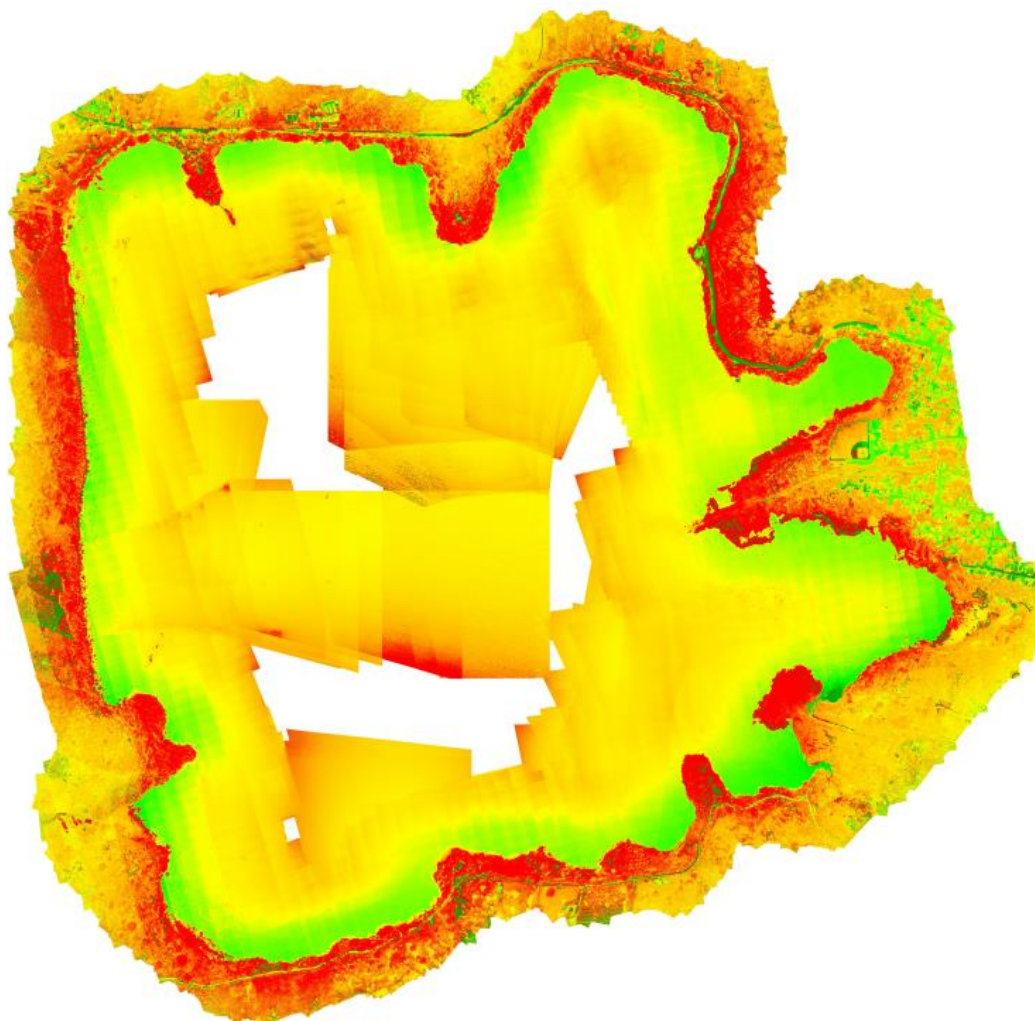
- ICI 2 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 2)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- ICI 3 (Índice de Identificación de Cianobacterias – Opción 3)

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



- Mapa de Composición RGB para identificación de Fitoplancton de Dron vs. Satélite (S-2A) en composiciones de Bandas Equivalentes.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Composición RGB231 obtenida con los ortomosaicos Multiespectrales elaborados a partir del
Sensor del Mavic 3 Multiespectral

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



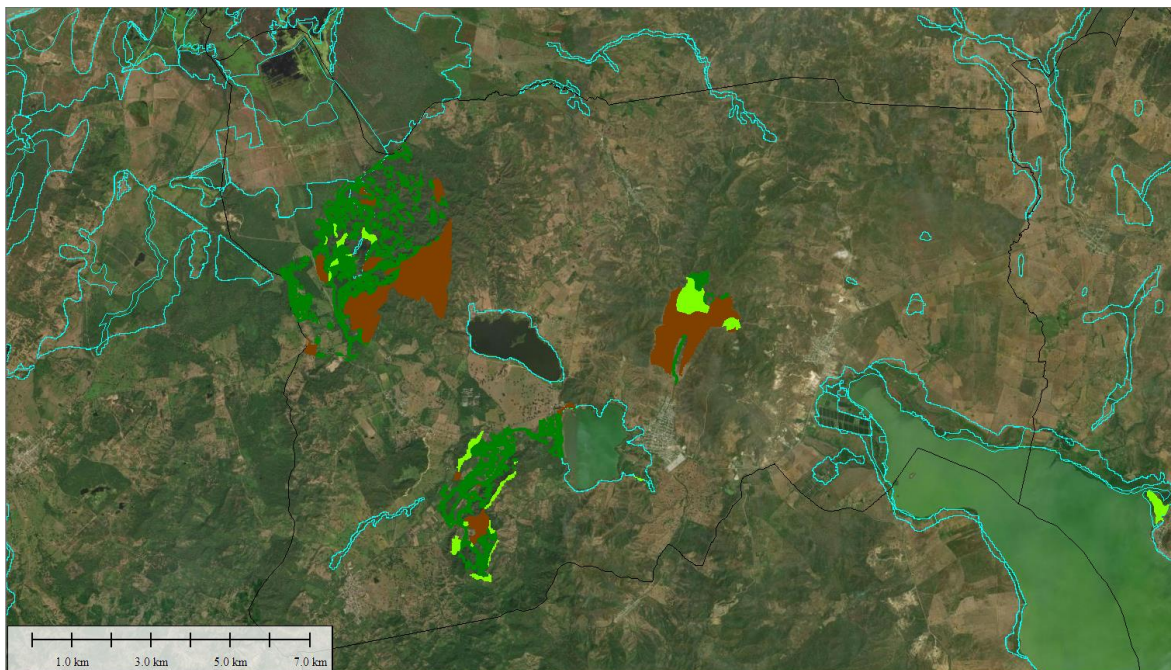
Composición RGB463 producto de la información proveniente del Satélite Sentinel 2, del Proyecto Copernicus, captadas el 11 de Diciembre del 2024, mismo día de la campaña simultánea de vuelo y muestreo de aguas en el mencionado cuerpo.

VII. Mapa de Riesgos de Inundación

Basado en los extremos históricos registrados durante la oleada invernal del 2011 (evento La Niña), se muestran los niveles registrados mediante base de datos del portal del IGAC,

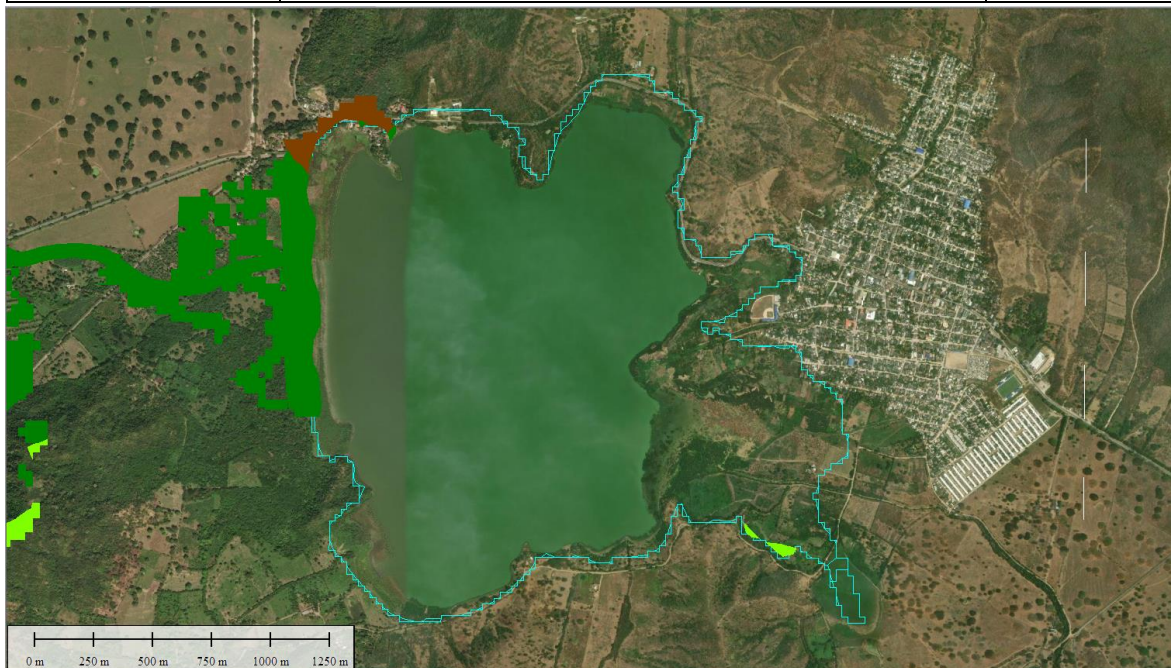
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025

efectos comparativos, el nivel de inundación ha sido llevado al mismo registrado durante el mencionado evento.



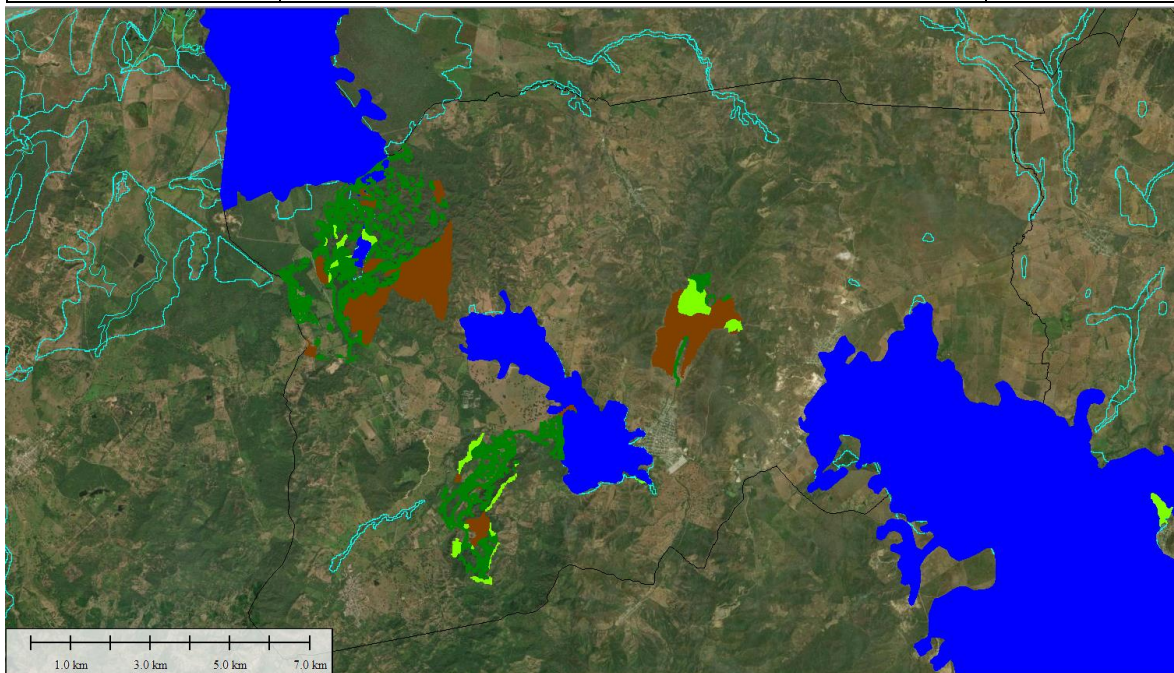
Límites del humedal según la base de datos cartográfica nacional del IGAC (en línea azul claro), hacia el centro se observan las Ciénagas de San Juan de Tocaguas (al norte) y Luruaco (al sur).

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



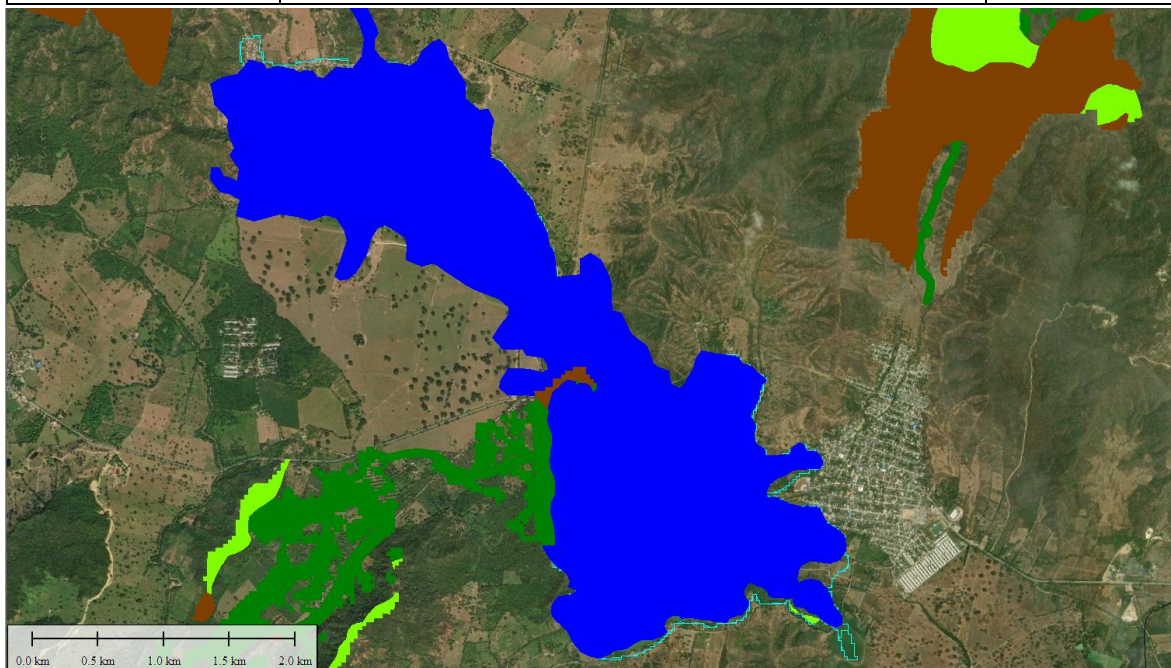
Detalle de la Ciénaga de Luruaco, con información base satelital.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



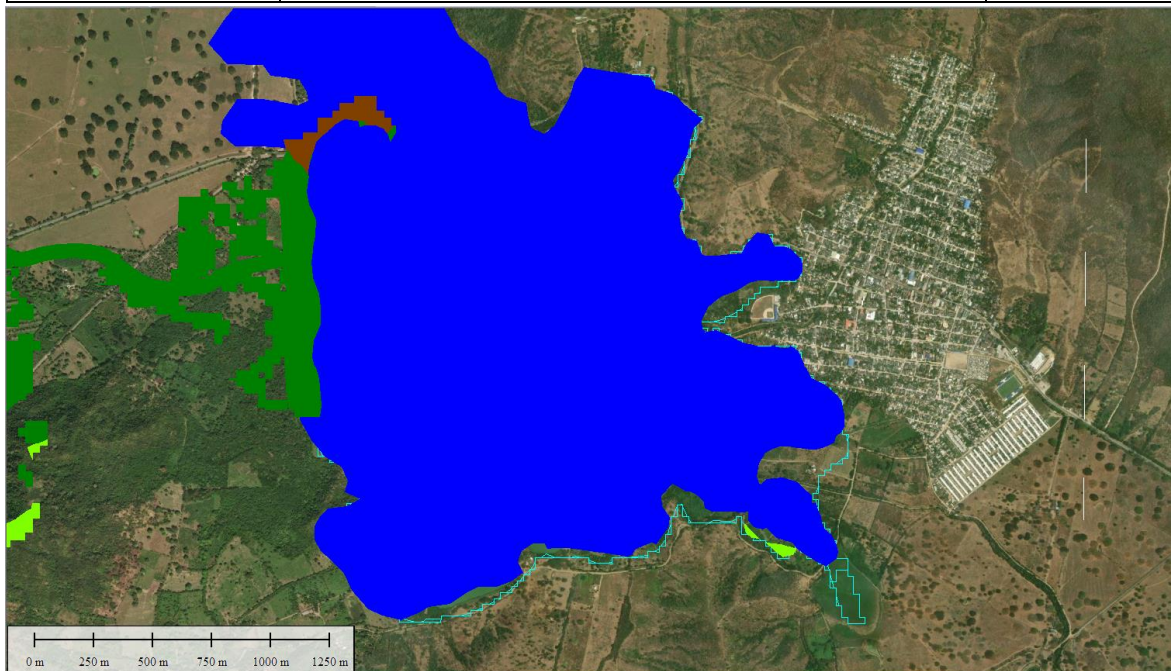
Visual ampliada con los límites de inundación de la oleada invernal de La Niña 2011, según datos de la base cartográfica del IGAC.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



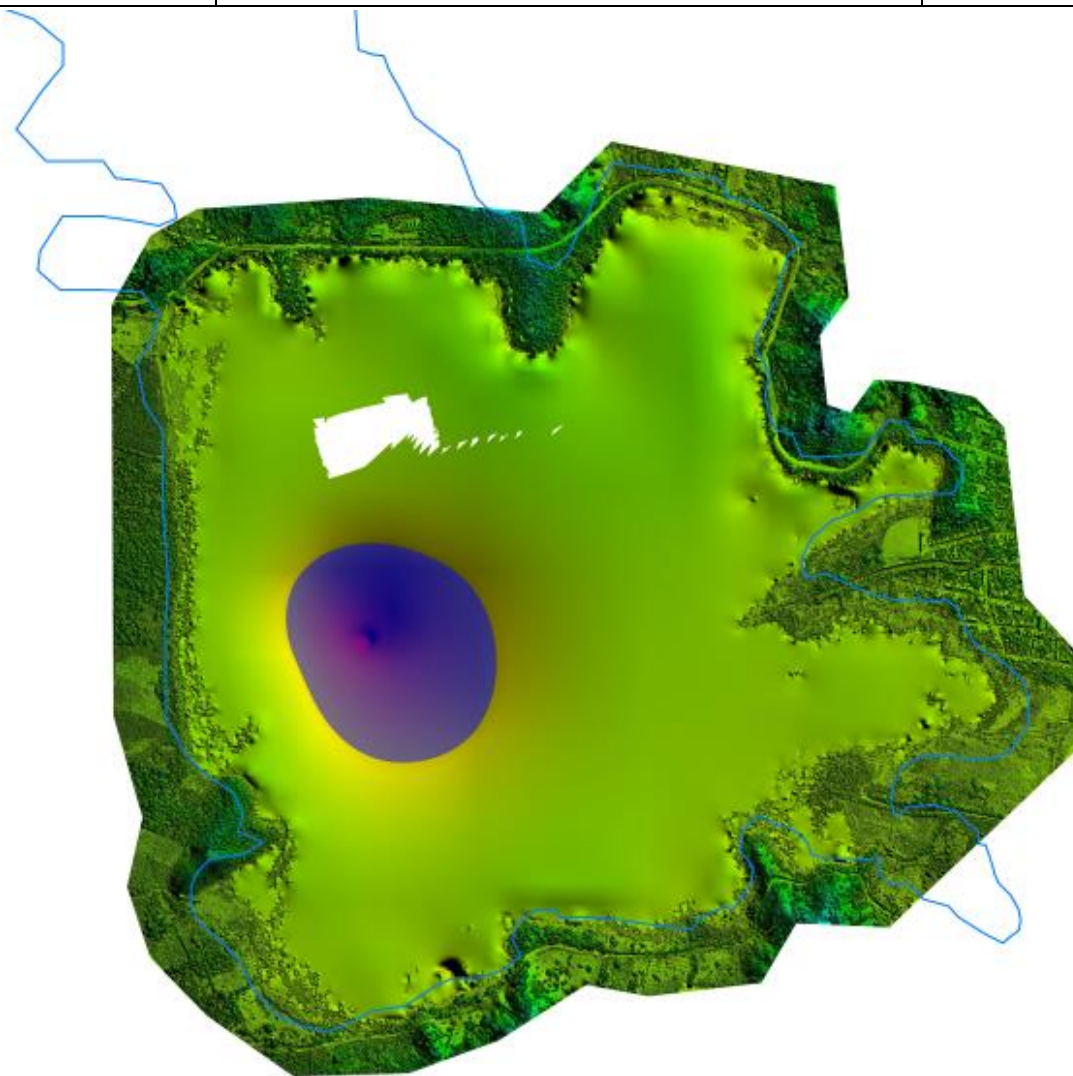
Límites de inundación de la Oleada Invernal 2011 (en azul sólido). Se observa una supuesta fusión de ambos cuerpos de agua (Tocaguas y Luruaco) Esta ‘fusión’ de ambos cuerpos ha de basarse en los valores del índice utilizado para trazar esta frontera de inundación, probablemente el NDWI, que resalta no sólo los cuerpos de agua sino el grado de saturación del suelo.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



Detalle de los límites de la inundación causados por la Oleada Invernal 2011, donde se observa el ascenso de los niveles alrededor de la desembocadura de los arroyos Negro y Limón.

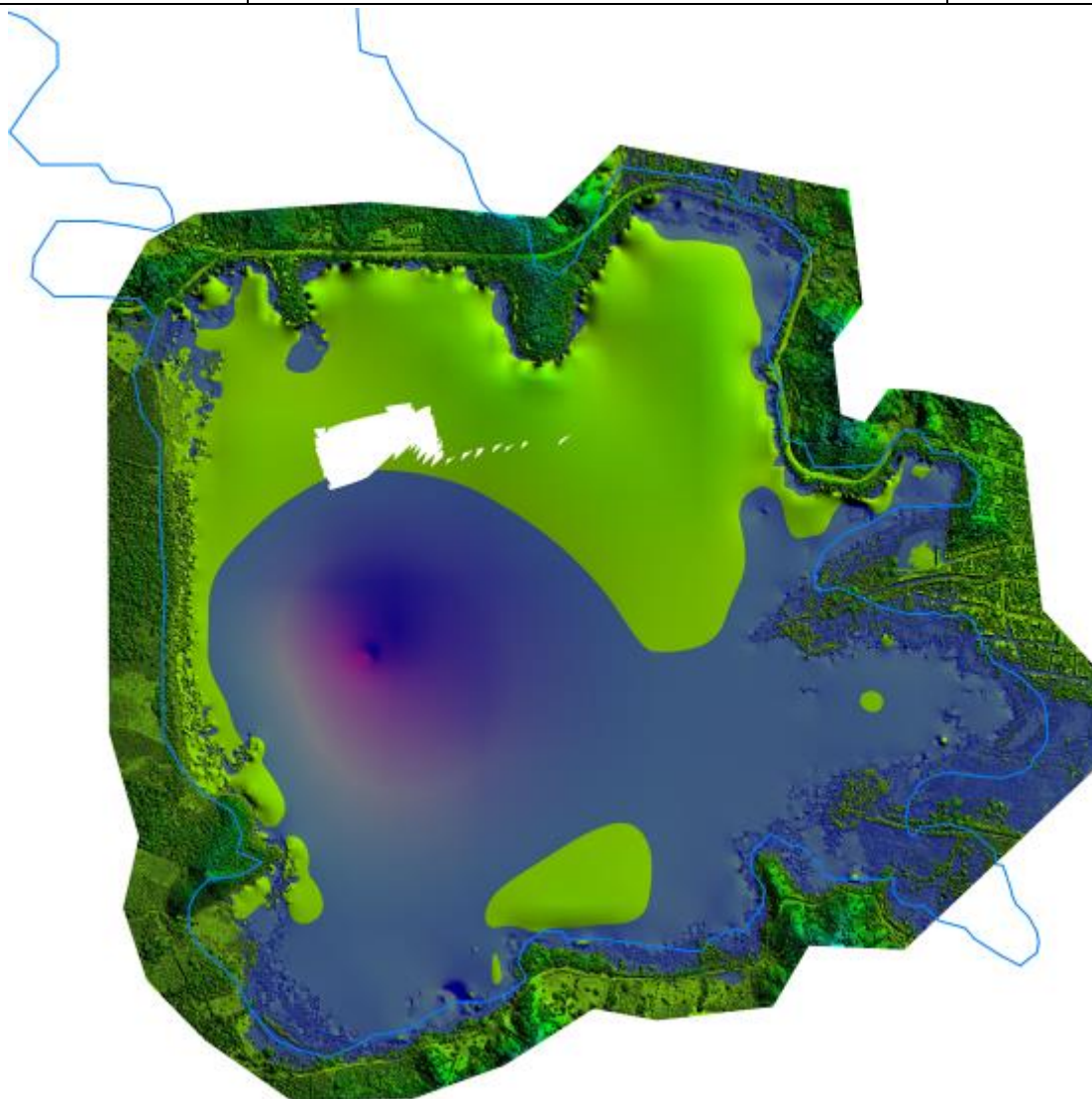
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Límites de Inundación de la oleada invernal 2011 (nuevamente con un límite azul claro) sobre el Modelo Digital de Elevaciones. Se observa las zonas que se verían más afectadas en una eventual repetición de las mismas condiciones de inundación.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

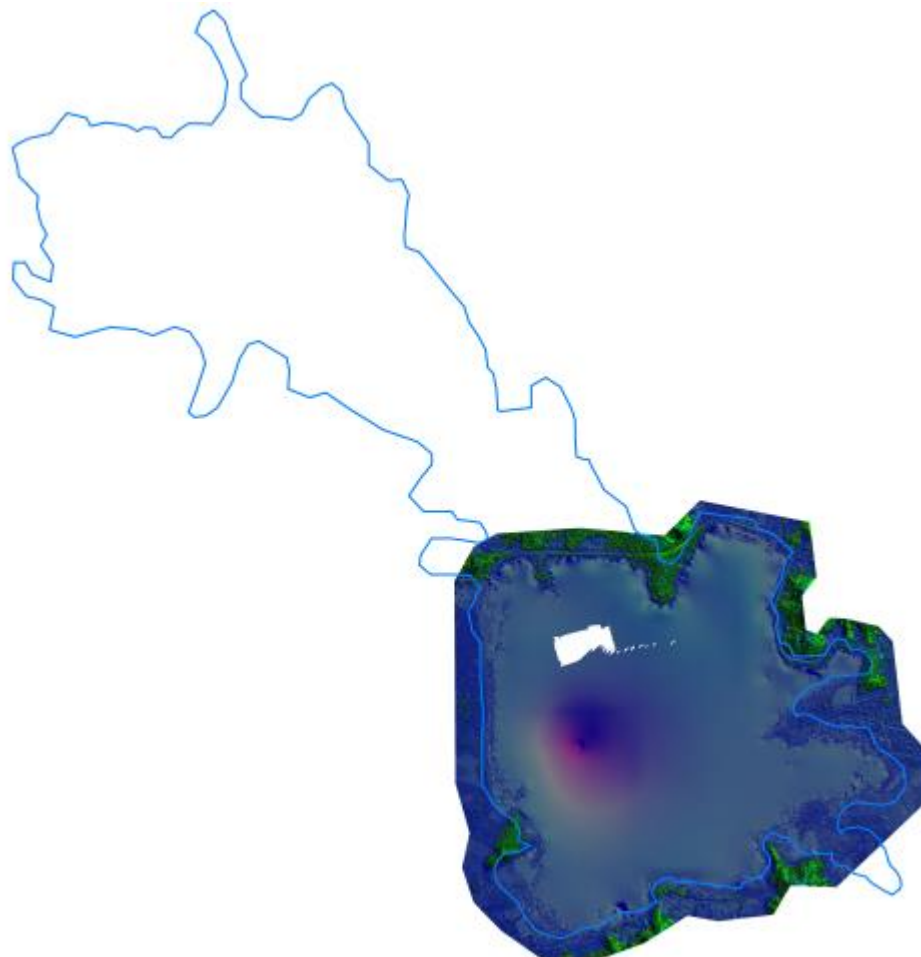
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB-0026-2025		marzo-2025



Niveles de agua simulados sobre el Modelo Digital de Elevaciones, a niveles similares a los de la Oleada Invernal del 2011. Se observa la colonización de la laguna en las zonas de desembocadura de los arroyos Limón (inmediatamente al sur de la cabecera municipal) y el arroyo Negro (más al sur).

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

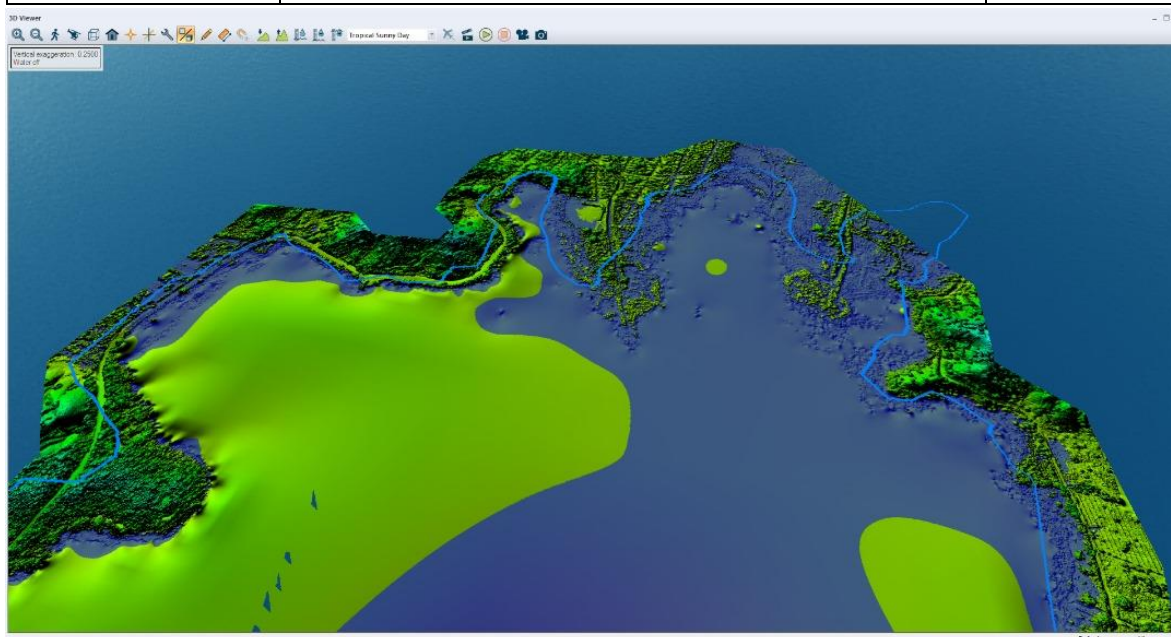
	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



Situación extrema con un nivel de más de un metro de inundación. Es preciso indicar que esta simulación precisa ser corregida en los niveles verticales. Esto se logra con un levantamiento usando puntos de control georreferenciados con antenas GNSS o GNSS/RTK, para ajustar los niveles del modelo al terreno real de manera más fiable. Dicho ejercicio no hace parte de los alcances del presente contrato.

Informe válido solo para la(s) muestra(s) analizada(s). Queda prohibida la reproducción parcial de este informe; la reproducción total de este informe no puede hacerse sin la aprobación por escrito del laboratorio.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025



Simulación de Inundación basado en el Modelo Digital de Elevaciones obtenido con el levantamiento RGB con la aeronave M3M. Se observa que, luego de un incremento de 3 pies (aprox. 1 metro) el nivel de agua invade las zonas aledañas a los arroyos Negro y Limón, éste último justo al sur de la cabecera municipal.

7. Bibliografía

Gurlin, D., Gitelson, A.A., Moses, W.J., 2011. Remote estimation of chl-a concentration in turbid productive waters—return to a simple two-band NIR-red model? Remote Sens. Environ. 115, 3479 3490. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.011>.

Mishra, D.R., Ogashawara, I. and Gitelson, A.A. (2017) Bio-optical modeling and remote sensing of Inland Waters. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL MEDIANTE DRONES (VANTS)	0476-2024
		Versión: 01
		2025-01-20
		Página 1 de 2
Informe N° HB- 0026-2025		marzo-2025

Slonecker, T., Bufford B., Graham, J., Carpenter, K., Opstal, D., Simon, N. and Hall, N. (2021)

Hyperspectral Reflectance Characteristics of Cyanobacteria. *Advances in Remote Sensing*, 10, 66-77.