

**ESTIMACIÓN DE FACTORES DESENCADENANTES EN EL PROCESO DE
EUTROFIZACIÓN PARA LA LAGUNA DE SONSO MEDIANTE LA IMPLANTACIÓN
DE UNA METODOLOGÍA POR MEDIO DE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA**



Jhon Alexander Amaya Giraldo
Valentina Serrano Pizarro

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa Académico de Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali, 01/01/2024

**ESTIMACIÓN DE FACTORES DESENCADENANTES EN EL PROCESO DE
EUTROFIZACIÓN PARA LA LAGUNA DE SONSO MEDIANTE TÉCNICAS DE
PERCEPCIÓN REMOTA**



Jhon Alexander Amaya Giraldo
Valentina Serrano Pizarro

Director
Cesar Edwin García, MSc.

Trabajo de grado para optar el título de profesional en Ingeniería Topográfica

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa Académico de Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali, 01/01/2025

Nota de aceptación

Presidente Jurado

Presidente Jurado

Santiago de Cali, 01 de enero del 2025

Resumen

El humedal de la Laguna de Sonso se destaca, no solo por su rol crucial en la conservación del ecosistema local y la biodiversidad asociada, sino también por su influencia en la provisión de servicios ecosistémicos (SSEE) para las comunidades más próximas. En este contexto, se presenta la necesidad imperativa de realizar un monitoreo constante y sistemático de la calidad del agua en la Laguna de Sonso, con el fin de comprender y mitigar los impactos negativos derivados de la contaminación y el desarrollo humano en la zona.

El presente estudio propone una metodología innovadora para abordar este desafío, haciendo uso de tecnologías de teledetección basadas en imágenes satelitales calibradas a milirreflectancia TOA. Esta elección se justifica por la capacidad de estas imágenes para proporcionar mediciones precisas de la reflectancia de la superficie del agua, lo que a su vez permite estimar parámetros químicos y orgánicos relevantes para la evaluación de la calidad del agua y la salud del ecosistema acuático. En este sentido, se destaca la importancia de la clorofila-a como indicador clave de la eutrofización y la presencia de contaminantes orgánicos en la Laguna de Sonso. Las mediciones de la concentración de clorofila-a, obtenidas a partir del análisis de las imágenes satelitales, permiten identificar y mapear afloramientos de material vegetal y otros contaminantes, proporcionando una visión detallada de la distribución espacial y temporal de la contaminación en el humedal. Además, se subraya la ventaja significativa de este enfoque en términos de costos y logística, en contraste con los métodos tradicionales de muestreo y análisis de agua, que requieren una considerable inversión de recursos y tiempo, mientras el uso de imágenes satelitales ofrece una alternativa rentable y eficiente para el monitoreo continuo y actualizado de la calidad del agua en la Laguna de Sonso.

Palabras clave: Humedales, Imágenes satelitales, Eutrofización, Modelo de regresión Lineal Múltiple, Material Vegetal.

Abstract

The wetland of Laguna de Sonso stands out not only for its crucial role in preserving the local ecosystem and associated biodiversity, but also for its influence on providing essential water resources for nearby communities. In this context, there is an imperative need for constant and systematic monitoring of water quality in Laguna de Sonso to understand and mitigate the negative impacts derived from pollution and human development in the area.

This study proposes an innovative methodology to address this challenge, using remote sensing technologies based on satellite images calibrated to Top of Atmosphere (TOA) millirreflectance. This selection is justified by the capability of these images to provide precise measurements of surface water reflectance, which in turn allows estimation of relevant chemical and organic parameters for assessing water quality and the health of the aquatic ecosystem. Based on this, the importance of chlorophyll as a key indicator of eutrophication and the presence of organic contaminants in Laguna de Sonso is emphasized. Measurements of chlorophyll concentration, obtained from the analysis of satellite images, enable the identification and mapping of outbreaks of vegetative material and other pollutants, providing a detailed view of the spatial and temporal distribution of pollution in the wetland. Additionally, the significant advantage of this approach in terms of cost and logistics is underscored, contrasting with traditional methods of water sampling and analysis, which require a considerable investment of resources and time, while the use of satellite images offers a cost-effective and efficient alternative for continuous and updated monitoring of water quality in Laguna de Sonso.

Keywords: Wetlands, Satellite Images, Eutrophication, Multiple Linear Regression Model, Vegetal Material.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a cada amigo, compañero, tutor o familiar, que participó de alguna manera, directa o indirectamente en el desarrollo de este trabajo de grado.

Inmensa gratitud a nuestra institución, La Universidad del Valle, por brindarnos la oportunidad de formarnos de la manera más integral, no solo como profesionales, sino como personas, ciudadanos de una sociedad que necesita cada vez mejores seres humanos que aporten al desarrollo y creación de país. De igual manera agradecemos a la facultad de Ingeniería, especialmente a la Escuela de Ingeniería Civil y geomática, a nuestro programa de Ingeniería Topográfica, cada profesor con el que tuvimos la oportunidad de compartir, de recibir parte de sus conocimientos, de su guía a través de estos años, por cada concejo y enseñanza, gracias.

A nuestro director de tesis, profesor Cesar García, gracias por la paciencia y también por la presión, por los consejos, por cada opinión, cada corrección, cada recordatorio de que teníamos algo pendiente, gracias por insistirnos en cumplir con todo lo planteado, por estar siempre y en cada momento de este proceso, alentarnos y exigirnos cuando no lo hacíamos nosotros mismo, gracias por permitirnos elegirlo, por acompañarnos, no solo en la realización de este trabajo de grado, sino en toda una carrera. Gracias.

Para nuestras familias, esto también es por ustedes, es gratificante ver como otros se alegran por tus triunfos y sentir, no solo el apoyo, el impulso, el constante “¿cómo va la tesis?”, sino apreciar como toman nuestras alegrías como propias, sentir su orgullo y ver como todo este esfuerzo también fue esfuerzo suyo. Gracias por todo, porque nos han formado desde el primer instante, nos han abrazado en cada momento, nos ayudaron a construir lo que somos hoy en día, gracias por la paciencia en una carrera que nos tomó más de lo esperado, pero que con esfuerzo de todos hemos logrado sacar adelante.

Amigos y colegas, sabemos que su ayuda ha sido de la más importante, no hablamos solo por sus conocimientos, sino además por la energía y la buena actitud que nos dieron a través de cada consejo, de cada charla, cada vez que discutimos el tema de avanzar en este proceso, de sus opiniones sobre qué camino podríamos tomar, lo valoramos inmensamente y parte de este logro va por ustedes también.

Sabemos que no ha sido un camino sencillo de recorrer, pero por cada una de las personas que hemos mencionado y por nosotros como equipo, hemos logrado cumplir

con este capítulo tan importante en nuestras vidas, es la culminación de una etapa maravillosa, fructífera y llena de experiencias que para siempre estarán con nosotros.

Dedicatorias

Para nuestros padres, María Yolanda Giraldo, Nataly Pizarro y Cesar Serrano. Nuestros triunfos y logros también son por y para ustedes, por la paciencia, el amor y el apoyo, es un logro de todos.

Dedicamos también este trabajo a todas las personas cuyo compromiso y esfuerzo contribuyen a la preservación y conservación de los humedales, en especial a aquellos que trabajan arduamente para proteger y restaurar la Laguna de Sonso, un recinto de biodiversidad invaluable. Que esta investigación sirva como una herramienta útil en la continua lucha por comprender, conservar y proteger los humedales, asegurando su biodiversidad y su vital función en el equilibrio ecológico del planeta. A todos aquellos que dedican su tiempo y energía en este propósito, les extendemos nuestro más sincero agradecimiento y reconocimiento. Que juntos, como sociedad y comunidad, podamos seguir trabajando hacia un futuro donde la armonía entre el hombre y la naturaleza sea una realidad duradera.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	14
2. PLANTEAMIENTO PROBLEMA.....	15
3. OBJETIVOS.....	18
3.1 Objetivo General	18
3.2 Objetivo Específico.....	18
4. JUSTIFICACIÓN	19
5. MARCO TEÓRICO	20
5.1 Marco Conceptual	20
5.2 Marco Teórico.....	22
5.2.1 Cálculo de reflectividad a partir de radiación	22
5.2.2 Índice de estado trófico.....	23
5.2.3 Coeficiente de determinación.....	23
5.2.4 Modelo de regresión lineal múltiple	24
5.2.5 Error de raíz cuadrática media	24
5.2.6 Error cuadrático medio.....	24
5.2.7 Desviación estándar	25
5.2.8 Promedio	25
5.2.9 Cuartiles	25
5.2.10 Valores aleatorios dentro de un intervalo	25
5.2.11 Valores aleatorios dentro de un intervalo	26
5.3 Marco referencial	26
6. METODOLOGÍA.....	27
6.1 Localización.....	27
6.2 Materiales y equipo.....	29
6.3 Procedimientos.....	29
6.3.1 Recopilación de información	31
6.3.2 Procesamiento de Datos	35
6.3.3 Asociación de información	39
6.3.4 Extracción valores de reflectancia	40
6.3.5 Análisis de regresión lineal múltiple.....	41
6.3.6 Análisis de Datos	42
6.3.7 Validación	42
7. RESULTADOS	42
7.1 Datos atípicos.....	42

7.2 Modelos matemáticos	47
7.3 Validación de modelos.....	54
7.4 Categorización según nivel de eutrofización	60
7.5 Discusión de resultados.....	61
8. CONCLUSIONES.....	65
9. BIBLIOGRAFÍA.....	67
10. ANEXO	72

Lista de tablas

Tabla 1.	Valores límites de la OCDE de clasificación trófica	23
Tabla 2.	Ubicación geográfica de los diez puntos de las estaciones de muestreo y toma de muestras de agua utilizados en este estudio.	32
Tabla 3.	Rangos espectrales del sensor Landsat 8 (OLI/TIRS)	33
Tabla 4.	Especificaciones de banda de productos científicos de nivel 2 (L2SP) de la Colección 2 (C2) Landsat 8-9	36
Tabla 5.	Comparación de resultado de la corrección radiométrica de los valores de las bandas sin corregir (digitales) y corregidas (reflectancia) de la imagen satelital (LC08_009057_20230525).....	37
Tabla 6.	Distribución porcentual global de datos no registrados por parámetro entre los años comprendidos en (2013-2022).....	46
Parámetro		46
Tabla 7.	Distribución porcentual global de datos atípicos por parámetro entre los años comprendidos en (2013-2022)	46
Tabla 8.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zona Sur .	47
Tabla 9.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zona Centro	48
Tabla 10.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zona Norte	48
Tabla 11.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Garzonero.....	49
Tabla 12.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Mocoa	50
Ecuación		50
Tabla 13.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón el Vínculo	50
Tabla 14.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Guayabito.....	51
Tabla 15.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Canadá	51
Tabla 16.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Guayamaral.....	52
Tabla 17.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Caño Nuevo	52
Tabla 18.	Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación, Análisis General	53
Tabla 19.	Valores por parámetro a partir de modelos de regresión lineal múltiple por estación de monitoreo	54

Tabla de Figuras

Figura 1.	Mapa de localización de la zona de estudio ubicado en el municipio de Buga, Valle del Cauca.	28
Figura 2.	Flujograma de la metodología.	30
Figura 3.	Flujograma de análisis de datos en colab.	31
Figura 4.	Mapa de localización de las estaciones de muestreo en la zona de estudio ubicada en el municipio de Buga, Valle del Cauca.	32
Figura 5.	Mapa de localización de estaciones de monitoreo e imagen satelital (combinación de bandas en falso color: 7,6,4) de la Laguna de Sonso.	34
Figura 6.	Esquema de distribución de rangos intercuartil y posición de datos atípicos	39
Figura 7.	Distribución espacio temporal del parámetro pH (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo	43
Figura 8.	Distribución espacio temporal del parámetro Turbiedad (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo	44
Figura 9.	Distribución espacio temporal del parámetro Sólidos suspendidos (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo	44
Figura 10.	Distribución espacio temporal del parámetro Oxígeno disuelto (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo	45
Figura 11.	Distribución espacio temporal del parámetro Nitratos (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo	45
Figura 12.	Distribución espacio temporal del parámetro Fósforo Total (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo	46
Figura 13.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zona Sur)	55
Figura 14.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zona Centro)	56
Figura 15.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zona Norte)	56
Figura 16.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Garzonero)	57
Figura 17.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Mocoa)	57
Figura 18.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón El Vínculo)	58
Figura 19.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Guayabito)	58
Figura 20.	Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia	

porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Canadá).....	59
Figura 21. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Guaymaral).....	59
Figura 22. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Caño Nuevo).....	60

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas superficiales son parte fundamental del ciclo hidrológico y desempeñan un papel crucial en la gestión y manejo de los recursos hídricos. Por tanto, es vital contar con información y conocimientos precisos sobre el origen, la distribución espacial y temporal, dinámica, calidad y disponibilidad del agua en el país (SIAC, 2022). En este contexto, el monitoreo de la calidad del agua se convierte en una tarea esencial para la conservación de los recursos hídricos.

Los humedales se caracterizan por ser zonas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos de baja profundidad. En su mayoría, se ubican en las llanuras de inundación cercanas a lagos y ríos, aunque también pueden encontrarse en sectores apartados de otros cuerpos de agua, abastecidos por aguas subterráneas (Fundación Aquae, 2019). Además, el hombre ha desarrollado humedales artificiales, como embalses y presas, cuya finalidad es el almacenamiento o control del volumen de agua de un cuerpo acuático próximo al embalse construido (Roldán, 2019).

Estos cuerpos de agua cumplen varias tareas dentro de la conservación ambiental dichas tareas pueden englobarse en el término de regulación hídrica o un (SSEE), dentro de estas encontramos el control de inundaciones, dado de que absorben el agua de lluvia y la filtran lentamente en el suelo, reduciendo así la velocidad y el volumen con que el agua corre hacia ríos y arroyos. Además, sus plantas son capaces de depurar el agua eliminando sustancias tóxicas provenientes de actividades industriales y mineras. Los humedales también son ecosistemas con gran diversidad biológica, sirviendo de refugio para especies de plantas, mamíferos, anfibios y reptiles, y actúan como almacenadores de carbono, lo cual permite mitigar efectos desencadenados por el cambio climático (Fondo de Cooperación Chile-México, 2006).

Con el paso del tiempo, se han encontrado diversas situaciones que alteran y degradan la vitalidad de los humedales. García y Cantú (2009) presentan la situación del estrés hídrico como aquella donde la demanda de agua excede la disponibilidad de esta. A medida que aumentan los niveles de contaminación, se pierde la capacidad de poder destinar el agua a actividades de uso y/o consumo humano. Además, uno de los factores que comprometen el estado de los cuerpos de agua en los últimos 20 años ha sido el aumento de un tercio de las sequías a nivel mundial (UNESCO, 2020). El deterioro de los ecosistemas provocará cambios significativos en el ciclo hidrológico, afectando de igual manera la disponibilidad de este recurso natural. Es aquí donde se hace necesaria la implementación de una categorización respecto a la cantidad de material potencialmente contaminante dentro del cuerpo de agua.

El estado trófico será el encargado de medir el nivel de eutrofización dentro de estos,

a partir de parámetros establecidos en el comportamiento de materia orgánica y otros compuestos (Suhoschi et al., 2022).

En contraposición a los métodos convencionales que implican la recolección periódica de muestras de agua y su correspondiente análisis de laboratorio (Gökçe, 2016), la teledetección ofrece una alternativa eficaz. Un método alternativo para monitorear la calidad del agua el cual surge a partir del uso de imágenes satelitales. En las últimas décadas, se han estudiado técnicas y capacidades de detección remota para monitorear varios parámetros de calidad del agua (Zehra et al., 2019).

En este contexto, el objetivo de este proyecto se basa en la determinación de los parámetros de calidad de agua en la laguna Sonso, utilizando el procesamiento de imágenes satelitales para apoyar la evaluación y monitoreo espacio-temporal de este ecosistema. Para lograr este fin, se utilizaron técnicas de regresión múltiple a partir de la reflectancia de teledetección de los sensores Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) para crear modelos que permitieron estimar valores de pH, nitratos, turbiedad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y fósforo. Debido a falta de información de campo, correspondiente a cantidades de clorofila en la Laguna, se determinó el nivel de eutrofización para la misma con base a los parámetros oxígeno disuelto y fosforo total, los cuales también influyen en este proceso y de los que se encontró literatura para su debida clasificación según niveles de eutrofización.

Finalmente, se evaluaron los algoritmos utilizando el error cuadrático medio (RMSE) y los coeficientes de correlación R cuadrado (R²) para seleccionar los modelos más apropiados para generar una serie espacio-temporal de los parámetros de calidad de agua. En el caso de la clorofila, se procedió a implementar técnicas diferentes dado la falta de información in situ en la zona de estudio.

2. PLANTEAMIENTO PROBLEMA

Los humedales son cuerpos de agua generadores de uno de los ecosistemas acuáticos más importantes del país, ya que en estos se presenta gran diversidad biológica, refugiando variedad de especies animales y vegetales, son generadores de recursos hídricos para abastecimiento de agua dulce y permiten modular el ciclo hidrológico, por lo que su conservación es indispensable para el equilibrio ambiental de las zonas donde estos se localizan (Inecol, 2022). Actualmente Colombia cuenta con 48.473 humedales y territorios anfibios, los cuales comprenden el 26% del territorio nacional, distribuidos en las áreas hidrográficas del Pacífico, Orinoco, Amazonas, Caribe y la cuenca Magdalena-Cauca (Instituto Humboldt, 2021)

La laguna de Sonso es el principal humedal en toda la planicie aluvial del río Cauca con una extensión de 2045 Ha, se encuentra localizada en el complejo de humedales de la

cuenca alta del río Cauca, en el municipio de Buga. En este ecosistema habitan alrededor de 118 especies de aves, 16 especies de mamíferos y más de 4 especies de palmas amenazadas (SIDAP Valle del Cauca, 2018).

Dentro de los diferentes compuestos que se pueden encontrar en humedales y en general en cuerpos de agua están los nutrientes, estos son elementos químicos que resultan esenciales para el crecimiento y desarrollo de las algas, y de las plantas presentes en los cuerpos de agua. Si bien existen una amplia variedad de nutrientes, en general se considera a aquellos compuestos de Nitrógeno (N) y de Fósforo (P) como los más importantes, siendo también representativos de las condiciones de calidad de los ecosistemas acuáticos (Grosman, Sanzano y Bertora, 2019). El fósforo, en exceso, indicaría un desarrollo exorbitante de plantas, mientras que el nitrógeno reduce las partículas de oxígeno disueltas en el agua y es tóxico para estos organismos. Ambos en conjunto son los responsables del crecimiento desmesurado de organismos fotosintéticos.

Según Álvarez et al. (2009), dentro de este tipo de organismos, se encuentra el fitoplancton, estos son una agrupación de seres vivos de origen vegetal, que viven flotando en columnas de agua, son organismos autótrofos (fijan el CO₂ atmosférico) capaces de realizar la fotosíntesis (proceso por el cual se convierte la luz del sol en energía), por lo tanto, se hace necesario identificar la clorofila como el compuesto encargado de desarrollar la fotosíntesis en plantas, cianobacterias y algas (Costas, 2019). Con base en esto, se entiende que cuando hay un exceso en los depósitos de nutrientes dentro de un cuerpo de agua, se producirá un afloramiento intenso de fitoplancton, lo cual generará que los nutrientes y el oxígeno se agoten, el plancton muera y finalmente se desencadene la muerte de peces y demás organismos del ecosistema (Costas, 2019).

Sumado a lo anterior, cabe resaltar que el estado trófico de un cuerpo de agua se puede ver como un sistema de clasificación, que indica los niveles de la concentración de nutrientes, fitoplancton y por ende clorofila dentro de un cuerpo de agua, presentando así el estado de contaminación de este (Ibérica, 2018).

Debido a actividades humanas realizadas alrededor de la laguna, existe una cantidad considerable de material orgánico, el cual afecta el bienestar del ecosistema y la variación de sus componentes naturales, entre ellos la alcalinidad, indicadora de la capacidad del agua para neutralizar los ácidos, en el caso de la Laguna de Sonso presentó valores de hasta 398 mg/L de agua (Papamija, 2019), en comparación a valores de referencia de 50 mg/L de agua, lo cual evidencia las grandes concentraciones de contaminación en estas aguas (Semana, 2019).

En los estudios realizados por Álvarez et al. (2009) en la Laguna de Sonso, las estaciones de muestreo detectaron valores de pH que no sobrepasan las 8 unidades, con un límite establecido entre 6.5 y 9 unidades, cantidades de nitrógeno de 2.5 mg/L y una

concentración media de fósforo de 0.13 mg/L, con límites establecidos de 0.1 mg/L para el nitrógeno y 0.5 mg/L para el fósforo. Estos valores se producen debido a vertimientos de origen urbano e industrial, dadas las actividades agrarias y ganaderas que pueden desarrollarse en la zona, adicionalmente presentó coliformes fecales (vertimientos de excremento de animales de sangre caliente) con valores entre 3 y 4 NMP/100 ml, sobrepasando los límites establecidos para agua destinada a riego y recreación, establecido en 3 NMP/100 ml.

En la investigación realizada por Swistock (2020), el consumo de aguas contaminadas por coliformes fecales tiene un grado de afectación considerable en la salud humana. Aunque existen bacterias inofensivas para el cuerpo, también se presentan aquellas que producen malestar gastrointestinal, fiebre y diarrea, entre los subgrupos de bacterias en aguas contaminadas se encuentran coliformes fecales y *Escherichia coli* o *E. coli*, la mayoría de estas cepas son inofensivas, pero sin embargo algunas pueden producir toxinas altamente graves y hasta causar la muerte en personas.

A partir de estos estudios y la aplicación del modelo LACAT (lagos cálidos tropicales), que emplea un esquema cuantitativo iniciando con el estado ultra oligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófica y finaliza con el hipertrófico, el estado de la Laguna de Sonso es de nivel mesotrófico por un 68.58% y eutrófico un 27.72%. Cabe resaltar, en la clasificación de niveles de estado trófico, el oligotrófico con el nivel más bajo de productividad biológica, agua clara y poca flora y fauna acuática. Seguidamente, Mesotrófico, cuyo nivel de productividad se considera intermedio, Eutrófico con alto nivel de productividad y finalmente Hipereutrófico con niveles altamente elevados de productividad biológica (Moreno et al., 2010).

Dado que la Laguna de Sonso es fuente de agua potable, alimento y sustento para 1500 familias, además de ser hábitat de numerosas especies animales y vegetales, se refleja la necesidad de analizar constantemente niveles eutróficos en sus aguas para poder determinar la magnitud de materia orgánica presente en estas, a partir de niveles de compuestos como la clorofila y el pH, junto con demás elementos químicos que indicarían también el desarrollo excesivo de material orgánico, que en conjunto serían indicadores fijos de la actividad biológica desarrollada en el cuerpo de agua debido a la sobrecarga de material externo dentro del humedal.

Según cifras entregadas por la Universidad Nacional, Sede Bogotá (2017), uno de los factores que cobra más relevancia en el desarrollo de cualquier proyecto es el económico considerando que se deben tener en cuenta varios aspectos del mismo como lo pueden ser la viabilidad financiera donde se evalúan los costos asociados con el desarrollo y la ejecución del proyecto un análisis fisicoquímico de agua para peces que incluye alcalinidad, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, pH, nitrógeno amoniacal y dureza total, puede costar COP\$207.000, un análisis microbiológico para coliformes totales, *E.coli* y recuento total de bacterias

heterotróficas, costaría aproximadamente COP\$190.000, análisis de aguas para elementos como fósforo total, nitratos, oxígeno disuelto, pH, turbiedad, sólidos suspendidos, clorofila, etc, oscila aproximadamente entre COP\$13.000 y COP\$121.000 cada uno, adicionalmente se deberían tener en cuenta los gastos referentes a la logística necesaria para llevar a cabo el proceso para la toma de datos en el sitio de estudio.

Por otra parte, respecto a gastos y logística, una metodología remota basaría su desarrollo en el procesamiento de imágenes satelitales o fotografías aéreas, siendo este un trabajo de oficina en el que las actividades para la recolección de datos junto con los gastos para los diversos análisis aplicados a las muestras se verían disminuidos, al igual que podrían realizarse de manera constante, obteniendo datos actualizados del estado trófico del cuerpo de agua.

Con base a esta información, surge la necesidad de plantear la pregunta; ¿Cómo determinar valores de material orgánico y elementos químicos en cuerpos de agua de manera remota de forma periódica para agilizar la identificación de afloramientos en compuestos vegetales e intervenir en problemáticas ambientales?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Implementar una metodología a través de sensores remotos para la estimación de parámetros químicos y orgánicos previamente establecidos de forma periódica, que permitan entender el comportamiento biótico y nivel de contaminación en la Laguna de Sonso.

3.2 Objetivo Específico

- Establecer un modelo matemático que represente el comportamiento de cada parámetro responsable del proceso de eutrofización dentro del periodo de estudio
- Analizar la información obtenida en campo con los datos registrados a partir de imágenes satelitales respecto a materia orgánica y demás elementos químicos presentes en la laguna de Sonso
- Identificar el estado trófico de la laguna de Sonso por medio de los valores obtenidos, según parámetros químicos y orgánicos que evidencien la posible contaminación de este humedal.

4. JUSTIFICACIÓN

Los humedales desempeñan funciones ecológicas esenciales, como el almacenamiento y regulación del agua, proporcionando hábitats para una amplia diversidad de especies y contribuyendo significativamente a la biodiversidad global. Según la Convención de Ramsar et al. (2025), son uno de los entornos más productivos del mundo, actuando como cunas de diversidad biológica y fuentes de agua de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir, adicionalmente aportan agua dulce necesaria para múltiples labores y necesidades humanas. La actividad del hombre ha tenido tal impacto que ha llegado a alterar la composición natural de estos cuerpos de agua, esto debido a residuos de actividades tales como las industriales, agrícolas, ganaderas o de minería, que sin medir las consecuencias son depositadas o transportadas a los humedales, sus alrededores o los afluentes a los cuales están conectados, lo que ha llevado a que estos ecosistemas cada vez se encuentren más expuestos y al borde un irreparable desastre ambiental.

Con el propósito de encontrar una solución para detener o reducir los daños que los desechos contaminantes pueden causar en los ecosistemas, se plantea la creación de una herramienta que permita identificar rápidamente valores de material orgánico y otros elementos relacionados con la producción excesiva de contaminantes mediante monitoreo remoto. El objetivo del proyecto es utilizar sensores remotos para analizar los niveles de elementos orgánicos disueltos en el agua, como nitrógeno (N) y fósforo (P), así como los niveles de pH. Con esta información se podrá monitorear el estado actual de la laguna y evaluar su comportamiento. Caso similar se desarrolló en la Laguna Santa Elena basado en el procesamiento de imágenes satelitales como apoyo para la evaluación y monitoreo espacio temporal de ecosistemas determinar parámetros de calidad de agua (Daniela, 2020).

El uso de imágenes satelitales y sensores remotos se presenta como una alternativa económica y eficiente frente a los altos costos asociados con los estudios de campo tradicionales, tal como se mencionó previamente en el análisis de la Universidad Nacional, Sede Bogotá (2017). Estas herramientas no solo permiten calcular diversos parámetros biológicos, químicos y físicos, sino que también contribuyen al desarrollo sostenible al reducir los tiempos de trabajo y facilitar una acción más inmediata frente a problemas ambientales específicos, como en el caso de la Laguna de Sonso. Además, su implementación ha demostrado ser efectiva en distintas regiones de América Latina, donde las fuentes hídricas enfrentan altos niveles de contaminación. Ejemplos como el monitoreo remoto en República Dominicana, resaltan el impacto positivo de estas tecnologías al identificar la contaminación

fisicoquímica, mejorar la capacidad de respuesta y fomentar un manejo más eficiente de los recursos hídricos, impulsando así beneficios económicos, sociales y ambientales de manera significativa (Franco, 2023).

Por lo tanto, llevar a cabo este estudio comparando valores de campo y valores estimados a partir de imágenes satelitales, pretende verificar el estado en que se encuentra el humedal y en caso de tener medidas de alta presencia de material orgánico y químico y proteger así el cuerpo de agua, lo que podría corresponder problemas de salubridad, ecológicos y de desarrollo, por lo que el empleo de modelos matemáticos podría predecir los impactos en la calidad del agua, debidos a un cambio de actividades biológicas, de esta forma, establecer las prioridades de desarrollo en función de los usos deseados del recurso hídrico.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Marco Conceptual

El estado trófico es un concepto fundamental en la gestión de los cuerpos de agua, en él se describe la relación entre el estado de nutrientes y el crecimiento de materia orgánica dentro del mismo, por lo que este tipo de categorización permitirá reconocer ciertos niveles de contaminación que podrían presentar diversos ecosistemas acuáticos (Moreno, 2010).

Ecosistemas conformados por humedales, lagunas o en general cuerpos de agua, son indispensables por su gran valor ambiental, la biodiversidad que los rodea y sus contribuciones a la vida en general, de manera ambiental, climática, ecológica, social, económica, científica y cultural, aportan al desarrollo sostenible y al bienestar general de la humanidad (Batista, 2022).

Dada la importancia que representan estos ecosistemas, surge la necesidad de conocer su comportamiento y las variables que intervienen en procesos de contaminación dentro de estos cuerpos de agua, lo cual se puede generar a razón de dos criterios como lo son; las características propias de la zona y la intervención humana, que repercuten negativamente en el cuerpo de agua, excediendo su capacidad natural para la eliminación de material contaminante, generando un afloramiento y por ende acumulación de este, lo que llevaría a establecer el estado trófico y por ende categorización de contaminación que se presenta en este tipo de ecosistemas (Wenbin, 2015).

Según la EPA (2022) los contaminantes contenidos en el cuerpo de agua catalogan el tipo de contaminación que este presenta, en caso de que elementos como el nitrógeno y el fósforo sean los componentes contaminantes con mayor presencia, se cataloga como

contaminación por nutrientes, estos elementos serán los encargados de generar la eutrofización, lo que corresponderá al aumento de materia orgánica, como lo son plantas y algas, desencadenando una reducción considerable en los niveles de oxígeno presentes en el agua a medida de que las plantas se desarrollan y mueren, conjuntamente se generaría una intoxicación del agua lo que desencadenaría la muerte de diversos organismos de flora y fauna presentes en el cuerpo de agua (AQUAE, 2022). En Colombia, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales-ANLA, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM y las Corporaciones Autónomas Regionales-CAR, se encargan de la gestión, monitoreo y control del recurso hídrico en el país.

Algunos de los parámetros clave para evaluar este fenómeno son los niveles de nitratos, cuya concentración permite clasificar los lagos según su nivel trófico. Los lagos oligotróficos tienen concentraciones de nitrato-nitrógeno menores a 0.3 mg/l NO₃-N, describiéndose como aguas limpias, pobres en nutrientes y con un ecosistema estable, aunque su potencial biológico es bajo. Las lagunas mesotróficas tienen concentraciones moderadas de nutrientes (0.3–0.5 mg/l NO₃-N), lo que garantiza tanto la calidad del agua como la variabilidad biológica. Los lagos eutróficos (0.5–1.5 mg/l NO₃-N) contienen mayores niveles de nutrientes, favoreciendo el crecimiento de algas y plantas acuáticas. Por último, los lagos hipereutróficos (> 1.5 mg/l NO₃-N) poseen una gran cantidad de nutrientes, lo que resulta en un crecimiento excesivo de algas, junto con serios problemas de oxígeno para la vida acuática. LG Sonic B.V. (2024).

Aunque estas entidades llevan a cabo planes de monitoreo del agua mediante muestras en el lugar, no se tiene presente la integración del uso de herramientas de percepción remota en sus procesos para vigilar el recurso hídrico (Uribe, 2022).

La teledetección permite evaluar la calidad del agua a través de la detección de compuestos ópticamente activos, es decir, aquellos que modifican la absorción y dispersión de la luz en la columna de agua. Entre las variables más comúnmente estimadas con esta técnica se encuentran la turbidez y los sólidos en suspensión, debido a su impacto directo en la reflectancia espectral.

Sin embargo, parámetros como el pH, el oxígeno disuelto, los nitratos y el fósforo no pueden detectarse directamente mediante teledetección. Su estimación se realiza de forma indirecta, ya que influyen en la concentración y composición de otros compuestos ópticamente activos, como el fitoplancton, los sedimentos y la materia orgánica disuelta. Estos, a su vez, alteran la señal espectral captada por los sensores remotos. Estudios previos han demostrado que, mediante modelos de correlación con estas variables ópticamente activas, es posible inferir con precisión la variación de estos parámetros fisicoquímicos en cuerpos de agua (Gao et al., 2024).

Este tipo de productos resulta ventajoso dada la cobertura geográfica de las imágenes, la continuidad en la información y mayor accesibilidad a territorios con dificultad de alcance, lo cual indicaría mayor facilidad en el proceso de monitoreo y asegurar la idea de generar un modelo que permita calcular este tipo de parámetros de manera remota, como herramienta complementaria a la toma de datos en campo (Briceño et al., 2018).

Desde el ámbito de la percepción remota, el procesamiento digital de imágenes satelitales mediante corrección y clasificación es fundamental para obtener información precisa y útil de ellas. Asegurarse de que los datos estén libres de distorsiones es el objetivo de la corrección radiométrica, geométrica y atmosférica. Además, la clasificación de imágenes posibilita la categorización automática de píxeles en diversas clases temáticas, lo que simplifica la producción de mapas temáticos y el análisis de coberturas terrestres, al igual que es una herramienta eficaz para la gestión de recursos naturales y la planificación urbana (Calzada, 2016).

Evaluar y monitorear la calidad del agua mediante métodos tradicionales es costoso, lleva mucho tiempo y no proporciona un panorama completo de su calidad en términos espacio temporales. Por esto, se destaca la evaluación de la calidad del agua mediante el uso de sensores remotos como una manera económica de monitorear su calidad, ya que permite hacer un seguimiento regular de amplias zonas en poco tiempo y repetidamente, empleando métodos más sofisticados, como la teledetección, para aumentar la eficacia y prontitud del seguimiento de la calidad del agua (Kapalanga et al., 2020).

5.2 Marco Teórico

A continuación, se especifican los modelos matemáticos empleados para el desarrollo de la metodología propuesta, con base en la revisión bibliográfica consultada adaptada a la estimación de material orgánico a partir de sensores remotos y datos de fuentes de información puntuales.

5.2.1 Cálculo de reflectividad a partir de radiación

Gil, (2018) habla de la reflectividad como la parte de la irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre y se refleja de nuevo a la atmósfera. El modelo presentado a continuación utilizará la ecuación de la reflectividad como índice entre la radiación que parte el suelo y la procedente del sol medida en la superficie del píxel.

$$\rho = \frac{\pi L_{sue,k}}{E_{0sue,k}} \quad (1)$$

Donde p_k es la reflectividad para la banda k . $L_{sue,k}$ es la radiancia que parte del suelo para la banda k y $E_{0sue,k}$ la irradiancia solar para la banda k al nivel del suelo. La introducción del número π permite tener en cuenta el carácter lambertiano de la reflectividad.

5.2.2 Índice de estado trófico

Toledo, J. (1990) propuso la modificación del IET de Carlson, basado en variables clave, determinada por la relación entre nutrientes presentes en cuerpos de agua y su nivel de eutrofización. Esta modificación tuvo como propósito darle aplicabilidad el IET de Carlson en sistemas acuáticos de climas cálidos tropicales (Mendoza et al., 2011).

$$IETMPt = \left(6 - \frac{\ln\left(\frac{80.32}{Pt}\right)}{\ln(2)}\right) \quad (2)$$

Tabla 1. Valores límites de la OCDE de clasificación trófica

Estado trófico	Media de Secchi (m)	P total (mg/m3)	Clorofila-a (mg/m3)	Estado trófico
Ultra	$S \geq 2,4$	$P \leq 8$	$CL \leq 1,17$	Ultra
Oligotrófico				Oligotrófico
Oligotrófico	$2,4 > S \geq 1,7$	$8 < P \leq 19$	$1,17 < CL \leq 3,24$	Oligotrófico
Mesotrófico	$1,7 > S \geq 1,1$	$19 < P \leq 52$	$3,24 < CL \leq 11,03$	Mesotrófico
Eutrófico	$1,1 > S \geq 0,8$	$52 < P \leq 120$	$11,03 < CL \leq 30,55$	Eutrófico
Supereutrófico	$0,8 > S \geq 0,6$	$120 < P \leq 233$	$30,55 < CL \leq 69,05$	Supereutrófico

Fuente. Toledo, J. (1990)

5.2.3 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretende explicar (López, 2017).

$$R^2 = t = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

Donde el numerador de la ecuación representa la varianza y el denominador, el error

de predicción.

5.2.4 Modelo de regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple supone que más de una variable tiene influencia o está correlacionada con el valor de una tercera variable, esperando que los sucesos tengan una forma funcional presentada en la ecuación:

$$y_j = b_0 + b_1x_{1j} + b_2x_{2j} + \dots + b_kx_{kj} + u_j \quad (5)$$

donde y es la variable endógena, x las variables exógenas, u los residuos y b los coeficientes estimados del efecto marginal entre cada x e y . (Montero, 2016)

5.2.5 Error de raíz cuadrática media

El RMSE, o error cuadrático medio, es una medida estadística comúnmente usada para evaluar el desempeño de modelos predictivos en diferentes áreas como la climatología, calidad del aire y meteorología. Para obtener el RMSE, se debe tomar la raíz cuadrada del ECM (Error Cuadrático Medio). Para una muestra de n observaciones, y_i para cada i que pertenece al conjunto $\{1, 2, \dots, n\}$, y n , número de predicciones del modelo correspondiente (Hodson, 2022).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

5.2.6 Error cuadrático medio

El Error Cuadrático Medio, ECM, es una medida de evaluación empleada en problemas de regresión para cuantificar la exactitud de un modelo predictivo. El cálculo se realiza tomando el promedio de los cuadrados de las discrepancias entre los valores reales y los valores estimados. Conceptualmente, el MSE responde al grado de error promedio obtenido en las predicciones. Esta medida castiga los errores grandes de forma más severa, lo cual la hace una herramienta útil para evaluar y comparar modelos de regresión (Madrigal, 2022).

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

5.2.7 Desviación estándar

La desviación estándar es empleada en la estadística descriptiva para calcular la variabilidad o dispersión de los puntos de datos individuales respecto a la media, y así determinar su extensión. Si la desviación estándar es baja, significa que los datos están muy próximos a la media; sin embargo, si la desviación estándar es alta, indica que hay una mayor dispersión de valores (Ortega, 2023).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

Donde x_i representa cada valor individual de la muestra. $\hat{x}$ representa la media aritmética de la muestra y n , el número de observaciones en la muestra.

5.2.8 Promedio

Se puede definir el promedio, o media aritmética, como un valor que representa de manera representativa un conjunto de números. El promedio se obtiene sumando todos los valores en el conjunto y dividiendo la suma entre la cantidad de elementos. Es un dato central que señala el promedio de los valores (Westreicher, 2021).

$$Promedio = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9)$$

5.2.9 Cuartiles

El conjunto de observaciones se divide en cuatro partes iguales mediante tres puntos llamados cuartiles (Q_m). Q_1 , Q_2 y Q_3 son los nombres que se utilizan para representar estos puntos. Cada cuartil representa una fracción del conjunto de datos: Cada cuartil representa una fracción del conjunto de datos: El primer cuartil se encarga de dividir el 25% inicial de los datos. El segundo cuartil, también conocido como la mediana, divide los datos en dos partes iguales. El tercer cuartil representa el 75% superior de los datos, dejando el 25% restante debajo de este valor. En pocas palabras, los cuartiles dividen un conjunto de observaciones en cuatro partes iguales. (Ballesteros, 2012)

5.2.10 Valores aleatorios dentro de un intervalo

Para la generación de valores aleatorios en Excel, se hace uso de la función 'ALEATORIO ()', la cual produce un valor aleatorio entre 0 y 1 y multiplicándose por el rango ($b - a$) se configura en el valor requerido. Por último, la suma de a ajustará el valor al rango

exacto dentro de 'a' a 'b', siendo estos los cuartiles 1 y 3 respectivamente.

$$X = a + ALEATORIO() * (b - a) \quad (10)$$

5.2.11 Valores aleatorios dentro de un intervalo

En la regresión lineal múltiple el estadístico F es una herramienta importante al que se le utiliza para determinar la relación que puede haber entre una o más de una variable de predicción y una variable dependiente. El estadístico F se utiliza para comparar las varianzas de dos modelos: Un modelo que considera los predictores que integran el modelo completo y otro que no lo hace (modelo parcial). En particular, está basado en una hipótesis nula de que los coeficientes de regresión son todos iguales a cero (es decir, la relación entre los predictores y la variable respuesta es nula). (James et al., 2017)

$$F = \frac{(TSS - RSS)/p}{RSS/(n-p-1)} \quad (11)$$

Donde: TSS es la suma total de cuadrados, RSS es la suma de cuadrados residuales, p es el número de predictores en el modelo y n es el número total de observaciones.

5.3 Marco referencial

En el año 2016, Briceño et al. (2018) realizaron un estudio de la distribución espacial y la dinámica de los parámetros de calidad del agua del lago Vichuquén, Chile, utilizando imágenes satelitales del sensor OLI de Landsat-8. Realizaron recolecciones de muestras de campo, análisis en laboratorios y procesamiento de imágenes satelitales, lo que les permitió concluir que los procedimientos llevados a cabo fueron esenciales para conocer la variabilidad espacial de los parámetros de calidad de agua medidos con los datos satelitales, así como la influencia en el aumento de la eutrofización del lago, lo cual se debe, por un lado, a la estacionalidad, y por otro, a los diferentes usos de suelo tales como la reforestación de pino y eucalipto, actividades agrícolas y áreas urbanas cercanas.

Por su parte, Pieri et al. (2021) haciendo uso de la teledetección (sensores satelitales ópticos de resolución espacial media-alta OLI de Landsat-8 y MSI de Sentinel-2), realizaron un estudio para analizar el impacto de los principales factores que influyen en la estimación del índice (TRIX) TRophic IndeX en el Mediterráneo, el cual integra numerosos parámetros del agua relacionados con los procesos tróficos que ocurren en los ecosistemas marinos en los puertos italianos de Civitavecchia y Viareggio en el año 2017 hasta el 2019. Se tomaron mediciones espectrales in situ y procesamiento de imágenes a partir de los que concluyeron

que las configuraciones espectrales de OLI y MSI tienen un impacto marginal en la estimación de TRIX, mientras que los efectos principales son causados por las diferentes características espaciales y temporales de los dos sensores.

Del mismo modo, Sòria-Perpinyà et al. (2019) emplearon la teledetección como herramienta óptima para el seguimiento continuo del estado de calidad de la masa de agua apoyándose de imágenes satelitales del sensor Sentinel. Realizaron el monitoreo del estado de eutrofización y calidad del agua de la laguna de Albufera, España en un periodo de tiempo desde el 2016 hasta el año 2017. Se realizó un muestreo de campo, recolectando datos referentes a conductividad, profundidad del disco de Secchi y datos hidrológicos de la zona de estudio con sus respectivos análisis de laboratorio, posteriormente realizaron la corrección atmosférica para las imágenes satelitales y procesamiento de estas, seguidamente se realiza la validación de datos a partir de la comparación entre los resultados obtenidos y los datos in situ.

Finalmente lograron concluir que existía una correlación lineal entre los datos de campo y los estimados a partir de las imágenes satelitales, de igual manera a partir de la información temática resultante se determinó un patrón bimodal anual donde la disminución de clorofila está determinada por un aumento notable de la renovación del agua del lago o por una extinción de los nutrientes disponibles debido a un crecimiento excesivo del fitoplancton.

Por otra parte, Franco et al. (2023) haciendo uso de las tecnologías de los sensores remotos, sus diferentes implementaciones y apoyándose en las nuevas tecnologías basados en el internet y algoritmos. Realizaron el monitoreo de la calidad del agua para garantizar un suministro de seguro y limpio de este recurso para el consumo humano en los países latinoamericanos donde enfoque principal fue en el control de la contaminación fisicoquímica de los acuíferos en donde cabe destacar que los principales parámetros a estudiar fueron la temperatura, pH, Conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, Sólidos suspendidos totales, Metales pesados y Contaminantes orgánicos

6. METODOLOGÍA

6.1 Localización.

La Laguna de Sonso se encuentra ubicada en el municipio de Guadalajara de Buga, como parte de la Dirección Ambiental Regional (DAR) Centro Sur. Además, forma parte de la Unidad de Gestión de Cuencas de Guadalajara-San Pedro. Este distrito forma parte del complejo de humedales de la cuenca alta del río Cauca, que es una subcuenca del río Magdalena. Se localiza en el centro geográfico del Valle del Cauca, específicamente en los

corregimientos de El Porvenir y El Vínculo. (Figura 1), con coordenadas 3°51'43"N 76°20'57"O, tiene una extensión aproximada de 2.045 Ha. De esta área, 745 hectáreas se encuentran en la zona de la laguna y 1.300 hectáreas corresponden a la zona de amortiguamiento. Cuenta con una profundidad media de 1.60 metros, a una altitud de 940 metros sobre el nivel del mar y con una longitud de norte a sur aproximada de 6000m.

El clima prevalente es del tipo húmedo tropical, con una temperatura promedio de 23°C, y una humedad relativa del 75% siendo un espacio atractivo para diversas especies donde se han registrado aproximadamente 118 especies terrestres, de las cuales 98 son residentes y 20 son migratorias. En cuanto a los mamíferos, se han registrado 16 especies, el grupo más diverso es el de los murciélagos con ocho especies. por este motivo la Laguna de Sonso, es catalogada como reserva natural por su gran valor ecológico y su gran importancia como uno de los principales refugios de especies en Colombia (SIDAP Valle del Cauca, 2023).

El aporte del agua está dado por tres principales contribuyentes que son; las aguas subterráneas, precipitación y varios tributarios derivados de los ríos Guadalajara y Sonso. En el río Guadalajara existen ocho derivaciones de agua, de las cuales tres de ellas, El Albergue, La Julia y El Chircal, alimentan el área de captación de la Laguna de Sonso y desembocan en las acequias conocidas como Sepulturas, Guayamaral y Guayabito, así como en el zanjón Maldonado. Por otro lado, el río Sonso cuenta con nueve derivaciones de agua a través de bocatomas. Cinco de estas derivaciones, llamadas San Rafael, Niza, Holanda, El Recuerdo y La Palma, desembocan en la Laguna de Sonso mediante la acequia El Guayabito y el zanjón Garzonero. La quebrada Seca y la acequia El Vínculo son los únicos afluentes a la Laguna de Sonso que provienen de la cordillera Central (SIDAP Valle del Cauca, 2023).

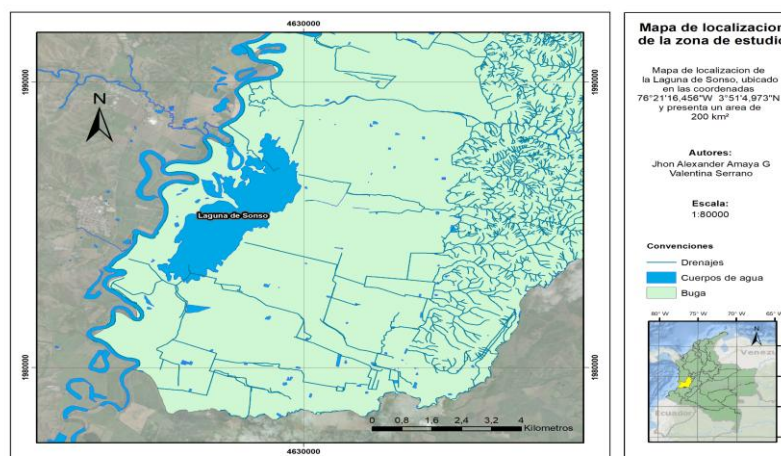


Figura 1. *Mapa de localización de la zona de estudio ubicado en el municipio de Buga, Valle del Cauca.*

Fuente. Elaboración propia

Siendo la laguna de Sonso el humedal de mayor relevancia a lo largo del valle aluvial del río Cauca, se establece este cuerpo de agua como área de estudio, ya que se han encontrado registros recientemente de niveles preocupantes de materiales orgánicos y potencialmente contaminantes, lo que significa una amenaza para este ecosistema dado que como se ha mencionado, es hogar de diversas especies de fauna y fuente de agua potable.

6.2 Materiales y equipo

Con el objeto de dar cumplimiento al proyecto se inició con la fase de recopilación de datos la cual precisa de diferentes fuentes de información empezando por los datos in-situ entre los periodos comprendidos (2013-2022) y la localización de las estaciones de muestreo suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Posteriormente se extrajo del portal de code.earthengine.google.com las imágenes satelitales Landsat 8 Nivel 2, Colección 2, Nivel 1 que abarcaron la totalidad del área donde se encontraban ubicadas las estaciones de muestreo en los periodos comprendidos (2013-2023), descartando las imágenes con alto porcentaje de nubosidad y obteniendo los valores de píxel en reflectancia.

Culminada la fase de recopilación de datos, se prosiguió con la fase de postproceso en la que se empleó el programa QGIS Desktop 3.36.0 con el fin sustraer los datos de píxel en las localizaciones de las estaciones de muestreo para poder realizar una relación de los diferentes parámetros a estudiar (pH, turbiedad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, nitratos, fósforo total) entre estos insumos en los periodos de tiempo mencionados con anterioridad, se empleó la herramienta ofimática Excel para hacer la agrupación de los datos los cuales se subieron a Google Drive en donde para finalizar se empleó la herramienta gratuita Colab (Google Colaboratory) para realizar el análisis de los datos empleando regresiones lineales múltiples, determinando la ecuación para cada parámetro y la validación a partir del 20% de los datos suministrados de forma aleatoria al igual que la utilización de la información más actualizada hasta el momento

6.3 Procedimientos

Para la implementación de un modelo que permita obtener información acertada respecto a los parámetros anteriormente mencionados a partir de imágenes satelitales para la Laguna de Sonso, se adoptó la metodología presentada a continuación (Figura 2).

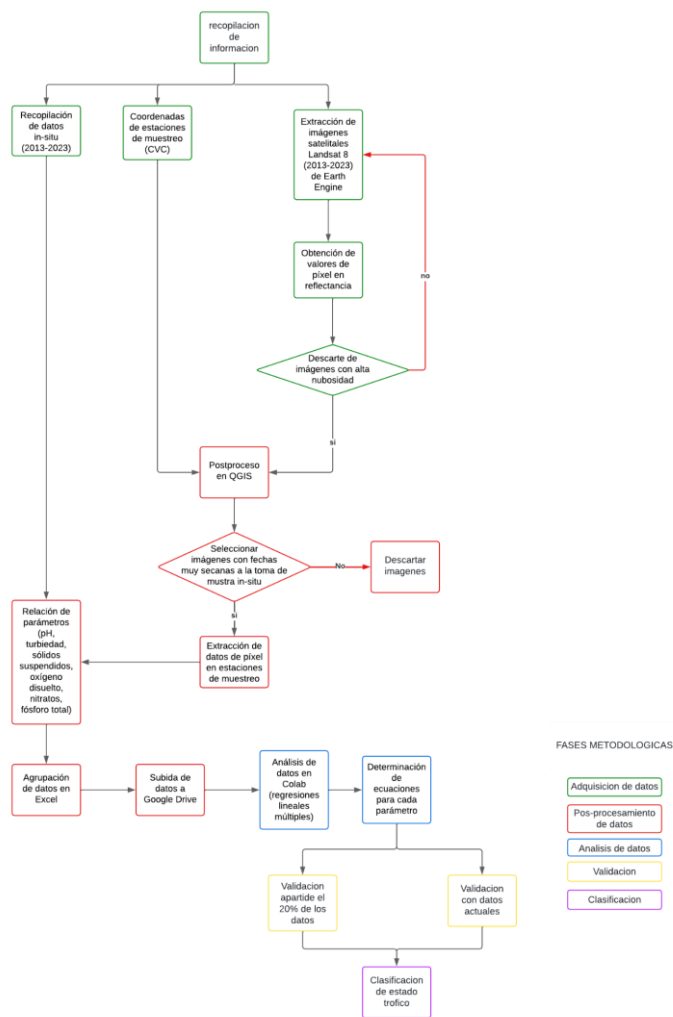


Figura 2. Flujograma de la metodología.

Fuente. Elaboración propia

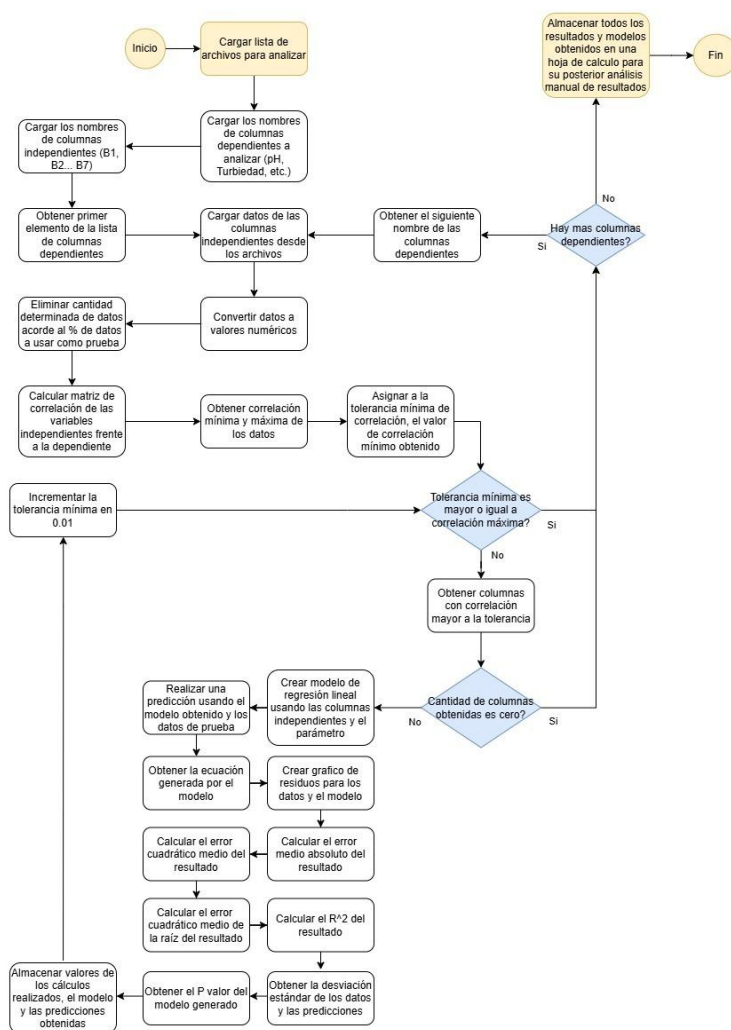


Figura 3. *Flujograma de análisis de datos en colab.*

Fuente. Elaboración propia

6.3.1 Recopilación de información

Primeramente, se extraen dos tipos de información: las mediciones in-situ o mediciones en campo y las imágenes satelitales que concuerdan tanto con el área de estudio como con la fecha de las muestras realizadas en campo.

Los datos de campo fueron proporcionados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), quienes cuentan con información georreferenciada respecto a parámetros biológicos para la Laguna de Sonso. En total, se identificaron diez zonas de interés, interés de acuerdo con la tabla 2, estos puntos representan las estaciones de muestreo como se muestra en la figura 4 y anexo 1 ensayos de laboratorio CVC.

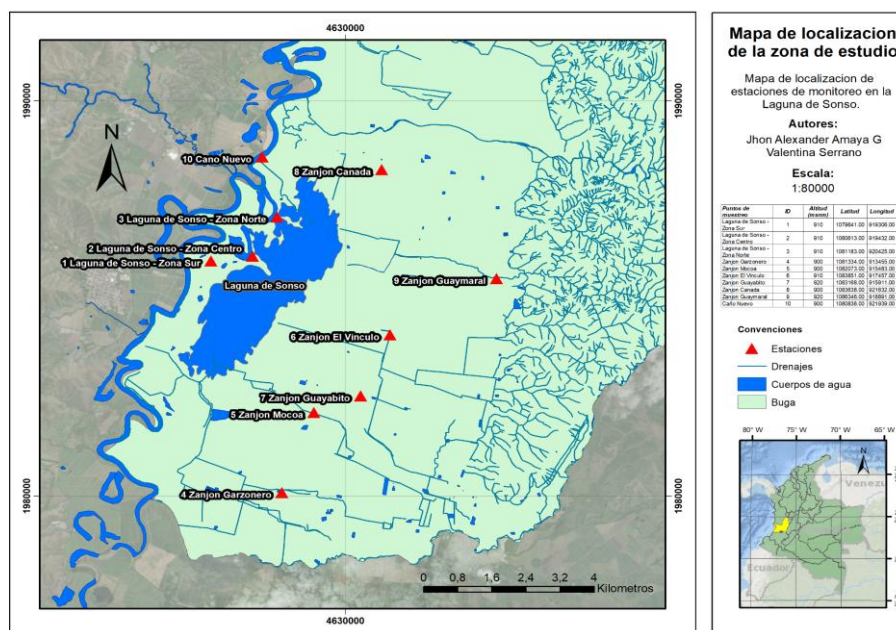


Figura 4. Mapa de localización de las estaciones de muestreo en la zona de estudio ubicada en el municipio de Buga, Valle del Cauca.

Fuente. Elaboración propia

Tabla 2. Ubicación geográfica de los diez puntos de las estaciones de muestreo y toma de muestras de agua utilizados en este estudio.

Puntos de muestreo	ID	Altitud (msnm)	Coordenadas Planas Este	Coordenadas Planas Norte
Laguna de Sonso - Zona Sur	1	910	1079641.00	919306.00
Laguna de Sonso - Zona Centro	2	910	1080613.00	919432.00
Laguna de Sonso - Zona Norte	3	910	1081183.00	920425.00
Zanjon Garzonero	4	900	1081334.00	913455.00
Zanjon Mocoa	5	900	1082073.00	915483.00
Zanjon El Vinculo	6	910	1083851.00	917457.00
Zanjon Guayabito	7	920	1083168.00	915911.00
Zanjon Canada	8	900	1083638.00	921632.00
Zanjon Guayamaral	9	920	1086346.00	918891.00
Caño Nuevo	10	900	1080836.00	921939.00

Fuente. Elaboración propia

El monitoreo in-situ consiste en el seccionamiento de la información por año y así mismo en cada fecha de muestreo donde se presentan los datos de cada parámetro Ph (Unidad), nitratos (mg N-NO₃/l), turbiedad (Unidad), sólidos suspendidos (mg SST/l), oxígeno disuelto (mg O₂/l) y fósforo (mg P/l) por cada una de las estaciones de monitoreo dentro de la extensión de la Laguna de Sonso (CVC, 2023).

La recopilación de las imágenes satelitales se realizó en el entorno de Google Earth Engine (GEE), una plataforma gratuita y de libre distribución para el análisis científico y visualización de datos geoespaciales. El programa utiliza Java Script como lenguaje de programación (Gorelick et al., 2017).

Para la selección de las imágenes satelitales se estableció los siguientes parámetros: imágenes cuya fecha de adquisición fuese la más cercana posible a la toma de datos in situ al igual que deberá poseer una nubosidad inferior al 10%. Dado que las condiciones climáticas de la zona, dificultaron la definición de una ventana de tiempo fija para la obtención de las imágenes, por ende se optó por aquella con menor cobertura nubosa dentro del rango temporal más próximo a la toma de datos en campo (Rodríguez Miranda et al., 2022).

Se escogió el sensor Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y Thermal InfraRed Sensor (TIRS), las imágenes satelitales datan desde el año 2013 al 2023, de acuerdo a la tabla 3 presentamos el conjunto de datos los cuales contiene 5 bandas de infrarrojo cercano y visible (VNIR) y 2 bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) procesadas para obtener reflectancia de la superficie ortorrectificada estas cuentan con una resolución espacial de 30 metros, y una banda de infrarrojo térmico (TIR) procesada para obtener temperatura de la superficie ortorrectificada con una resolución espacial de 100, de estas solo se tomarán las 7 primeras bandas, formato GeoTIFF y sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM).

Tabla 3. Rangos espectrales del sensor Landsat 8 (OLI/TIRS)

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Costera – Aerosoles	0.435 - 0.451	30
2	Azul	0.452 - 0.512	30
3	Verde	0.533 - 0.590	30
4	Rojo	0.636 - 0.673	30
5	Infrarrojo cercano	0.851 - 0.879	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30

Fuente: USGS

Tras aplicar el código diseñado (Anexo 2 Código de imágenes) se adquirieron imágenes en un solo nivel de procesamiento de Landsat 8 OLI en las fechas indicadas como se establece en el anexo N°3, correspondiente a los días más próximos entre imagen satelital y el estudio in-situ, acorde a la geometría que abarque las estaciones de muestreo, como se puede visualizar en la figura 5, junto con las características del sensor, presentadas en la tabla 3.

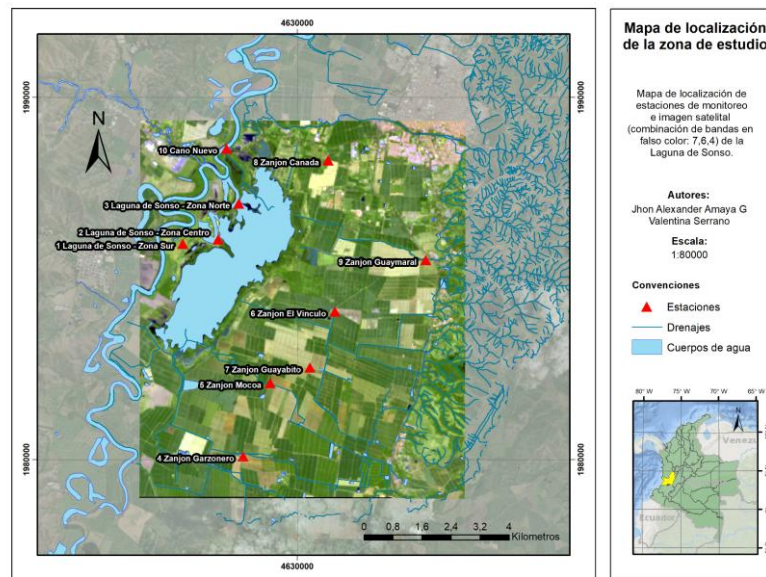


Figura 5. Mapa de localización de estaciones de monitoreo e imagen satelital (combinación de bandas en falso color: 7,6,4) de la Laguna de Sonso.

Fuente: Elaboración propia

Surface Reflectance (SR): es un set de datos de mayor nivel de procesamiento (LANDSAT/LC08/C02/T1_L2), Todos los productos de la Colección 2 SR cuenta con una corrección atmosférica usando (LaSRC) que corresponde a unos algoritmos de canal único creado conjuntamente por el Instituto Tecnológico de Rochester (RIT) y el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), que eliminan errores causados por la intervención de gases, aerosoles y moléculas, en la dispersión o absorción de la radiación electromagnética.

Para LaSRC, los datos auxiliares atmosféricos se asimilan de observaciones satelitales de los instrumentos MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua o de los instrumentos VIIRS a bordo de Suomi-NPP, NOAA-20 y NOAA-21. Se realizan interpolaciones tanto espaciales como temporales para ajustar estos datos auxiliares dentro del área terrestre fotografiada y el tiempo de adquisición de la imagen Landsat (USGS, 2024).

Los archivos están nombrados con el ID "_sr_" seguido de la designación de cada

banda. Todos los paquetes incluyen metadatos basados en el lenguaje de marcado extensible (xml).

Las imágenes corresponden al Nivel 2- Categoría T1, cuentan con calidad más alta disponible en el nivel de pre-procesamiento (adecuada para el análisis de series de tiempo) (NASA, 2019).

6.3.2 Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos es un paso indispensable en la evaluación del estado trófico de la Laguna de Sonso, ya que a partir de las imágenes satelitales es posible sustraer datos cuantificables que permitan un cálculo entre estos mismos y datos externos. En este punto se utilizan métodos digitales de análisis para obtener valores de reflectancia por cada banda y para determinar parámetros relevantes que contribuyen al diagnóstico del cuerpo de agua.

6.3.2.1 Procesamiento de imágenes

Este paso es fundamental, ya que, a partir del procesamiento de imágenes satélites, se puede obtener información sobre las condiciones ópticas del agua. Este análisis contempla la corrección atmosférica, la selección de bandas espectrales más adecuadas y la aplicación de métodos de interpretación de reflectancia, con el fin de obtener una caracterización del cuerpo de agua y determinar si existe relación con procesos de eutrofización.

6.3.2.1.1 Corrección geométrica

La corrección geométrica de una imagen (ortorrectificación) implica realizar modificaciones en la posición de los píxeles que la componen, con el objetivo de eliminar las anomalías de localización detectadas en la imagen. Las imágenes de Landsat-8, proporcionan datos calibrados con píxeles alineados geográficamente, actualmente la Colección 2 cuentan con una característica principal que corresponde a la implementación del proceso de imagen de referencia global (GRI) el cual es el tratamiento para la calibración geométrica de Sentinel-2, aplicado en todo el mundo desde agosto de 2021.

Lo que ha mejorado enormemente la geolocalización absoluta y el co-registro multitemporal de los productos que emplee esta técnica. Gracias al refinamiento geométrico mediante el GRI, todos los productos heredan el mismo rendimiento de geolocalización absoluta (Sentinel Online, 2024). Esto mejora la interoperabilidad del archivo Landsat tanto a lo largo del tiempo como con otros conjuntos de datos de detección remota (USGS, 2024).

6.3.2.1.2 Corrección radiométrica

Se refiere a los pre-procesamientos que modifican los valores de los niveles digitales (ND) originales, con el objeto de acercarlos a los que había presentes en la imagen en caso de una recepción ideal, la conversión de estos niveles digitales permite trabajar con variables físicas comparables en el tiempo.

El satélite Landsat 8 (OLI_TIRS) con código superficial (LaSRC), cuenta con correcciones radiométricas previas, de acuerdo a la tabla 4 presentamos las características correspondientes a los valores de resolución radiométrica de las imágenes contienen información de 16 bits, con rangos de reflectancia válidos de 7273 - 43636 estos fueron multiplicados por el factor 0.0000275 y uno aditivo de -0.2, con el fin de escalar dicha información a valores de reflectancia en un rango 0 a 1 como también se realizó en el estudio denominado un nuevo enfoque de modelado basado en teledetección para la determinación del coeficiente de extinción de la luz del maíz hecho por (Costa-Filho et al., 2024), es relevante mencionar estos parámetros a razón de que los productos Landsat en el entorno de Google Earth Engine (GEE) varían en sus especificaciones.

El proceso de corrección radiométrica se implementó dentro del código de descarga de las imágenes satelitales como se puede evidenciar en el anexo 2 Código de igual manera se puede evidenciar a partir de la tabla 5 una diferencia significativa en los valores resultantes lo cual permite un mejor manejo de la información en el momento de operarlos entre ellos.

Tabla 4. Especificaciones de banda de productos científicos de nivel 2 (L2SP) de la Colección 2 (C2) Landsat 8-9

Designación de banda	Nombre de banda	Tipo de datos	Unidades	Datos	Rango válido	Multiplicador (Factor de escala)	Adición (Factor de adición)
				Rango			
ProductoID_SR_B 1	Banda 1 SR	UINT16	Reflectancia	1 – 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2
ProductoID_SR_B 2	Banda 2 SR	UINT16	Reflectancia	1 – 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2
ProductoID_SR_B 3	Banda 3 SR	UINT16	Reflectancia	1 – 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2
ProductoID_SR_B 4	Banda 4 SR	UINT16	Reflectancia	1 – 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2
ProductoID_SR_B 5	Banda 5 SR	UINT16	Reflectancia	1 – 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2
ProductoID_SR_B 6	Banda 6 SR	UINT16	Reflectancia	1 - 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2

ProductoID_SR_B	Banda 7	UINT16	Reflectancia	1 - 65535	7273 - 43636	0.0000275	-0.2
7	SR						

Fuente: USGS

Tabla 5. Comparación de resultado de la corrección radiométrica de los valores de las bandas sin corregir (digitales) y corregidas (reflectancia) de la imagen satelital (LC08_009057_20230525)

Imagen satelital (Sin corrección)								Imagen satelital (Con corrección)						
ID	Band_1	Band_2	Band_3	Band_4	Band_5	Band_6	Band_7	Band_1	Band_2	Band_3	Band_4	Band_5	Band_6	Band_7
1	8648	87506	9744	9320	19614	16693	12442	0,03782	0,04079	0,06796	0,0563	0,33939	0,25906	0,14215
2	9071	9254	10087	10460	16759	18051	14195	0,04945	0,05449	0,07739	0,08765	0,26087	0,2964	0,19036
3	8131	8207	8966	8418	18864	13375	9919	0,0236	0,02569	0,04656	0,03149	0,31876	0,16781	0,07277
4	9109	9249	9712	9812	13711	15401	12868	0,0505	0,05435	0,06708	0,06983	0,17705	0,22353	0,15387
5	8743	8919	9415	9596	13491	14891	12386	0,04043	0,04527	0,05891	0,06389	0,171	0,2095	0,14061
6	8164	8387	9535	8986	19375	14075	10726	0,02451	0,03064	0,06221	0,04711	0,33281	0,18706	0,09497
7	9220	9462	10204	10387	15192	16809	13794	0,05355	0,06021	0,08061	0,08564	0,21778	0,26225	0,17934
8	8296	8466	9623	9124	19527	15398	11536	0,02814	0,03282	0,06463	0,05091	0,33699	0,22345	0,11724
9	8720	9179	10083	10298	17174	15833	12385	0,0398	0,05242	0,07728	0,0832	0,27229	0,23541	0,14059
10	8283	8538	9688	9437	16161	11304	9344	0,02778	0,03479	0,06642	0,05952	0,24443	0,11086	0,05696

Fuente: Elaboración propia

6.3.2.1.1 Proyección

Una vez realizada la descarga de las imágenes mencionadas anteriormente se procedió a emplear el programa QGIS para el proceso Proyección que implica la conversión matemática del sistema de referencia espacial de un mapa o ráster a otro sistema de

coordenadas, lo que permite alinear este conjunto de datos con otros que posean sistema de coordenadas inicialmente diferente (Odonohue, 2023).

Para cada imagen satelital se realizó la reproyección ajustándose al sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Zona Occidente Colombia (EPSG:3115).

6.3.2.1.2 Extracción de información de imágenes satelitales

Al igual que el paso anterior, se utilizará el programa QGIS, donde se emplea el complemento 'Point sampling tool', el cual extrae los valores de píxel puntuales utilizando la localización de las estaciones de muestreo de acuerdo con la Figura 5, como punto de referencia en archivo 'Shape file', sobreponiendo estos a las imágenes satelitales, generando así un archivo 'gpkg' con la totalidad de los valores de las bandas por cada imagen satelital asociados a los puntos de referencia para seguidamente exportar la Información del archivo en formato xlsx.

6.3.2.2 Depuración de información in-situ

Continuando con la secuencia de la metodología planteada, se utiliza la herramienta ofimática Excel donde se procede a condensar la información relevante de los documentos suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) la cual estará estructurada de la siguiente manera:

Se generó un archivo xlsx por cada estación de muestreo nombrándola como se menciona en la columna Punto de muestreo acorde la Tabla 2. Se procedió a asociar cada año de estudio, dentro del periodo de muestra, con el valor obtenido en campo por parámetro, al igual que su respectivo número de muestra de acuerdo con el Anexo 4. Se eliminaron los datos asociados cuando el valor obtenido en campo sea nulo, o no exista el estudio fisicoquímico en las estaciones de muestreo entre los periodos 2013-2022.

Respecto a valores atípicos, el estudio de Sanjeev et al. (2023), lo define como el valor que se aleja notablemente del resto de los datos en un conjunto, y puede tener una fuerte influencia en los resultados obtenidos.

En consecuencia, resulta imprescindible eliminarlo o corregirlo previo al análisis, esto con el fin de evitar cualquier tipo de sesgo. Detectar valores atípicos en el muestreo de una encuesta es importante, debido a su potencial impacto significativo en los resultados estadísticos, ya que pueden revelar patrones inesperados o divergentes dentro de los datos. Se empleó el método del rango intercuartil (IQR) con el Manejo de valores atípicos de errores. en este método, todos los errores deben eliminarse o corregirse.

Si hay datos disponibles dentro de los valores significativos, entonces la entrada original de los datos apunta a evitar una pérdida significativa de información por eliminación lo que corresponde al mismo dato atípico. Si los datos presentan algún error, entonces el

mejor método es simplemente eliminar las entradas lo que para este proyecto corresponde a las fechas en las que no se realizaron análisis de los parámetros en la estación de monitoreo, este criterio no aplicará en caso de generar irregularidad en el tamaño de la muestra en relación con cada parámetro.

De acuerdo a este método es posible identificar cualquier valor que esté por encima o por debajo del rango definido como (Percentil 25 - $1,5 \times \text{IQR}$) o límite inferior a (Percentil 75 + $1,5 \times \text{IQR}$) o límite superior como se puede apreciar en la figura 6 que correspondería a los datos atípicos. El cálculo del IQR se realiza tomando la diferencia entre el percentil 75 y el percentil 25. En el tratamiento de valores atípicos, es necesario eliminar o corregir cualquier error que se encuentre. Si los datos disponibles están dentro de valores aceptables, se deberá evitar la pérdida de información relevante reemplazando únicamente aquellas entradas con errores en lugar de eliminar todas (Anexo 5).

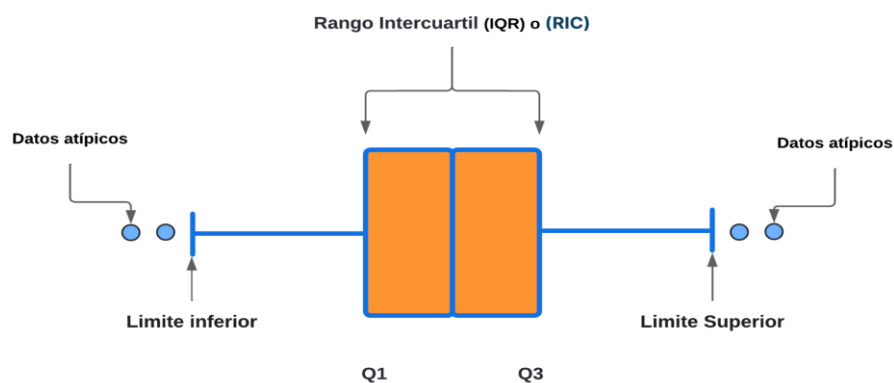


Figura 6. Esquema de distribución de rangos intercuartil y posición de datos atípicos

Fuente. Elaboración propia

6.3.3 Asociación de información

Tomando la información generada, se procede a unir la información en un solo archivo xlsx por cada estación de muestreo, utilizando como parámetro de asociación la fecha de los estudios in-situ, donde se tendrá la siguiente disposición de la información:

- Fecha de toma de muestra.
- Parámetro seleccionado con su respectiva unidad de medida.
- Bandas
- Número de muestra

Para este proyecto se generaron 10 archivos xlsx correspondientes a cada una de las estaciones de monitoreo y uno adicional para un análisis general de acuerdo con el anexo

6, donde cada una de estos corresponderá a las fechas más próximas entre imagen satelital y análisis de laboratorio como se puede evidenciar en el anexo 3.

6.3.4 Extracción valores de reflectancia

La corrección atmosférica es un procedimiento que tiene como objetivo corregir el efecto de dispersión de energía electromagnética en algunos gases atmosféricos (vapor de agua, dióxido de carbono y ozono) suspendidos en la atmosfera, permitiendo de esta manera, restar de la imagen los valores que éstos agregan a los datos propios de la imagen (Bellido, 2019). La corrección geométrica de una imagen (ortorrectificación), incluye cualquier cambio de posición de los píxeles que la conforman, para eliminar la anomalía de la localización detectada en la imagen. La corrección geométrica de imágenes puede abordarse partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control, en este caso el error se estima individualmente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

Bellido (2019), también define las correcciones radiométricas como parte del preprocesamiento, en donde se modifican los valores de los niveles digitales (ND) originales, con el objeto de acercarlos a los que había presentes en la imagen en caso de una recepción ideal, la conversión de estos niveles digitales permite trabajar con variables físicas comparables en el tiempo.

Una vez que se corrijan las imágenes, se extraerá el área de estudio y luego se recortará utilizando una máscara en formato 'shape'. Con el objetivo de obtener un ráster particular para cada imagen que contenga solo el área de estudio definida. Asegurando la georreferenciación precisa a lo largo del ráster, se establecen puntos de control sobre esta área. No solo garantiza la generación de resultados más representativos para el estudio, sino que también agiliza todo el procesamiento subsiguiente sobre estos ráster. Seguidamente, se extraen los valores de reflectancia en las diferentes bandas espectrales para cada punto de muestreo. Dado que el modelo a implementar trabaja exclusivamente con datos de reflectancia, este paso es crucial.

Respecto a los datos de campo se clasifican por año (2013 a 2023) y por estación de muestreo, recopilando los valores de cada parámetro de interés. Esta clasificación facilita la depuración y organización de la información proporcionada por la CVC en un rango de tiempo y parámetros más específicos, alineados con los objetivos del estudio. Se procede a tomar el valor de reflectancia para cada estación de muestreo, garantizando que las fechas de las imágenes coincidan lo mejor posible con las fechas de los muestreos. Considerando esta idea, se realiza un análisis de correlación a través de un gráfico de dispersión para encontrar el modelo matemático que se ajuste mejor a la estimación de cada parámetro relevante. El

coeficiente de determinación se utiliza como referencia para evaluar el grado de ajuste del modelo una vez más.

6.3.5 Análisis de regresión lineal múltiple

Se realiza un análisis exploratorio de los datos para encontrar las variables de reflectancia que pueden estar relacionadas con los parámetros de interés. Puede incluir gráficos de dispersión, matrices de correlación y análisis de componentes principales, empleando técnicas de selección de variables, tales como la eliminación hacia atrás, la selección hacia adelante o la selección paso a paso, con el fin de identificar las bandas espectrales más pertinentes para cada parámetro orgánico. La multicolinealidad entre las variables independientes se evaluará a través de la consideración de los valores de tolerancia y el factor inflación de la varianza (VIF).

Cada parámetro orgánico seleccionado tendrá un modelo de regresión lineal múltiple ajustado, que emplea una o varias de las bandas presentes en el sensor Landsat 8, implementando los valores de reflectancia en las bandas espectrales identificadas durante la selección de variables como variables independientes. Los coeficientes del modelo serán estimados utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), minimizando la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y predichos por el modelo. Se utilizarán estadísticas como el coeficiente de determinación ajustado (R^2), el error estándar de estimación (SEE) y pruebas de significancia de los coeficientes para evaluar la calidad del ajuste del modelo.

El modelo será sometido a un análisis de residuos para comprobar la validez de los supuestos de la regresión lineal múltiple, como la normalidad de los residuos, homocedasticidad e independencia de errores. Se emplearán gráficos tales como los de residuos vs. ajustes, gráficos de residuos frente a. Se utilizan variables independientes y pruebas estadísticas, como la prueba de Shapiro-Wilk, para evaluar la normalidad de los residuos. Se utilizarán gráficos de dispersión y estadísticas de evaluación como el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (ECM) para comparar los valores predichos por el modelo con los valores observados en el campo.

Los coeficientes estimados del modelo se interpretarán para cada parámetro con el fin de comprender la relación entre las variables de reflectancia y los valores de campo. Se presentarán ecuaciones de regresión lineal múltiple para cada parámetro, las cuales mostrarán la relación cuantitativa entre las variables de reflectancia y los valores estimados en campo. Se podrá analizar detalladamente la relación entre los datos de reflectancia obtenidos de las imágenes satelitales y los valores de campo de los parámetros en la Laguna de Sonso con esta metodología, que proporciona ecuaciones de regresión lineal múltiple, las

cuales podrán utilizarse para predecir los valores de los parámetros orgánicos a partir de la información extraída de imágenes.

6.3.6 Análisis de Datos

A partir de los datos obtenidos en campo referentes a concentración de los diferentes parámetros de estudio, se podrá implementar la ecuación 2, lo cual permitirá obtener un valor referente al índice del estado trófico que presente la Laguna, de acuerdo con el valor final que se obtenga de esta ecuación, se definirá el nivel de eutrofización, según la clasificación presentada en la tabla 1.

6.3.7 Validación

La validación para este modelo se basa en realizar un contraste entre los datos que este arroja para cada parámetro orgánico, previamente establecidos, contra los datos obtenidos a partir de muestras que se tomaron propiamente en el área de estudio.

7. RESULTADOS

7.1 Datos atípicos

Según los 159 valores obtenidos a partir de la agrupación de los datos in situ, suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), se pudo evidenciar la presencia de valores irregulares, ya sea por motivos de la carencia del estudio en la zona para el parámetro en cuestión o porque el resultado corresponda a un valor atípico dentro de los años que abarcan (2013-2022).

Se optó por una visualización de los datos en gráfica 3D, ya que nos permite representar tres variables en un solo gráfico: parámetro (eje y), fecha (eje x) y estaciones de muestreo (eje z), así como los lugares de máxima o mínima incidencia de la concentración de partículas por parámetro (Cañada, 2010), siendo ésta la mejor forma para su interpretación.

De acuerdo con la figura 7 para el parámetro pH, figura 8 para el parámetro turbiedad, figura 9 para el parámetro sólidos suspendidos, figura 10 para el parámetro oxígeno disuelto, figura 11 para el parámetro nitratos y figura 12 para el parámetro de fósforo total, se determinó un porcentaje de datos no registrados entre el 6,67% y el 18,75%, según lo indicado en el anexo 8. Asimismo, se detectó que el porcentaje global por cada parámetro se encuentra entre el 6,29% y el 6,92%, como se evidencia en la tabla 6.

Posteriormente, se obtuvo un porcentaje de datos atípicos, dentro de la

multitemporalidad previamente mencionada, que oscila entre el 6,25% y el 20%, según lo registrado en el anexo 9; de manera consecutiva, se detectó que el porcentaje global de datos atípicos por cada parámetro se encuentra entre el 3,33% y el 11,33%, de acuerdo con la tabla 7.

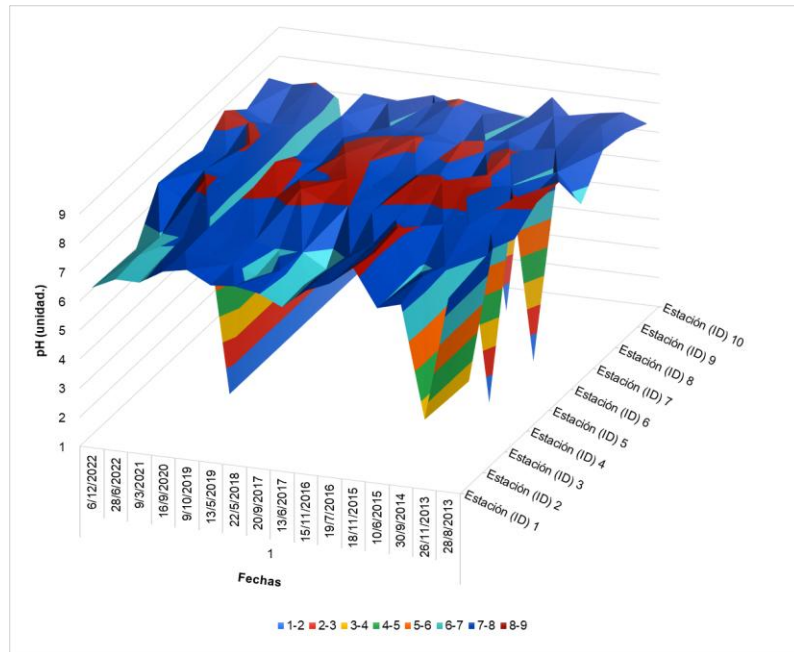


Figura 7. Distribución espacio temporal del parámetro pH (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo

Fuente. Elaboración propia

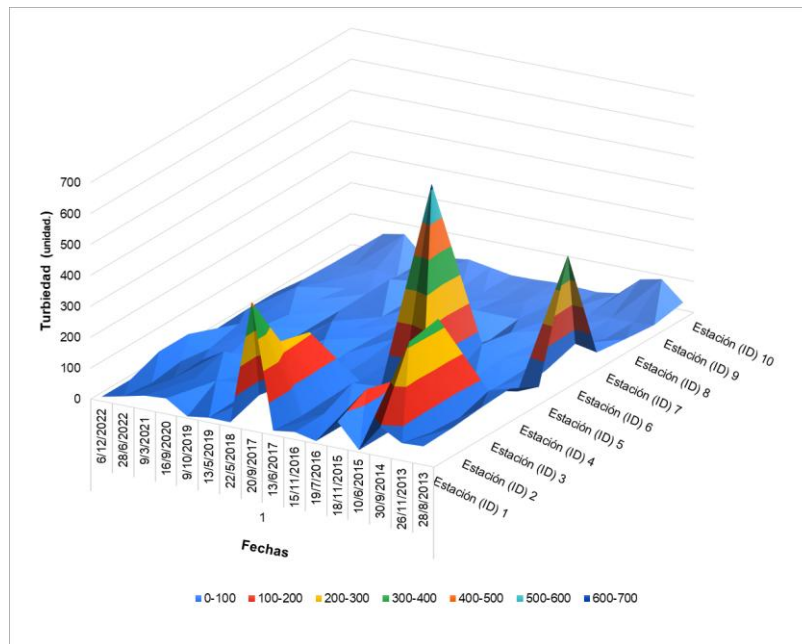


Figura 8. Distribución espacio temporal del parámetro Turbiedad (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo

Fuente. Elaboración propia

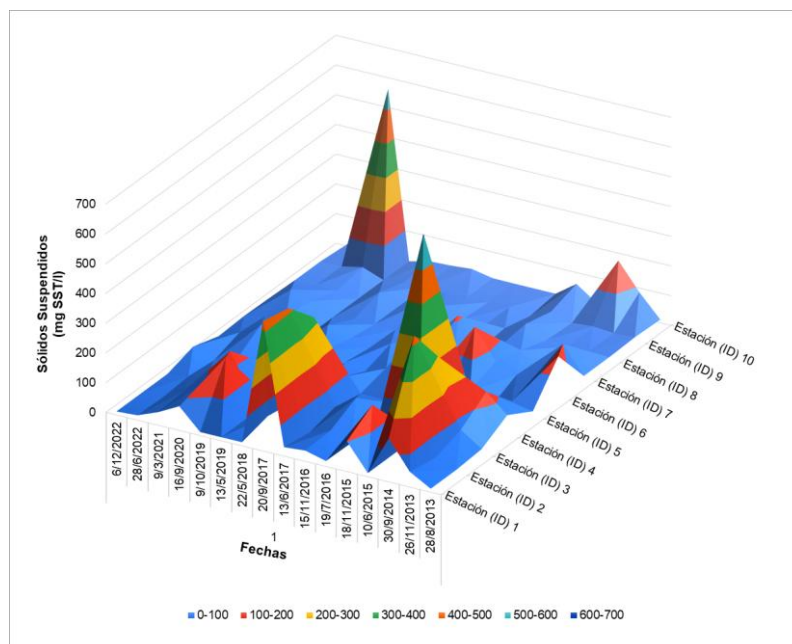


Figura 9. Distribución espacio temporal del parámetro Sólidos suspendidos (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo

Fuente. Elaboración propia

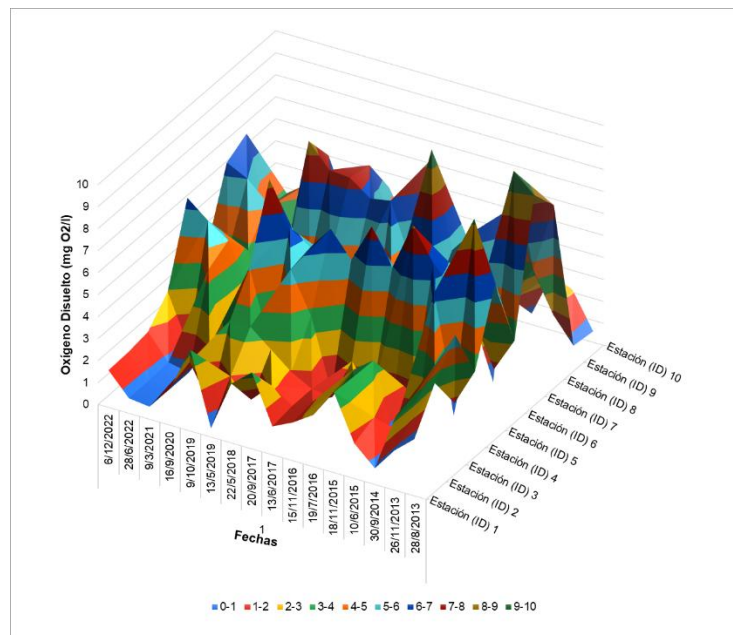


Figura 10. Distribución espacio temporal del parámetro Oxígeno disuelto (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo

Fuente. Elaboración propia

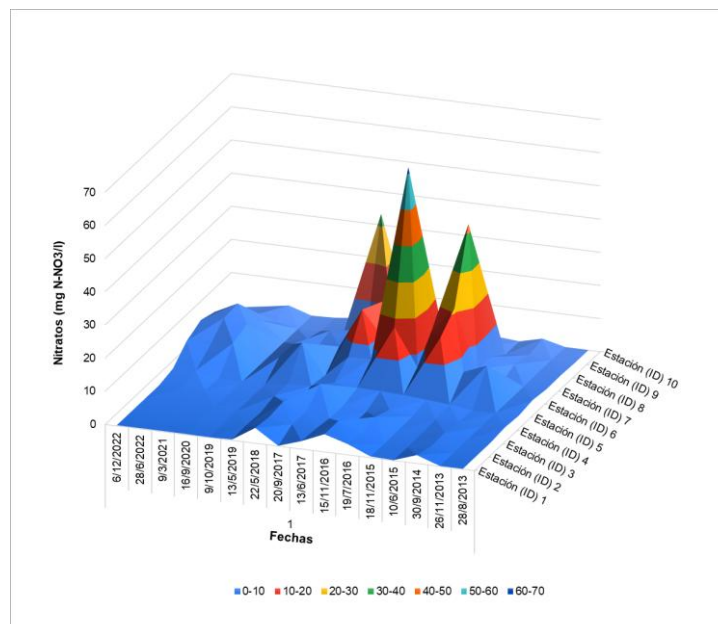


Figura 11. Distribución espacio temporal del parámetro Nitratos (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo.

Fuente. Elaboración propia

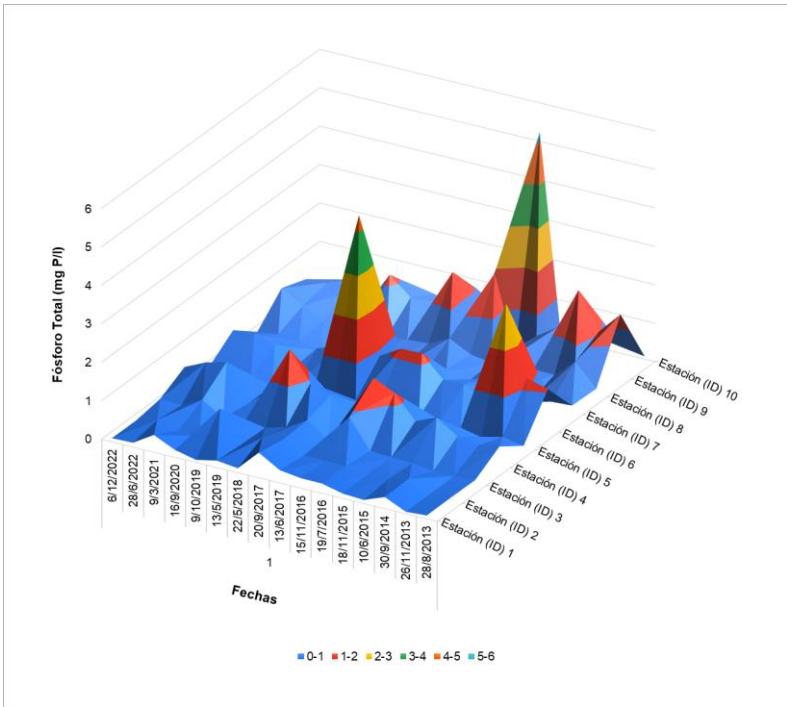


Figura 12. Distribución espacio temporal del parámetro Fósforo Total (in-situ) en la laguna de sonso en los años comprendidos entre (2013-2022) en las diferentes estaciones de monitoreo

Fuente. Elaboración propia

Tabla 6. Distribución porcentual global de datos no registrados por parámetro entre los años comprendidos en (2013-2022)

Parámetro	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendedos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
Pérdida de información global por parámetro en (%)	6,92	6,29	6,29	6,29	6,92	6,29

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Distribución porcentual global de datos atípicos por parámetro entre los años comprendidos en (2013-2022)

Parámetro	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendedos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mgO2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
-----------	--------------	-----------------	--------------------------------	---------------------------	-----------------------	------------------------

Pérdida de información global por parámetro en (%)	7,56%	8,00%	11,33%	3,33%	8,05%	8,00%
--	-------	-------	--------	-------	-------	-------

Fuente: Elaboración propia

Una vez detectados los valores atípicos, se procede a reemplazarlos por valores aleatorios dentro de los rangos inferior y superior del método de rango intercuartil (IQR) dado que la cantidad de datos disponibles por la CVC eran limitados para la generación de un modelo regresión lineal múltiple fiable, seguidamente, se excluyeron los valores faltos de análisis, donde se obtuvieron los registros finales correspondientes a un total de 149 para cada parámetro.

7.2 Modelos matemáticos

Se generaron modelos matemáticos por medio de una regresión lineal múltiple por medio del código en colab empleando las 7 bandas espectrales relacionándolas con datos in-situ de cada uno de estos parámetros previamente mencionados. En la tabla 8 para zona del Sur, tabla 9 para la zona Centro, tabla 10 para la zona Norte, tabla 11 para la zona Garzonero, tabla 12 para la zona Zanjón Mocoa, tabla 13 para la zona Zanjón El Vínculo, tabla 14 para la zona Zanjón Guayabito, tabla 15 para la zona Zanjón Canadá, tabla 16 para la zona Zanjón Guaymaral, la tabla 17 para la zona Caño Nuevo y la tabla 18 para un análisis general de todas las zonas. Se presentan los valores de R^2 y la significancia entre los parámetros, al igual que el ECM y las bandas de las imágenes satelitales, donde se exponen los modelo con mayor asertividad generados.

Tabla 8. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zona Sur

Ecuación	R2	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = $0.2119 + 8.3212*B1 - 20.3713*B2 - 2.3973*B3 + 9.5185*B4 + 0.2971*B5 + 1.5972*B6 - 3.1288*B7$	0,1747	0,96123	0,0613
Nitratos In-Situ = $-0.1101 + 10.5306*B1 - 161.3513*B2 - 85.6389*B3 + 184.6398*B4 + 21.4246*B5 + 3.9535*B6 - 57.1407*B7$	0,5012	0,4208	0,0533
Oxígeno Disuelto In-Situ = $-0.0961 - 120.9208*B1 + 186.5501*B2 - 2.9293*B3 - 70.6817*B4 + 14.8679*B5 - 55.4940*B6 + 88.4362*B7$	0,4504	0,5277	0,0486
pH In-Situ = $6.4872 - 1.5891*B1 + 14.3055*B2 - 26.7833*B3 + 14.0233*B4 + 6.8642*B5 - 7.7837*B6 + 5.0549*B7$	0,7620	0,0445	0,0176

Sólidos Suspendidos In-Situ = -16.9200 + 825.5680*B1 -6742.6736*B2 + 284.3078*B3 + 2461.0179*B4 + 11.3472*B5 + 62.5522*B6 + 825.1089*B7	0,6767	0,1224	0,0271
Turbiedad In-Situ = 41.7447 + 780.6118*B1 -3671.9005*B2 -1950.8845*B3 + 2695.9395*B4 + 207.4081*B5 - 148.9147*B6 + 416.5022*B7	0,3443	0,7423	0,0608

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zona Centro

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 0.3723 + 16.2887*B1 -21.3188*B2 + 21.3409*B3 -21.0876*B4 - 1.2449*B5 -4.1927*B6 + 10.6520*B7	0,2441	0,8966	0,055
Nitratos In-Situ = -0.0446 + 115.0148*B1 - 144.8805*B2 + 185.5005*B3 -124.6451*B4 -8.3448*B5 -25.1619*B6 + 48.3159*B7	0,4867	0,4509	0,046
Oxígeno Disuelto In-Situ = 0.7381 + 73.0896*B1 -41.7769*B2 -58.6410*B3 + 95.0138*B4 + 13.6579*B5 -32.3109*B6 + 6.6549*B7	0,6226	0,1966	0,0288
pH In-Situ = 6.7270 -44.6695*B1 + 70.0863*B2 + 9.1912*B3 -42.5327*B4 - 0.1737*B5 -5.1707*B6 + 20.1989*B7	0,3899	0,6540	0,0371
Sólidos Suspendidos In-Situ = -26.3683 + 8820.9324*B1 -14169.4569*B2 - 4099.9410*B3 + 11783.6109*B4 + 32.5486*B5 + 2879.4664*B6 - 5955.2101*B7	0,7260	0,0716	0,0242
Turbiedad In-Situ = 26.7895 + 2708.2937*B1 -4926.8120*B2 - 585.8561*B3 + 2179.6795*B4 + 121.0134*B5 -301.9679*B6 + 496.2451*B7	0,4502	0,5282	0,0342

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zona Norte

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 0.3971 + 4.1463*B1 -12.4255*B2 + 1.6829*B3 -5.7921*B4 + 0.5175*B5 -5.3583*B6 + 10.8461*B7	0,5761	0,2744	0,0293

Nitratos In-Situ = 1.1632 -21.8597*B1 + 21.4971*B2 + 9.2519*B3 -38.0070*B4 + 1.6928*B5 -9.5082*B6 + 13.1481*B7	0,0613	0,9986	0,0645
Oxígeno Disuelto In-Situ = -5.8669 + 334.0439*B1 -572.0526*B2 + 56.0563*B3 + 415.1154*B4 -5.5271*B5 + 137.0140*B6 - 309.3259*B7	0,4219	0,5880	0,04
pH In-Situ = 6.6251 -66.7605*B1 + 60.6509*B2 -43.8724*B3 -0.1760*B4 + 6.5527*B5 -9.6940*B6 + 24.3272*B7	0,7720	0,0384	0,0124
Sólidos Suspendidos In-Situ = 170.4829 + 12769.3145*B1 -24528.8551*B2 - 6863.8263*B3 + 14501.2058*B4 + 786.1938*B5 -128.5190*B6 -2274.1610*B7	0,5700	0,2855	0,0297
Turbiedad In-Situ = 52.6550 + 22338.9318*B1 - 33086.7021*B2 - 3184.8762*B3 + 17424.1322*B4 + 406.8420*B5 + 1424.6923*B6 - 6114.3365*B7	0,8840	0,0033	0,009

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Garzonero

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 2.8795 + 55.9699*B1 -22.4054*B2 -40.2565*B3 + 47.1793*B4 + 0.2514*B5 -1.6690*B6 -26.2453*B7	0,3059	0,8490	0,047
Nitratos In-Situ = -1.6185 -81.4608*B1 + 146.0021*B2 -47.0827*B3 -9.9293*B4 + 12.4627*B5 -22.4140*B6 + 30.0641*B7	0,7502	0,0849	0,0194
Oxígeno Disuelto In-Situ = -10.4929 - 120.8875*B1 -181.0689*B2 + 373.8266*B3 -270.4750*B4 -22.9124*B5 + 113.6892*B6 -8.5404*B7	0,4849	0,5305	0,0517
pH In-Situ = 7.1477 -22.0545*B1 + 0.7059*B2 + 31.6651*B3 -13.2713*B4 - 5.5655*B5 + 24.8523*B6 -29.6528*B7	0,6053	0,2931	0,0387
Sólidos Suspendidos In-Situ = -68.1377 - 1647.8846*B1 -3797.0038*B2 + 2187.0184*B3 -1767.7619*B4 + 267.5617*B5 -1305.5867*B6 + 4054.9352*B7	0,6613	0,1984	0,0355
Turbiedad In-Situ = 46.7213 -3312.2166*B1 + 4953.2903*B2 + 1932.4183*B3 -2227.5170*B4 - 337.3314*B5 + 242.1771*B6 -554.1584*B7	0,5717	0,3563	0,0372

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Mocoa

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = -0.1299 -16.9486*B1 + 26.8027*B2 + 1.3440*B3 -9.7982*B4 + 0.0536*B5 + 1.2235*B6 -0.4571*B7	0,6156	0,3576	0,025
Nitratos In-Situ = -0.2768 + 49.9509*B1 + 145.7832*B2 + 132.5509*B3 -121.1284*B4 -15.3135*B5 + 34.4771*B6 -87.2466*B7	0,2072	0,9646	0,073
Oxígeno Disuelto In-Situ = -6.6779 - 243.7932*B1 + 434.7071*B2 -315.9171*B3 + 35.7210*B4 + 56.0660*B5 + 0.7368*B6 + 66.0767*B7	0,7744	0,1047	0,0166
pH In-Situ = 9.0215 -237.0231*B1 + 242.8928*B2 -73.0850*B3 -20.1336*B4 + 4.7971*B5 -15.6184*B6 + 42.4754*B7	0,8397	0,0432	0,0162
Sólidos Suspendidos In-Situ = -83.4708 + 8366.2029*B1 -1209.6683*B2 + 1600.1374*B3 -1191.8843*B4 + 278.7464*B5 -445.9812*B6 -1029.0222*B7	0,8187	0,0598	0,0156
Turbiedad In-Situ = -2.8846 + 11149.4708*B1 - 13345.7743*B2 + 2372.4084*B3 + 1723.1174*B4 - 211.1007*B5 + 918.3600*B6 - 1589.4625*B7	0,3322	0,8551	0,0471

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón el Vínculo

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 2.1172 + 32.6373*B1 -62.8539*B2 -9.3363*B3 + 34.5453*B4 + 0.8563*B5 + 2.4085*B6 -21.0618*B7	0,7708	0,0659	0,0219
Nitratos In-Situ = 1.7990 -754.2676*B1 + 1161.5385*B2 + 19.2780*B3 -540.1815*B4 -21.9664*B5 + 61.3660*B6 + 65.0699*B7	0,4455	0,6097	0,0499
Oxígeno Disuelto In-Situ = 6.4601 - 101.9818*B1 + 142.6769*B2 -21.4634*B3 + 1.1322*B4 -1.5316*B5 -13.5538*B6 - 7.5633*B7	0,6285	0,2520	0,0244
pH In-Situ = 8.1917 + 9.6494*B1 + 40.8418*B2 + 1.7748*B3 -27.0840*B4 + 1.0243*B5 -20.0227*B6 + 27.6366*B7	0,3936	0,7085	0,0475
Sólidos Suspendidos In-Situ = 64.4609 + 4163.1835*B1 - 4406.9649*B2 - 1264.8250*B3 + 1681.5105*B4 -177.3747*B5 + 817.3971*B6 -	0,5390	0,4208	0,0406

924.3606*B7

Turbiedad In-Situ = 16.3829 -2949.1638*B1
+ 4908.4108*B2 -460.1423*B3 -
609.0770*B4 -2.4018*B5 + 66.5110*B6 -
345.1479*B7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Guayabito

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 0.1093 + 7.8394*B1 -8.2100*B2 -2.0185*B3 + 3.6534*B4 + 0.2543*B5 + 0.1932*B6 -0.5415*B7	0,7199	0,1774	0,016
Nitratos In-Situ = 57.5730 -1128.7738*B1 + 1211.3231*B2 -1156.5109*B3 + 578.2089*B4 -3.3186*B5 -410.5636*B6 + 515.4579*B7	0,7260	0,1684	0,02
Oxígeno Disuelto In-Situ = -9.9324 - 0.4332*B1 + 80.2385*B2 + 189.7596*B3 - 169.7974*B4 + 51.1610*B5 + 42.7980*B6 - 80.8797*B7	0,6927	0,2200	0,0264
pH In-Situ = 8.3053 -53.6070*B1 + 67.9464*B2 -10.3622*B3 -2.3186*B4 - 1.7499*B5 -1.0909*B6 + 0.8460*B7	0,5908	0,4054	0,0231
Sólidos Suspendidos In-Situ = 45.4079 + 3369.5936*B1 -1663.1041*B2 - 2429.6958*B3 -357.2317*B4 + 612.4314*B5 + 95.9851*B6 -218.0587*B7	0,7163	0,1827	0,0444
Turbiedad In-Situ = 37.5797 + 2835.1788*B1 -2565.4388*B2 - 1812.3014*B3 + 570.9422*B4 + 227.3485*B5 + 507.4414*B6 -535.5809*B7	0,5718	0,4424	0,0444

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Canadá

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 0.5101 -34.0438*B1 + 50.6995*B2 + 12.7453*B3 -34.1280*B4 - 3.2427*B5 + 4.6734*B6 + 1.5298*B7	0,3630	0,7621	0,0634
Nitratos In-Situ = 5.2876 + 233.6248*B1 - 465.6957*B2 -11.5978*B3 + 66.0351*B4 + 71.4092*B5 -182.2770*B6 + 202.0863*B7	0,5517	0,3955	0,0333

Oxígeno Disuelto In-Situ = -1.5598 + 1617.9251*B1 -1814.4968*B2 + 121.1833*B3 + 581.6369*B4 + 19.0934*B5 + 64.2075*B6 -342.3943*B7	0,7975	0,0454	0,0196
pH In-Situ = 7.1154 + 53.4648*B1 - 46.2404*B2 + 8.8402*B3 + 18.5586*B4 - 2.7529*B5 + 14.7426*B6 -31.2226*B7	0,6745	0,1785	0,0321
Sólidos Suspendidos In-Situ = -3.1159 - 3139.9570*B1 + 4582.8923*B2 + 316.2241*B3 -1270.2596*B4 -54.1378*B5 + 603.1804*B6 -992.1539*B7	0,3229	0,8250	0,0749
Turbiedad In-Situ = -2.3748 + 741.2779*B1 -557.4089*B2 + 784.5267*B3 -295.7679*B4 -68.0875*B5 + 257.8061*B6 -533.0954*B7	0,3672	0,7551	0,0551

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Zanjón Guaymaral

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 0.4535 + 0.0287*B1 + 1.0616*B2 -26.6599*B3 + 12.0926*B4 + 4.2883*B5 + 8.6869*B6 -10.4636*B7	0,2791	0,9124	0,0798
Nitratos In-Situ = 1.7170 -10.8210*B1 + 53.8685*B2 + 119.9816*B3 -94.3557*B4 - 19.4822*B5 + 13.0700*B6 -16.7076*B7	0,5970	0,3934	0,0512
Oxígeno Disuelto In-Situ = 6.6471 + 240.5605*B1 -251.4928*B2 -20.6577*B3 +93.4764*B4 -18.9340*B5 + 50.4337*B6 - 90.2455*B7	0,5801	0,4263	0,456
pH In-Situ = 8.2216 + 4.4965*B1 + 1.4414*B2 -10.8916*B3 + 8.1887*B4 + 1.9164*B5 -3.8655*B6 -0.1491*B7	0,4338	0,7037	0,0513
Sólidos Suspendidos In-Situ = 15.1432 - 64.5426*B1 + 136.0229*B2 + 3.0376*B3 + 41.3541*B4 -19.5441*B5 + 33.0733*B6 - 84.2025*B7	0,2699	0,9207	0,06
Turbiedad In-Situ = 10.0653 -194.8574*B1 + 256.9895*B2 + 139.5421*B3 + 8.8033*B4 -66.8381*B5 -25.3388*B6 + 16.5231*B7	0,5458	0,4937	0,0383

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación para Caño Nuevo

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
----------	----------------	-----------------------------	-----

Fósforo Total In-Situ = -0.3190 -54.4068*B1 + 46.5839*B2 + 44.1488*B3 -46.5175*B4 - 2.8168*B5 + 18.1519*B6 -26.1064*B7	0,9013	0,0114	0,006
Nitratos In-Situ = -0.3297 -82.9548*B1 + 103.3632*B2 + 168.4310*B3 -116.0777*B4 -2.6645*B5 + 18.5634*B6 -94.9769*B7	0,4168	0,7325	0,048
Oxígeno Disuelto In-Situ = 0.2743 - 7.0377*B1 + 27.7856*B2 -2.1370*B3 - 9.0031*B4 + 0.9659*B5 + 7.5099*B6 - 10.2633*B7	0,1739	0,9796	0,0691
pH In-Situ = 7.0526 -7.5780*B1 + 36.6304*B2 + 17.5774*B3 -36.9391*B4 - 5.3788*B5 + 13.4634*B6 -5.4100*B7	0,5044	0,5743	0,0396
Sólidos Suspendidos In-Situ = 14.3412 + 4905.0719*B1 -4022.5358*B2 - 2985.3398*B3 + 4264.8468*B4 + 413.3262*B5 -595.3584*B6 -688.4576*B7	0,3339	0,8531	0,0686
Turbiedad In-Situ = -5.0770 + 1083.7130*B1 + 2440.1198*B2 -4075.1554*B3 + 4256.1946*B4 + 356.0083*B5 - 248.3309*B6 -1533.9986*B7	0,5966	0,3942	0,0445

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Modelos de regresión lineal múltiple con mayor correlación, Análisis General

Ecuación	R ²	P Valor General F-Statistic	ECM
Fósforo Total In-Situ = 0.5652 -2.9246*B1 - 3.0180*B2 -2.5080*B3 -1.0030*B4 - 0.1917*B5 -1.4441*B6 + 5.7556*B7	0,0580	0,2836	0,038
Nitratos In-Situ = 2.9521 -203.8644*B1 + 264.2646*B2 + 93.9718*B3 -171.1941*B4 - 15.7349*B5 + 2.2200*B6 + 36.6582*B7	0,1047	0,0263	0,0238
Oxígeno Disuelto In-Situ = 1.2883 - 103.0365*B1 + 133.1027*B2 + 109.7842*B3 -138.9222*B4 -14.2597*B5 + 22.7933*B6 + 9.9397*B7	0,1450	0,0021	0,0547
pH In-Situ = 7.2544 -23.3505*B1 + 26.7288*B2 + 4.5897*B3 -15.1418*B4 - 1.4947*B5 + 2.2197*B6 + 6.0211*B7	0,1985	0,00004	0,0398
Sólidos Suspendidos In-Situ = 43.8576 + 2618.0776*B1 -2661.1793*B2 - 1268.7837*B3 + 1442.4545*B4 + 49.8667*B5 + 182.6083*B6 -354.3611*B7	0,1548	0,0010	0,0197
Turbiedad In-Situ = 33.6861 + 1808.4850*B1 -1735.9850*B2 - 976.5864*B3 + 1025.6759*B4 + 95.5826*B5 -0.8618*B6 -185.2485*B7	0,1190	0,0111	0,0288

Fuente: Elaboración propia

7.3 Validación de modelos

Para la etapa de validación, empleando la calculadora ráster del programa QGIS, se procedió a implementar los modelos matemáticos resultantes de cada parámetro por estación de monitoreo obtenidos por medio del código correspondiente al análisis de datos en colab de acuerdo a la tabla 8 para zona del Sur, tabla 9 para la zona Centro, tabla 10 para la zona Norte, tabla 11 para la zona Garzonero, tabla 12 para la zona Zanjón Mocoa, tabla 13 para la zona Zanjón El Vínculo, tabla 14 para la zona Zanjón Guayabito, tabla 15 para la zona Zanjón Canadá, tabla 16 para la zona Zanjón Guaymaral y tabla 17 para la zona Caño Nuevo, generando rasters que cuantifican los valores estimados para cada uno de los seis parámetros analizados.

Al realizar un análisis de todos los datos proporcionados por la CVC para la laguna de sonso no fue posible obtener un modelo general preciso para cada parámetro acorde como se evidencia a en la tabla 18. Posteriormente se procedió a obtener la imagen satelital para la fecha del 30/09/2023, siendo la más próxima a la toma de datos más reciente por parte de la CVC (26/09/2023).

Para extraer los valores generados por cada ráster, fue utilizada la herramienta Point Sampling Tool, donde se empleó una capa de puntos con las coordenadas geográficas de las estaciones proporcionadas CVC de acuerdo con la información plasmada en la tabla 2. Esta etapa hizo posible la asignación a cada estación de monitoreo de la laguna de sonso, los valores específicos producidos por los modelos en los rasters, logrando, de esta manera, obtener los datos estimados de cada parámetro en cada estación como se puede evidenciar en la tabla 19.

Tabla 19. Valores por parámetro a partir de modelos de regresión lineal múltiple por estación de monitoreo

Estaciones de Muestreo	Turbiedad	Sólidos	pH	Oxígeno	Nitratos	Fósforo
Laguna de Sonso - Zona Sur	20,20	34,64	7,05	1,97	-0,44	0,14
Laguna de Sonso - Zona Centro	42,11	81,33	7,42	1,65	1,07	0,18
Laguna de Sonso - Zona Norte	16,12	45,13	7,38	2,36	0,59	0,19
Zanjon Garzonero	33,58	54,65	7,99	4,84	0,36	0,28
Zanjon Mocoa	39,51	63,54	7,61	6,30	3,32	0,15
Zanjon El Vinculo	19,24	58,59	7,58	2,72	4,63	0,22
Zanjon Guayabito	21,98	25,31	7,85	8,22	-2,46	0,17
Zanjon Canada	24,60	-25,26	7,57	11,89	6,72	0,48
Zanjon Guaymaral	4,87	8,70	7,51	-1,30	0,70	0,47
Caño Nuevo	2,85	7,29	7,49	1,06	0,44	0,23

Fuente: Elaboración propia

Por último, se compararon los valores obtenidos de la imagen satelital postulados en la tabla 19 correspondiente a la fecha del 30/09/2023 y los análisis por parte de la CVC en las estaciones de monitoreo de la laguna de sonso siendo la más reciente 26/09/2023. Esta revisión se realizó de manera independiente por estación y con cada uno de los seis indicadores analizados.

Así, se estableció el grado de correspondencia entre los datos observados y calculados, y se confirmó la eficacia de los modelos propuestos para el análisis remoto de los parámetros seleccionados como se aprecia en la figura 13 para la estación Zona sur, figura 14 para la estación Zona centro, figura 15 para la estación Zona norte, figura 16 para la estación Zanjón Garzonero, figura 17 para la estación Zanjón Mocoa, figura 18 para la estación Zanjón El Vínculo, figura 19 para la estación Zanjón Guayabito, figura 20 para la estación Zanjón Canadá, figura 21 para la estación Zanjón Guaymaral y la figura 22 para la estación Caño Nuevo estos resultados también se pueden ver en el anexo 10.

Tanto los modelos de sólidos suspendidos como los de oxígeno disuelto presentan un grado moderado de correspondencia entre los valores modelados y los medidos en campo. Esto indica que estos modelos pueden ser empleados en el análisis remoto con algunos ajustes. Los modelos correspondientes a fósforo total, nitratos, pH y turbiedad tienen coeficientes de correlación bajos con los resultados observados. En particular, los modelos de fósforo total y nitratos no son aceptables en un sentido estricto en su forma actual.

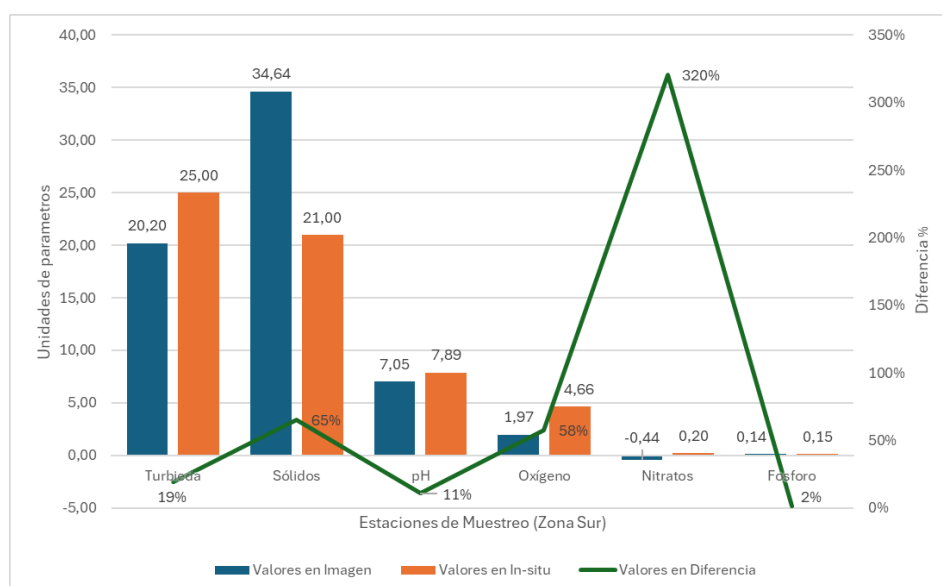


Figura 13. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zona Sur)

Fuente: Elaboración propia

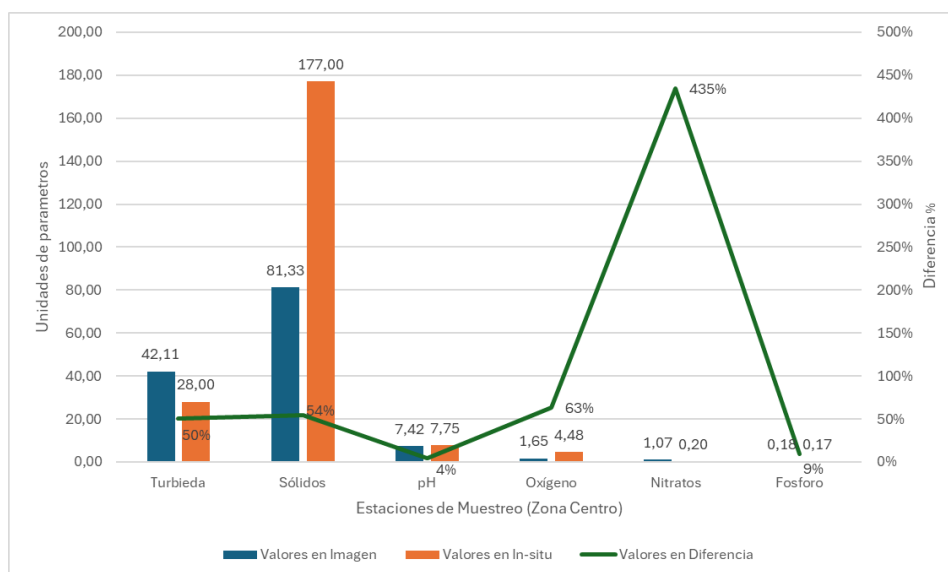


Figura 14. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zona Centro)

Fuente: Elaboración propia

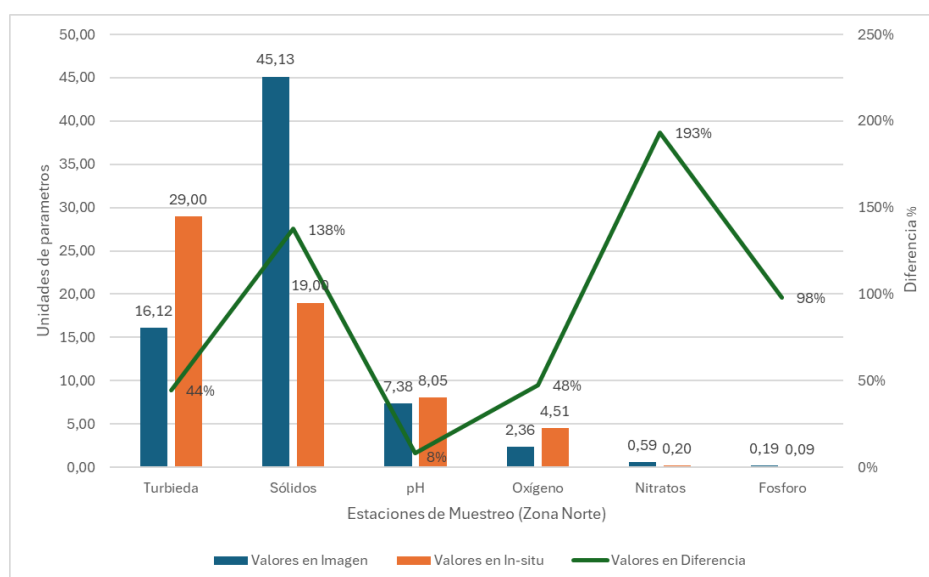


Figura 15. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zona Norte)

Fuente: Elaboración propia

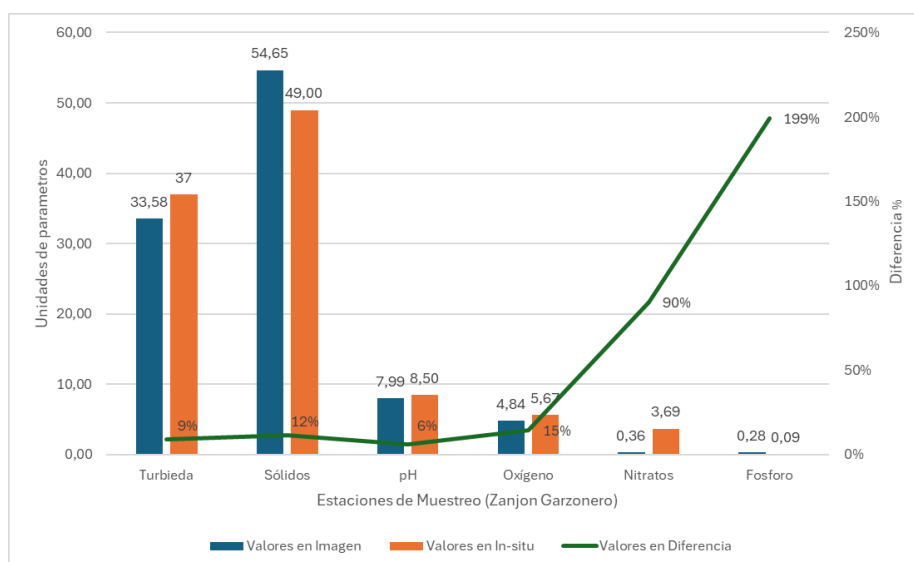


Figura 16. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Garzonero)

Fuente: Elaboración propia

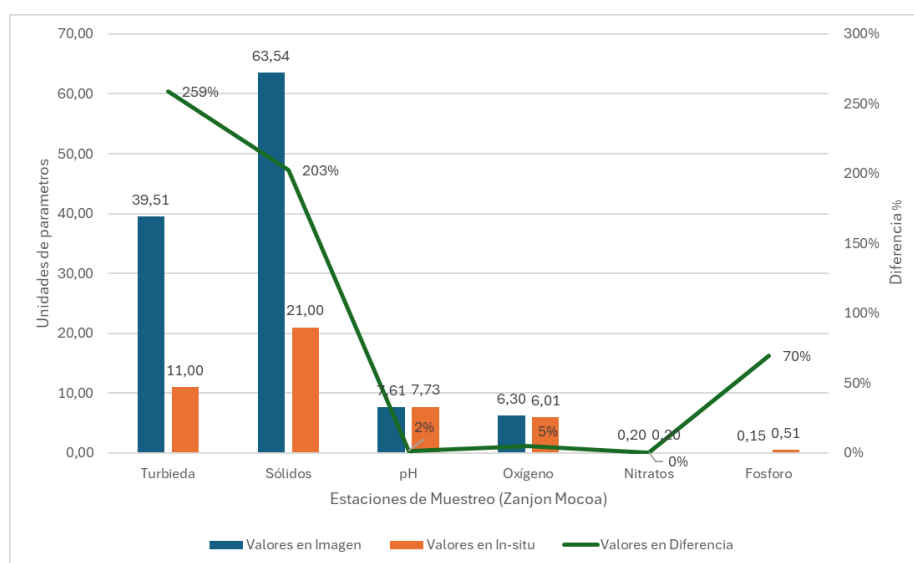


Figura 17. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Mocoa)

Fuente: Elaboración propia

Nota: Nitratos en la imagen corresponde a un valor de 3,32 que correspondería a una diferencia porcentual de 1554% en relación con el valor in-situ correspondiente a 0,201.

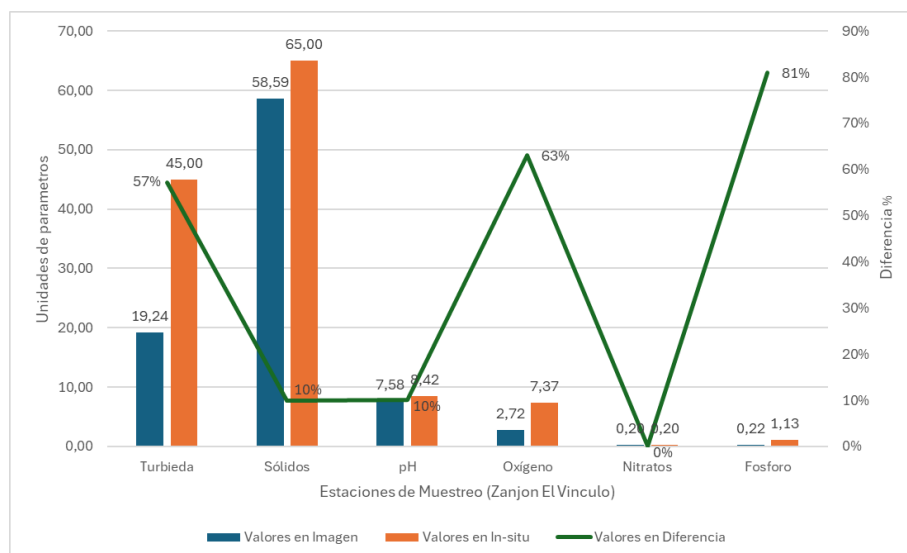


Figura 18. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón El Vínculo)

Fuente: Elaboración propia

Nota: Nitratos en la imagen corresponde a un valor de 4,63 que correspondería a una diferencia porcentual de 2183% en relación con el valor in-situ correspondiente a 0,201.

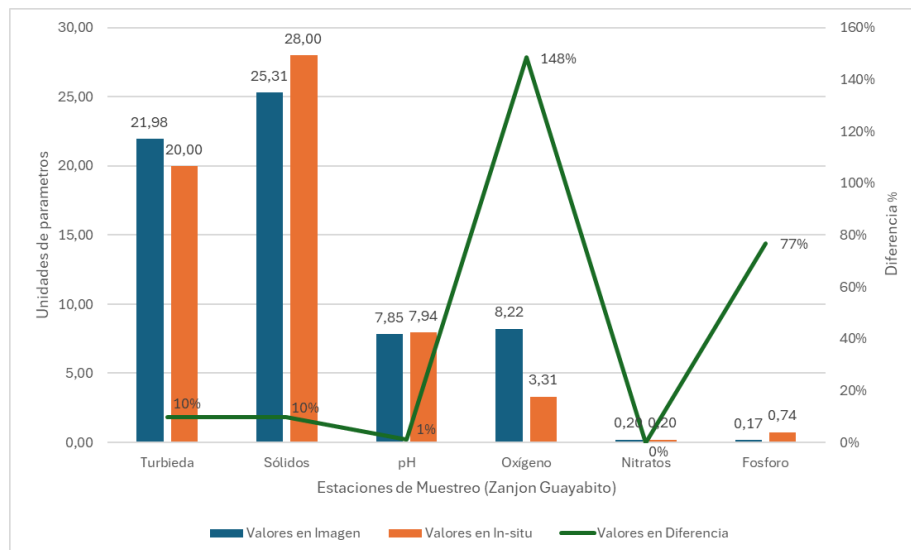


Figura 19. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Guayabito)

Fuente: Elaboración propia

Nota: Nitratos en la imagen corresponde a un valor de -2,46 que correspondería a una diferencia porcentual de 1323% en relación con el valor in-situ correspondiente a 0,201.

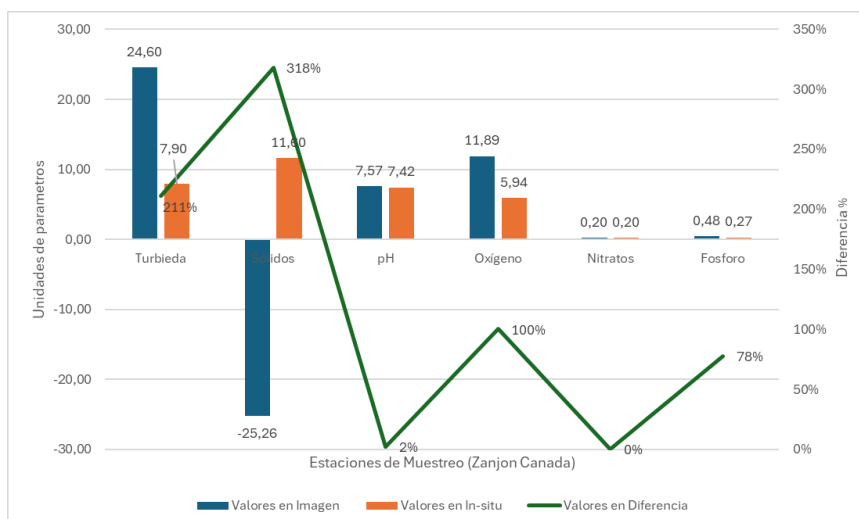


Figura 20. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Canadá)

Fuente: Elaboración propia

Nota: Nitratos en la imagen corresponde a un valor de 6,72 que correspondería a una diferencia porcentual de 3242% en relación con el valor in-situ correspondiente a 0,201.

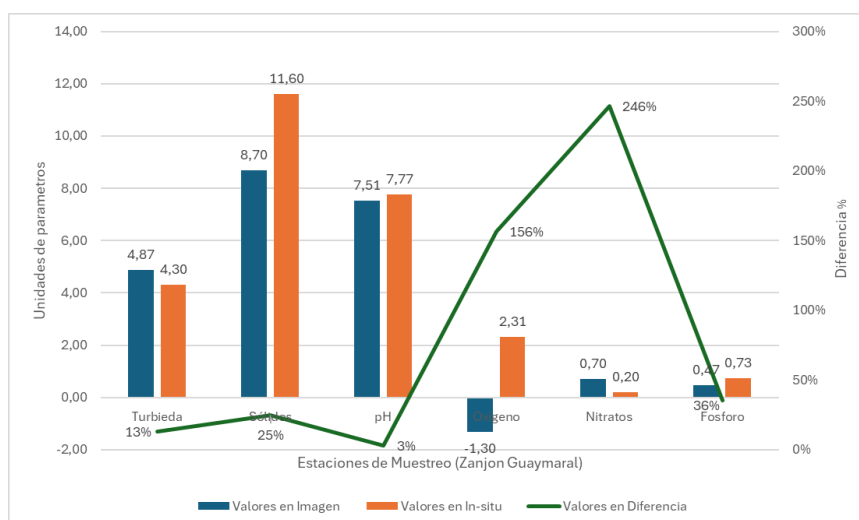


Figura 21. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Zanjón Guaymaral)

Fuente: Elaboración propia

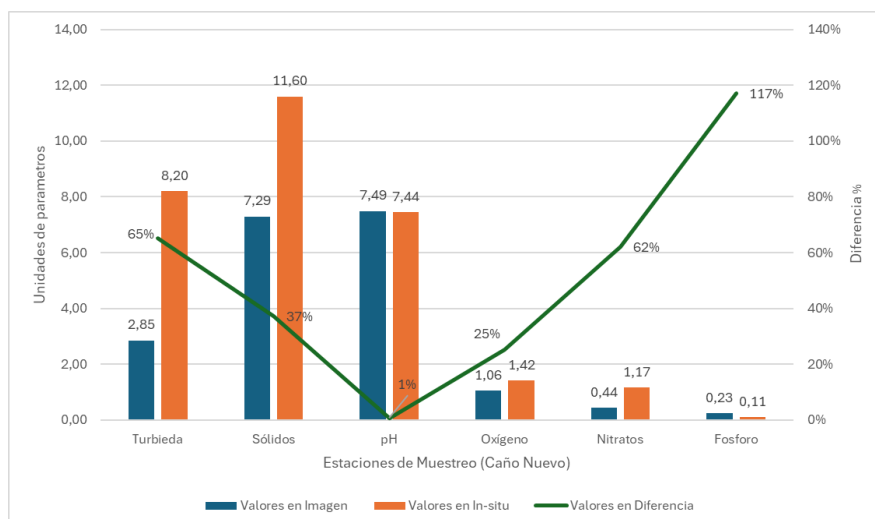


Figura 22. Comparación de resultados entre imagen y datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro, según estación de monitoreo (Caño Nuevo)

Fuente: Elaboración propia

Según estos resultados, se permite establecer que los modelos para el parámetro pH poseen una alta confiabilidad teniendo este una variación promedio del 5% en todas las estaciones de monitoreo, donde para el parámetro oxígeno disuelto presentan variación promedio del 68%, para el parámetro de turbiedad correspondió a una variación promedio del 74%, continuando con el parámetro fósforo el cual presentó una variación promedio del 87%, siguiendo con el parámetro sólidos suspendidos que presentó una variación promedio del 87% y finalmente el parámetro nitratos el cual fue el que presentó la mayor variación promedio entre todos los parámetros analizados siendo este de un 965%.

Esto indica que solo los modelos de pH cuentan con una alta correlación entre las imágenes satelitales y los datos que se pueden obtener en los análisis de campo, lo que permite que puedan ser empleados en el análisis de percepción remoto, donde los demás modelos correspondientes a fósforo total, nitratos, oxígeno disuelto y turbiedad tienen coeficientes de correlación bajos en su mayoría, en relación con los resultados observados.

7.4 Categorización según nivel de eutrofización

Debido al comportamiento observado en los parámetros a partir de las imágenes satelitales del sensor Landsat 8 con la implementación de los modelos de regresión lineal múltiple, la categorización de los niveles de eutrofización no es posible, ya que el pH por sí solo, siendo la medida de la acidez o alcalinidad de sustancias líquidas, puede influir en la dinámica de los ecosistemas acuáticos, donde este afectara la solubilidad de nutrientes y

metales, así como la toxicidad de ciertas sustancias, por lo que no es un parámetro principal en la determinación del estado trófico de un cuerpo de agua.

Los índices de estado trófico, como el propuesto por Carlson, que se basa principalmente en parámetros como la transparencia (siendo este parámetro medido con ayuda del disco Secchi) y la concentración de clorofila-a los cuales son parámetros de los que se carecen en el proceso de estudio del lago, además, se usa el fósforo total el cual es inviable dado que presento un resultado carente de asertividad en los modelos propuestos; siendo estos los parámetros que reflejan de manera más directa la productividad biológica y el nivel de eutrofización del ecosistema acuático.

7.5 Discusión de resultados

El objetivo principal de este estudio es la implementación de una metodología a través de sensores remotos, para la estimación de parámetros pH, nitratos, turbiedad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y fósforo, de forma periódica, que permitan entender el comportamiento biótico y nivel de contaminación en la Laguna de Sonso.

Según AIC et al. (2011) el estado trófico tiene por finalidad clasificar cuerpos de agua en diferentes grados de eutrofización, que corresponde a la calidad de agua en cuanto a enriquecimiento por nutrientes, constituyendo un efecto relacionado con el crecimiento excesivo de las algas o con un aumento de la infestación con macrófitas acuáticas. Del mismo modo Nixon et al. (1995) define el término eutrofización, que proviene del griego “eutros” que significa “bien nutrido”. De manera general, está referida al aumento de nutrientes en exceso, principalmente de nitrógeno y fósforo, que produce un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la diversidad de un sistema acuático, por este motivo es necesario el desarrollo de metodologías que ofrezcan resultados confiables a partir de la implementación de nuevas tecnologías a un bajo costo de inversión las cuales garanticen ser benéficos para la sociedad.

Los resultados indican que los modelos generados para identificar los parámetros nitratos, turbiedad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y fósforo a partir de imágenes satelitales no generaran resultados consistentes a los esperados en relación con los datos in-situ, a comparación de los modelos para el parámetro de pH, donde este si generó resultados acordes a lo pronosticado, así mismo fue el parámetro donde se evidenció una menor variación entre los datos en campo in-situ.

Cabe recalcar que los resultados obtenidos se pudieron ver afectados dada la relación entre la localización de las estaciones de monitoreo y la resolución espacial de las imágenes Landsat 8, entendiendo que las estaciones de monitoreo 1,2, y 3 se encuentran dentro de la laguna a diferencia de las estaciones 4 hasta la 10, que se encontraban ubicadas en zajones circundantes en donde, para este caso, estos cuerpos de agua no pueden verse representados adecuadamente dada la resolución espacial de 30m con la que cuenta el sensor Landsat 8, donde no solo estaría presente el mismo cuerpo de agua sino también suelo o vegetación, comprometiendo los valores obtenidos de estos puntos en particular.

Adicionalmente, los compuestos ópticamente activos, como los sólidos suspendidos y la turbiedad mostraron una relación moderada en comparación a los datos medidos en campo, indicando que la reflectancia registrada por sensores satelitales podría tener una proporcionalidad directa con estos parámetros. Por otra parte, los componentes no ópticamente activos, como el fósforo total, nitratos y oxígeno disuelto, muestran una correlación baja, hecho que indica que su determinación vía teledetección es más compleja y precisa de modelos indirectos basados en la influencia que estos compuestos generan en los componentes ópticamente activos.

Esta diferencia se debe a que los parámetros ópticamente activos modifican la absorción y dispersión de la luz en el agua, haciéndolos detectables por sensores remotos. No obstante, los parámetros no ópticamente activos deben deducirse de su relación con los otros componentes medidos ópticamente. En general, la fiabilidad de los datos fue mayor en la laguna que en los zanjones, debido a la mayor estabilidad de sus condiciones y la menor influencia de factores externos en la reflectancia medida por los sensores satelitales.

Este descubrimiento es coherente en cierto grado en comparación a estudios anteriores donde se obtuvieron resultados mucho más acertados gracias a que se implementaron modelos con un grado de significancia mucho más alto $p < 0.05$ que el generado para algunos parámetros para este proyecto. Daniela et al (2020) en su estudio, también encontró que el parámetro pH presentó un comportamiento estable durante todo su desarrollo el cual tenía como propósito la estimación de parámetros de calidad de agua en la laguna Santa Elena usando imágenes satelitales.

Para los parámetros que presentaron un bajo porcentaje de asertividad como lo fueron nitratos, turbiedad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y fósforo, su baja eficacia puede atribuirse a la limitada resolución espacial de las imágenes satelitales Landsat 8 en

correlación con el área de los cuerpos de agua dado que en comparación a los estudios realizados por Quiroz et al (2022) que empleó una metodología para generar modelos matemáticos a partir de regresiones lineales múltiples similar a la de este estudio para la evaluación de los estados tróficos de la laguna principal del área de conservación regional albufera de medio mundo, optaron por utilizar imágenes satelitales Sentinel-2 la cual posee una resolución espacial de 10m para un área correspondiente a 687,71 ha teniendo una diferencia notoria en comparación a la resolución espacial de 30m empleada para un área 2045 Ha para este estudio.

De igual manera, se resalta como la implementación de imágenes satelitales Landsat 8, junto con el uso de softwares como Google Earth Engine y QGIS, puede llegar a reducir significativamente los tiempos en comparación con el monitoreo tradicional como se realizó en el anterior estudio.

Otro de los factores que permite que los modelos desarrollados para los parámetros no logra representar correctamente su comportamiento, es probablemente debido a la diversidad de las estaciones de monitoreo localizadas en las fuentes de abastecimiento de la laguna de sonso (drenajes), a diferencia del estudio realizado por López et al (2024) donde se establecieron los puntos de monitoreo para evaluación del estado trófico de la laguna Iberia sur solo dentro del cuerpo del agua pero así mismo siguiendo el mismo criterio donde los puntos de monitoreo deben ser ubicados cerca de donde se desarrollen actividades específicas como lo son las zonas de ingreso de afluentes (drenes de las irrigaciones). A continuación, se destacan algunos de los datos más relevantes identificados en cada una de las zonas. Pero antes es necesario recordar algunos conceptos que faciliten la comprensión de los resultados obtenidos.

Los valores de R^2 altos, acompañados de unos valores de $p < 0,05$ indican que el modelo es estadísticamente significativo, en el caso que p este levemente por encima de 0,05 y R^2 sea alto se considera un modelo marginalmente significativo. Si los valores de R^2 son bajos y los de p están muy por encima de 0,05 el modelo no es considerado estadísticamente significativo. En el caso de la zona sur el modelo de pH tiene un R^2 alto, con un valor de 0,7620 y p 0,045, lo que lo hace estadísticamente significativo, contrario a lo que sucede con sólidos suspendidos, que, aunque tiene un valor de R^2 alto, su valor de p (0,1224) está muy por encima de 0,05. Lo que indica que, pese a que el modelo muestra una buena correlación, la significancia estadística es cuestionable.

Para la zona centro, el modelo de sólidos suspendidos explica una varianza de 72,60% y un valor de p (0,0716) levemente superior al 0,05, siendo el modelo más

influyente de la zona y marginalmente significativo. Esto significa que su resultado debe ser tomado con precaución. El resto de los resultados de la zona no son influyentes. En la zona norte se encuentra que los modelos de pH y turbiedad muestran valores de R^2 muy altos, 0,7720 y 0,8840 y valores de p 0,0384 y 0,003. Respectivamente para ambos casos. Estos resultados los convierten en modelos estadísticamente significativos y muy confiables para fines predictivos.

En los modelos establecidos para la zona de Zanjón Garzonero, se identifica que los parámetros nitrato, sólidos suspendidos y pH, pese a tener valores de R^2 altos (entre 0,6053 y 0,7502), sus valores de p se encuentran muy por encima del valor de referencia (0,05), por lo que se considera que su significancia estadística no es representativa. En el Zanjón Mocoa, de los modelos diseñados, solo el parámetro pH presentó una significancia estadística representativa, pues su valor de R^2 es 0,8397 y su valor de p 0,0432 así los indican. En esta misma zona el modelo de sólidos suspendidos explica una varianza de 81,87% y un valor de p de 0,0598. Este resultado indica que tiene una significancia estadística marginal.

Para el caso del Zanjón el Vínculo ningún modelo es estadísticamente significativo, pues los valores de R^2 son muy bajos. Solo el parámetro de Fosforo Total es importante (0,7708), pero el valor de p no es representativo (0,0659). En la zona de Zanjón Guayabito los valores de R^2 para los diferentes parámetros oscilan entre 0,5718 y 0,7260, pero los valores de p son superiores a 0,05, lo que nos sugiere que ninguno de los modelos es estadísticamente significativo.

El modelo diseñado para el parámetro de oxígeno disuelto en la zona de Zanjón Canadá presenta una significancia estadística bastante importante con unos resultados que lo confirman, explica una varianza de 79,75% y su valor de p es de 0,0454. (por debajo del valor de referencia). Los valores del resto de parámetros oscilan entre 32,29% y 67,45% pero los valores de p, que es el que indica su significancia estadística están bastante altos (entre 0,1785 y 0,8250).

El Zanjón Guaymaral no arroja buenos resultados pues los modelos diseñados no son estadísticamente significativos, los resultados registrados para p están entre 0,3934 y 0,9124, todos bastante altos y muy por encima del valor de referencia (0,05). Esto hace que los valores de R^2 pierdan importancia, ya que no serán considerados estadísticamente significativos. Aunque podemos registrar que los valores más altos fueron los de los parámetros de Nitrato con 0,5970 y oxígenos disueltos con 0,5801.

La zona de Caño Nuevo, donde los modelos presentan diferentes grados de correlación, pero nos llamó bastante la atención el caso del modelo de Fosforo Total, pues presento los mejores resultados, con una correlación bastante fuerte, el valor de R^2 fue bastante alto 0,9013 y el valor de p fue 0,0114. Siendo este el modelo que mostro la mayor significancia estadística de todo el ejercicio.

Finalmente, para el análisis general, al abarcar todos los datos de diversas estaciones en un único análisis global, entre la heterogeneidad en las condiciones ambientales y las características de cada zona de muestreo, se genera un mayor rango de valores medidos in situ que el cual no se explica completamente mediante los predictores (bandas espectrales) utilizados en los modelos. Al combinar la información de estaciones que tienen entornos muy diferentes, la capacidad explicativa global del modelo (R^2) disminuye notablemente comparado a cuando R^2 se calcula de forma independiente en cada estación, pues las condiciones son similares y el modelo se ajusta mejor a la variabilidad local.

La baja correlación en el análisis general evidencia la complejidad y diversidad de los factores involucrados en la calidad del agua en diferentes puntos del sistema, lo que resalta la necesidad de crear modelos para cada estación o agrupar estaciones que tengan características semejantes para contar con predicciones más precisas.

8. CONCLUSIONES

El presente estudio evidencia que el empleo de técnicas de teledetección en el monitoreo de la calidad del agua en la Laguna de Sonso propone un método prometedor, pero esto condicionado al parámetro que se busque evaluar. Siendo el modelo para pH el cual presento mejor ajuste llegando a considerarse el mas fiable de entre todos los parámetros, los modelos pensados para sólidos suspendidos y oxígeno disuelto presentan una correspondencia moderada entre los valores deducidos de la reflectancia y las medidas in situ. Esto indica que, con correcciones adicionales de calibración y validación, dichos modelos podrían ser utilizados con confiabilidad en el análisis remoto de la calidad del agua y por lo tanto en monitoreo continuo.

Por otro lado, los modelos asociados a los demás parámetros como el fósforo total, nitratos, y turbiedad, mostraron correlaciones bajas, lo que permite inferir que la actual metodología tiene limitaciones para estimación directa de estos parámetros. La baja precisión en estos modelos podría ser causada por la complejidad que conlleva la influencia indirecta de estos compuestos en la reflectancia del agua y la necesidad de

incluir variables adicionales que aborden mejor su variabilidad.

Se evidenció que la representación de la información en la zona de estudio no puede visualizarse con precisión mediante las imágenes satelitales obtenidas por el sensor Landsat 8, debido a su resolución espacial de 30 metros. Esto se debe a que las mediciones in situ fueron realizadas en áreas de menor extensión, lo que genera una discrepancia entre la escala de observación y el tamaño del píxel. Como resultado, los valores de referencia proporcionados por la CVC quedan diluidos dentro del área cubierta por cada píxel, dificultando su análisis detallado.

En resumen, aunque la teledetección es una herramienta útil para el monitoreo de cuerpos de agua, el estudio destaca la necesidad de seguir perfeccionando los algoritmos especialmente para las variables no ópticamente activas con el fin de hacer más precisos y robustos los modelos que se aplican.

A pesar de que no se logró clasificar el grado de eutrofización de la laguna de sonso por falta de exactitud referente a los modelos que representan los parámetros con el propósito de establecer un nivel para su categorización, Esta investigación presenta que es posible implementar la teledetección como técnica para el seguimiento y análisis de algunos parámetros orgánicos en los cuerpos de agua, así como la producción de datos espaciales y temporales en un contexto de bajo costo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC). (Diciembre 2011). ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA Y SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Contaminación por nutrientes. <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>
- Aquae Fundación. ¿Qué es la eutrofización y cómo contamina el agua?. <https://www.fundacionaquae.org/>
- Ángel Batista. (2 Febrero , 2022). ¿Qué humedales cuentan con protección especial en Colombia?. <https://www.radionacional.co/>
- Ballesteros Doncel, E. (2012). *Cuartiles, deciles y percentiles: Cálculo, aplicaciones y prácticas resueltas para «enseñar y aprender»*. Cuaderno Didáctico. Departamento de Sociología IV, Facultad de Ciencias Políticas y Sociología, Universidad Complutense de Madrid.
- Bellido Huicho, J. A. Análisis Espacio-Temporal del Comportamiento de la Clorofila A Mediante Imágenes Satelitales en la Represa Aguada Blanca Para el Año 2017. 2019. 100 p. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 2019.
- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel,, Ramos, S. (5 de diciembre 2018). Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. Revista de Teledetección - Asociación Española de Teledetección.
- Bryan R. Swistock. (2020, 19 octubre). Bacterias Coliformes. extension.psu.edu
- Cabezas, D. F. (2020). *Determinación de modelos matemáticos para estimar algunos parámetros de interés en el monitoreo de la calidad del agua de la laguna de Sonso, mediante imágenes Landsat -7*. Universidad Católica de Manizales
- Calzada Iglesias, E. O. (2016). Aplicación de Percepción Remota para el Estudio de Áreas con un Potencial Geotérmico: La Soledad (Jalisco) y los Negritos (Michoacán) (Tesis de maestría, Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C., Ciudad de México).
- Carlson, R. A trophic state index for lakes. En: Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22, No. 2.
- Cañada Torrecilla, R., Vidal Domínguez, M.J. y Moreno Jiménez, A. (2010): Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones

- de la Universidad de Sevilla.
- Castellanos, G., Moreno, M. y F. D. Maldonado. (Noviembre 2016). Obtención de imágenes índice de vegetación SAVI apartir de imágenes milirreflectancia TOA.
- Costas, G.(4 de abril del 2019). Fitoplancton, características e importancia. Ciencia y biología. <https://cienciaybiologia.com/fitoplancton/>
- Costa-Filho, E., Chávez, J. L., & Zhang, H. (2024a). A Novel Remote Sensing-Based Modeling Approach for Maize Light Extinction Coefficient Determination. *Remote Sensing*, 16(6), 1012. <https://doi.org/10.3390/rs16061012>
- Cruz, D. (2020). Aprendizaje automático de datos Colombianos (Machine Learning).
- CVC. (2023). Localización de estaciones de muestreo y ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS de la Laguna de Sonso.
- Daniela, C. Rivera, R. (2020) Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales. Universidad de Concepción
- Daniel Odonohue. (2023, enero 24). Reproyectar Rasters. <https://mapscaping.com/reprojecting-rasters/>
- Da Silva, C., Cardozo, O. (2013). Aplicaciones Urbanas de los Sensores Remotos.
- Franco, E. F., Ramos, R., Ovando-Javier, A., Montero-Espailat, E., Bonilla, S., & Veda, A. (2023). Sensores de calidad de agua para el control de la contaminación fisicoquímica en los acuíferos de Latinoamérica: una revisión. *Ciencia Ambiente y Clima*, 6(1), 45-70. <https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i1.pp45-70>
- Fundación Aquae. (2019, febrero 1). ¿Qué es un humedal y por qué son importantes?. fundacionaquae.org
- Fondo de Cooperación Chile-México, F. C. (2006). LOS HUMEDALES Y LA IMPORTANCIA DE CONSERVARLOS.
- Gao, L., Shangguan, Y., Sun, Z., Shen, Q., & Shi, Z. (2024). Estimation of Non-Optically Active Water Quality Parameters in Zhejiang Province Based on Machine Learning. *Remote Sensing*, 16(3), 514. <https://doi.org/10.3390/rs16030514>
- García, G. y Cantú, P. (2009). ESCENARIO DEL AGUA EN MÉXICO.
- Gil, E. M. (2018). *Obtención de variables físicas a partir de Niveles Digitales*.
- Gordon HR, Wang M (1994) Influencia de las cabrillas oceánicas en la atmósfera Corrección esférica de sensores de color del océano. *Appl Opt* 33(33):7754– 7763.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: análisis geoespacial a escala planetaria para todos. *Remote Sensing of Environment*.
- Humberto Álvarez L. Ana Elvia Arana, Luisa Marina Baena A, Cristian Balan- ta M., Wilmar Bolivar G., Álvaro Calero A, Fernando Castro H., Pablo Emilio Fló rez B., Natalia Górez H. Carlos Alberto González E, Carmen Eugenia Mondragon P., Leonel A. Muñoz A,

- Jorge Enrique Orejuela G. María Victoria Paing Robert B. Peck, Héctor J. Quintero Milton Reyes G., María Rivera, Vladimir Rojas D., Marie Isabel Salazar R. María Clemencia Sandoval G William Vargas. (2009). Humedales del valle geográfico del río Cauca: génesis, biodiversidad y conservación. CVC
- Ibérica, S. (2018). Eutrofización: Causas, consecuencias y soluciones. Agua. iagua.es
- Técnica de Eskisehir, Eskisehir. Revista Internacional de Información Geográfica.
- Inecol. (2 febrero 2022). Importancia de los humedales para hacer frente al cambio climático. telesurtv.net.
- Instituto Humboldt. (2021). Humedales: un tesoro anfibio que sobrevive en el 26 por ciento de Colombia. Humboldt.org.co.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2017). An Introduction to Statistical Learning with Applications in R (Corrected at 6th printing). Springer Science+Business Media.
- Kapalanga, T. S., Hoko, Z., Gumindoga, W., & Chikwiramakomo, L. (2020). Remote sensing-based algorithms for water quality monitoring in Olushandja Dam, north-Central Namibia. Water Science & Technology Water Supply.
- Kratzer, C y Brezonik, P. Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida. Water resources Bulletin. 1981.
- LG Sonic B.V. (2024). *Conocer y medir la eutrofización de lagos y masas de agua*. LG Sonic B.V. Lgsonic.com.
- Ling, F.; Foody, transgénico; Du, H.; Prohibición, X.; Li, X.; Zhang, Y.; Du, Y. Monitoreo de la Contaminación Térmica en Ríos Aguas Abajo de Represas con Imágenes Infrarrojas Térmicas Landsat ETM+. Sensores remotos 2017 , 9 , 1175.
- López, J. F. (2017). *Coeficiente de determinación (R cuadrado)*. Economipedia.com.
- López, P. Rodrigo, G.; Zúñiga, V. Jesús, F. (2024). Evaluación del estado trófico de la laguna Iberia sur (Santuario Nacional Lagunas De Mejía) mediante la correlación de índices de clorofila a y técnicas de teledetección - periodo 2018-2020. Universidad Católica de Santa María.
- (NASA), National Aeronautics and Space Administration. (2019). Landsat 8 Users Handbook. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>
- Madrigal, E. (2022, 28 de octubre). *Conoce las métricas de precisión más comunes para Modelos de Regresión*. Growupcr.com
- Merchán Camargo, Z. C. (2018) Identificación espacio temporal de clorofila- α mediante imágenes de satélite en sistemas acuáticos. 2018. 100 p. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia.
- Maurizio Pieri, Luca Massi, Caterina Nuccio, Luigi Lazzara, Felicita Scapini, Claudia Rossano y Fabio Maselli (2021) Evaluación de las imágenes Landsat-8 OLI y Sentinel- 2 MSI para estimar la calidad ecológica de las aguas portuarias, European Journal of Remote

- Sensing. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia.
- McFeeters, SK El uso del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) en la delineación de elementos de agua abiertos. En t. J. Remote Sens 1996
- Montero Granados. R (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.
- Nixon, S. 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41: 199-219.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2020). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático. Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos.
- Ortega, C. (2023, 4 de mayo). Desviación estándar: Qué es, usos y cómo obtenerla. QuestionPro. (www.questionpro.com/blog/es/desviacion-estandar/)
- Papamija, M. (2019). Caracterización molecular, morfológica y diversidad genética de la ictiofauna en las reservas naturales bosque de yotoco, laguna de sonso y usos potenciales.
- Quiroz, S. Rhydy, L; Caballero, Wilfredo. M. (2022). Evaluación de los estados tróficos de la laguna principal del área de conservación regional albufera de medio mundo, huaura-lima, Perú.
- Ramos Moreno, A. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia). *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 10(2), 172-192.
- Rivera, D. C. (2020). Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales. Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Dirección de Postgrado. Chillán, Chile.
- Roldán, L. F. (25 de septiembre del 2019). Humedales: qué son, tipos y características. ecologiaverde.com.
- Rodríguez Miranda, W. R., Escartin Sauleda, E. R., Fernández Núñez, H. M., & Valcarce Ortega, R. M. (2022). ESTADO ACTUAL DEL EMPLEO DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LAS VARIACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES DE LOS ECOSISTEMAS RELACIONADOS CON EL AGUA (PRIMERA EDICIÓN: 2022). Departamento de Geociencias, CUJAE. https://www.researchgate.net/publication/364848711_ESTADO_ACTUAL_DEL_EMPLEO_DE_LA_TELEDETECCION_PARA_EL_ESTUDIO_DE_LAS_VARIACIONES_ESPACIALES_Y_TEMPORALES_DE_LOS_ECOSISTEMAS_RELACIONADOS_CON_EL_AGUA
- Ruddick, K. G., Cauwer, V. De, Park, Y., Moore, G. 2006. Mediciones marítimas de

reflectancia de salida de agua en el infrarrojo cercano: el espectro de similitud para aguas turbias.

- Sanjeev Kumar Dash, Ajit Kumar Behera, Satchidananda Dehuri, Ashish Ghosh. (2023, 13 de enero). Un marco de detección y eliminación de valores atípicos en la tarea de clasificación de la minería de datos. Diario de análisis de decisiones 6 (2023) 100164.
- Sentinel Online. (2024). Acceso a la imagen de referencia global (GRI) de Copernicus Sentinel-2. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/global-reference-image>
- Semana. (2019). Laguna de Sonso, en el Valle, presenta altos niveles de contaminación. semana.com
- SIDAP Valle del Cauca (2018). DRMI Laguna de Sonso | SIDAP Valle del Cauca. Sidap.cvc.gov.co.
- SIDAP Valle del Cauca (2023). DRMI Laguna de Sonso | SIDAP Valle del Cauca. Sidap.cvc.gov.co. (<https://sidap.cvc.gov.co/es/areas-protegidas/drmi-laguna-de-sonso>)
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (2022). Monitoreo hidrológico. <http://www.siac.gov.co/recursos-hidricos>
- Suhoschi Gabriela. (24 de agosto de 2022). Semana Mundial del Agua 2022: la importancia del agua que no se ve. Naciones Unidas (ONU). <https://www.un.org/es>
- T. O. Hodson, "Error cuadrático medio (RMSE) o error absoluto medio (MAE): Cuándo usarlos o no," Centro de Ciencias del Agua del Medio Oeste Central del Servicio Geológico de EE. UU., 2022.
- Toledo, J. 1990. Informe preliminar sobre os estudos para obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais. São Paulo, CETESB, 12 p.
- Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. (2017, 5 julio). ACUERDO 92 DE 2019. legal.unal.edu.co
- Ugur Avdan, Gordana Jovanovska, "Algoritmo para el mapeo automatizado de la temperatura de la superficie terrestre utilizando datos satelitales LANDSAT 8", Journal of Sensors , vol. 2016, artículo ID 1480307, 8 páginas, 2016.
- United States Golf Association (USGS). (2024, mayo). Landsat 8-9 Colección 2 (C2) Guía de productos científicos de nivel 2 (L2SP). Departamento del Interior Servicio Geológico de EE. UU.
- Uribe Ospina, D. (2022). Revisión de métodos de monitoreo de calidad de agua con herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica – (SIG) para Colombia (Monografía de Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática). Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Medellín, Antioquia, Colombia.

- Vanhellemont Q, Ruddick K (2015) Ventajas de SWIR de alta calidad bandas para el procesamiento del color del océano: ejemplos de Landsat-8. Sensor remoto del entorno 161:89–106
- Westreicher, G. (2021). Promedio. Revisado por J. F. López. Actualizado el 27 de enero de 2021.
- Soria-Perpiñán, X., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., Soria, J. M., Delegido, J., Vicente, E., & Moreno, J. (2021). Seguimiento del estado ecológico del lago hipertrófico (Albufera de Valencia, España) mediante imágenes multitemporales Sentinel-2. European Journal of Remote Sensing.
- Yigit Avdan, Z., Kaplan, G., Goncu, S., & Avdan, U. (2019, diciembre 2). Monitoreo de la calidad del agua de pequeños cuerpos de agua utilizando datos de teledetección de alta resolución. Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Valencia.

10. ANEXO

- 1) Análisis fisicoquímico del agua de la laguna de sonso entre los años de (2013-2022) suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)

Repositorio pendiente

[Jhon Amaya & Valentina Serrano](#)

- 2) Código de para la extracción de imágenes en el entorno de Google Earth Engine (GEE)

Repositorio

[Codigo Imagenes Landsat 8](#)

- 3)

Tabla 3

Listado de imágenes satelitales de Landsat 8 OLI según su fecha del paso del satélite, agrupadas por la fechas de muestras de laboratorio

Fechas imágenes satelitales	Diferencia de días	Fecha laboratorio
-----------------------------	--------------------	-------------------

2 de septiembre de 2013	5	28 de agosto de 2013
21 de noviembre de 2013	-5	26 de noviembre de 2013
21 de septiembre de 2014	-9	30 de septiembre de 2014
4 de junio de 2015	-6	10 de junio de 2015
29 de diciembre de 2015	41	18 de noviembre de 2015
24 de julio de 2016	5	19 de julio de 2016
13 de noviembre de 2016	-2	15 de noviembre de 2016
24 de mayo de 2017	-20	13 de junio de 2017
29 de septiembre de 2017	9	20 de septiembre de 2017
27 de mayo de 2018	5	22 de mayo de 2018
27 de marzo de 2019	-47	13 de mayo de 2019
3 de septiembre de 2019	-36	9 de octubre de 2019
5 de septiembre de 2020	-11	16 de septiembre de 2020
27 de enero de 2021	-41	9 de marzo de 2021
22 de mayo de 2022	-37	28 de junio de 2022
30 de noviembre de 2022	-6	6 de diciembre de 2022

Fuente: Propia

4) Asociación de los parámetros físicoquímico del agua de la laguna de sonso por estación de monitoreo entre los años de (2013-2022) suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)

Estación (ID)	Fechas (dd/mm/aa)	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /l)	Nitratos (mg N-NO ₃ /l)	Fósforo Total (mg P/l)
1	28/8/2013	7,67	60	11,4	4,68	0,114	0,0864
	26/11/2013	3,39	56,6	51,3	3,34	0,114	0,0509
	30/9/2014	7,25	95	146	0,735	2,5	0,299
	10/6/2015	7,02	6,74	12	1,59	0,12	0,0916
	18/11/2015	8,3	84,7	102	3,65	0,361	0,121
	19/7/2016	7,66	8,5	18	2,35	3,25	0,252
	15/11/2016	7,31	24,1	36	1,74	5,32	0,257
	13/6/2017	6,65	14,4	30	1,29	2,37	0,331
	20/9/2017	7,02	417	436	3,47	0,0921	0,652
	22/5/2018	7,16	14	12	2,7	4,6	0,115
	13/5/2019	7,09	15	11,6	0,405	0,256	0,18

9/10/2019	7,52	5,6	11,6	3,69	0,052	0,0662
16/9/2020	7,36	50	81	1,66	0,171	0,193
9/3/2021	6,88	45	44	0,571	0,201	0,446
28/6/2022	6,89	29	16	0,68	0,201	0,112
6/12/2022	6,5	14	11,6	1,69	0,201	0,0959

Estación (ID)	Fechas (dd/mm/aa)	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
2	28/8/2013	7,81	64	11,4	5,24	0,114	0,0915
	26/11/2013	3,33	35,5	34,2	3,22	0,114	0,0509
	30/9/2014	7,51	316	428	0,77	1,11	0,321
	10/6/2015	6,96	7,36	12	2,02	0,114	0,166
	18/11/2015	8,13	134	161	3,58	0,29	0,152
	19/7/2016	7,6	8	16	2,6	2,39	0,243
	15/11/2016	7,3	26,1	40	1,9	5,37	0,253
	13/6/2017	6,7	7	16	1,44	2,01	0,257
	20/9/2017	7,1	234	417	2,1	2,65	0,532
	22/5/2018	6,82	46	36	1,19	3,96	0,446
	13/5/2019	7,12	19	11,6	1,98	0,564	0,134
	9/10/2019	7,23	65	200	0,386	0,052	0,94
	16/9/2020	7,36	60	98	2,1	0,171	0,0935
	9/3/2021	6,97	45	52	0,571	0,201	0,0959
	28/6/2022	6,98	17	13	0,71	0,201	0,241
	6/12/2022	6,45	14	11,6	1,73	0,201	0,0959

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
---------------	--------	--------------	-----------------	--------------------------------	----------------------------	-----------------------	------------------------

3	28/8/2013	7,94	74	18,5	5,77	0,114	0,0833
	26/11/2013	3,28	27,9	66	3,32	0,115	0,0509
	30/9/2014	7,15	334	290	0,5	1,28	0,0509
	10/6/2015	6,87	13,9	12	0,562	0,13	0,123
	18/11/2015	8,24	107	18,2	3,54	0,384	0,143
	19/7/2016	7,63	11	17	2,85	3,46	0,179
	15/11/2016	7,13	71	86,7	1,34	-	0,92
	13/6/2017	6,53	7,6	39	1,44	1,24	0,18
	20/9/2017	7,01	208	323	1,94	2,33	0,574
	22/5/2018	6,96	27	22	2,7	4,56	0,263
	13/5/2019	7,2	10	11,6	3,46	0,222	0,111
	9/10/2019	7,27	29	20	3,47	0,052	0,134
	16/9/2020	7,41	90	140	2	0,171	0,0935
	9/3/2021	7,02	50	57	0,571	0,201	0,442
	28/6/2022	6,91	31	21	0,76	0,201	0,16
	6/12/2022	6,4	50	11,6	1,88	0,201	0,202

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
4	28/8/2013	7,56	80	69	3,35	0,623	0,493
	26/11/2013	7,66	59	130	1,63	0,114	0,394
	30/9/2014	7,81	14,1	58	6,37	0,518	0,488
	10/6/2015	7,76	8,31	22	1,51	0,516	0,849
	18/11/2015	7,55	118	610	0,659	0,444	0,622
	19/7/2016	7,73	8,5	18	0,903	1,66	1,23
	15/11/2016	7,88	10,1	19	2,19	0,18	1,48

13/6/2017	8,01	7,6	20	0,5	1,02	0,238
20/9/2017	8,03	4,52	56	3,71	6,8	0,78
22/5/2018	8,37	7,5	14	5,56	0,31	0,952
13/5/2019	8,02	5,1	11,6	1,73	1,42	1,69
9/10/2019	8,22	21	42	5,11	0,052	0,465
16/9/2020	-	-	-	-	-	-
9/3/2021	8,3	16	24	4,49	0,447	0,964
28/6/2022	7,54	17	11,6	0,74	0,529	0,815
6/12/2022	7,97	50	40	2,93	0,201	0,566

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
5	28/8/2013	8,1	30	18,5	6,49	0,21	0,0509
	26/11/2013	8,14	1,22	35	9,23	0,151	0,148
	30/9/2014	-	-	-	-	-	-
	10/6/2015	8,33	18,1	34	6,69	0,946	0,126
	18/11/2015	8,44	8,66	12,7	8,14	1,52	0,19
	19/7/2016	8,49	618	31,5	5,93	2,08	0,12
	15/11/2016	7,87	73	134	7,54	2,43	0,11
	13/6/2017	7,93	11,2	42	5,75	2,58	0,087
	20/9/2017	8,11	6,78	15	6,89	3,18	0,172
	22/5/2018	7,95	15	26	5,79	1,32	0,0662
	13/5/2019	7,91	45	51	6,4	1,16	0,13
	9/10/2019	8,39	20	23	8,34	0,052	0,074
	16/9/2020	-	-	-	-	-	-
	9/3/2021	7,73	45	83	5,02	0,201	0,094
	28/6/2022	7,8	41	42	5,66	1,65	0,101

6/12/2022	7,87	13	12	6,42	1,32	0,0959
-----------	------	----	----	------	------	--------

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
6	27/8/2013	8,09	400	140	3,18	0,943	1,06
	26/11/2013	7,61	15	67	1,61	0,124	1,22
	30/9/2014	7,75	3,47	43	3,65	9,56	3,04
	11/6/2015	8,04	28,1	72	5,76	6,79	0,327
	18/11/2015	7,43	58	170	3,85	16,31	0,655
	19/7/2016	7,86	25	31	3,7	6,52	0,643
	15/11/2016	7,73	32	48	3,78	17,64	1,2
	13/6/2017	7,74	7,3	24	0,5	7,17	1,18
	20/9/2017	8,01	22,2	45	3,58	6,9	0,867
	22/5/2018	8,17	11	14	4,6	0,4462	4,39
	13/5/2019	7,74	22	24	3,96	9,5	0,835
	9/10/2019	7,89	35	55	4,37	4,216	0,666
	2020	-	-	-	-	-	-
	9/3/2021	8,08	30	51	3,8	6,79	0,488
	28/6/2022	7,62	26	33	3,31	5,147	0,625
	6/12/2022	7,65	18	17	3,4	5,76	0,599

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
7	27/8/2013	6,61	30	11	9,03	0,281	0,174
	26/11/2013	7,62	44,2	101	9,86	0,114	0,142

2014	-	-	-	-	-	-
11/6/2015	8,13	13,6	46	6,54	3,66	0,158
18/11/2015	7,96	39,3	42	5,45	21,09	0,332
19/7/2016	8,28	1	11,6	9,75	13,35	0,111
15/11/2016	7,26	89	110	4,33	61,9	0,29
13/6/2017	8,18	12,3	13	6,89	8,69	0,135
20/9/2017	8,08	6,14	13	6,72	17,28	0,153
22/5/2018	8,01	3,6	11,6	7,4	5,27	0,154
13/5/2019	7,9	7,8	12	7,48	3,91	0,152
9/10/2019	7,98	3,7	11,6	8,52	4,33	0,21
2020	-	-	-	-	-	-
9/3/2021	7,92	23	39	5,17	8,63	0,122
28/6/2022	8,03	50	59	6,01	9,56	0,169
6/12/2022	8,32	18	15	6,47	8,04	0,0959

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
8	27/8/2013	7,77	18	11	7,79	0,401	0,149
	26/11/2013	7,75	3,33	11	4,58	0,217	0,724
	30/9/2014	7,63	2,16	11	7,17	1,99	0,248
	11/6/2015	7,39	7,33	16	3,48	3,36	0,258
	18/11/2015	7,7	16,1	53,8	4,7	42,54	0,449
	19/7/2016	7,56	13,5	22	4,46	5,27	0,16
	15/11/2016	7,32	13,3	11,6	8,24	12,74	0,25
	13/6/2017	7,64	14	17	5,01	18,63	0,529
	20/9/2017	7,64	22,5	45	2,15	0,5	0,264

22/5/2018	7,66	24	38	7,19	5,65	0,227
13/5/2019	7,28	8,3	12	3,56	5,23	0,163
9/10/2019	7,83	60	38	7,1	1,86	0,177
2020	-	-	-	-	-	-
9/3/2021	7,31	4,4	11,6	1,83	5,59	0,202
28/6/2022	7,22	10	11,6	3,9	9,94	0,44
6/12/2022	7,65	6	11,6	7,01	6,57	0,771

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
9	27/8/2013	7,64	8	14,5	0,624	0,135	1,62
	26/11/2013	7,83	1,62	11,4	1,78	0,224	1,06
	30/9/2014	7,73	2,66	17	3,57	0,798	1,99
	11/6/2015	7,9	2,16	11,4	1,92	0,114	0,891
	18/11/2015	7,81	4,5	32	5,1	1,37	0,527
	19/7/2016	-	-	-	-	-	-
	15/11/2016	7,67	4,4	13	4,08	2,17	1,89
	13/6/2017	8,11	0,44	11,6	5,13	16,3	0,36
	20/9/2017	7,89	2,22	12	1,98	9,72	1,66
	22/5/2018	-	5,5	11,6	5,4	2,44	0,285
	13/5/2019	7,68	5,2	11,6	1,44	1,16	0,731
	9/10/2019	7,89	6,5	11,6	0,992	0,28	1,19
	2020	-	-	-	-	-	-
	9/3/2021	8,06	9,2	26	4,48	1,38	0,481
	28/6/2022	7,89	7,1	11,6	3,79	2,3	0,582
	6/12/2022	8,01	2,2	11,6	3,03	1,091	0,543

Estación (ID)	Fechas	pH (unidad.)	Turbiedad (UNT)	Sólidos Suspendidos (mg SST/l)	Oxígeno Disuelto (mg O2/l)	Nitratos (mg N-NO3/l)	Fósforo Total (mg P/l)
10	27/8/2013	7,25	25	11	0,5	0,116	0,0686
	26/11/2013	7,54	86,9	86	2,11	0,114	0,155
	30/9/2014	7,41	72,3	175	2,53	1,789	0,238
	11/6/2015	6,97	13,4	12	0,5	0,114	0,0769
	18/11/2015	7,76	3,3	62	1,2	0,7	0,101
	19/7/2016	6,95	6,5	11,6	0,975	2,93	5,24
	15/11/2016	7,05	7,9	11,6	0,5	3,64	3,1
	13/6/2017	7,08	3,92	11,6	0,5	5,54	0,384
	20/9/2017	7,09	3	12	0,986	9,23	0,769
	22/5/2018	7,32	15	26	1,15	33,34	0,174
	13/5/2019	6,93	27	20	0,57	1,05	0,361
	9/10/2019	6,96	18	17	1,65	0,28	0,175
	2020	-	-	-	-	-	-
	9/3/2021	6,78	67,5	562	0,9	2,23	0,0959
	28/6/2022	6,78	55	66	0,67	1,09	0,208

5) Resultados de la implementación del proceso rango intercuartil (IQR) aplicado a los datos

[ATIPICOS \(1\).xlsx](#)

6) Archivos xlsx

[V6](#)

7) Combinaciones de entre los datos in-situ e imágenes satelitales

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1cJahY352gyqBGp_mCsuAdl1Ajk8tmTHcMQf5qv1RQ9g/edit?usp=sharing

8) Porcentaje de datos que corresponde a la pérdida de información a causa del no haberse realizado estudios con respecto a la totalidad de los mismos por cada estación dividida por parámetro

Estación	Parámetro	Pérdida de información por parámetro (%)
1	pH	12,50%
	Turbiedad	6,25%
	Sólidos suspendidos	12,50%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	0%
	Fósforo total	0%
2	pH	0%
	Turbiedad	0%
	Sólidos suspendidos	0%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	0%
	Fósforo total	0%
3	pH	0%
	Turbiedad	0%
	Sólidos suspendidos	0%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	6,25%
	Fósforo total	0%
4	pH	6,25%
	Turbiedad	6,25%
	Sólidos suspendidos	6,25%
	Oxígeno disuelto	6,25%
	Nitratos	6,25%
	Fósforo total	6,25%
5	pH	12,50%
	Turbiedad	12,50%
	Sólidos suspendidos	12,50%
	Oxígeno disuelto	12,50%
	Nitratos	12,50%
	Fósforo total	12,50%
6	pH	6,25%
	Turbiedad	6,25%
	Sólidos suspendidos	6,25%
	Oxígeno disuelto	6,25%
	Nitratos	6,25%
	Fósforo total	6,25%
7	pH	12,50%
	Turbiedad	12,50%
	Sólidos suspendidos	12,50%

8	Oxígeno disuelto	12,50%
	Nitratos	12,50%
	Fósforo total	12,50%
	pH	6,25%
	Turbiedad	6,25%
	Sólidos suspendidos	6,25%
	Oxígeno disuelto	6,25%
	Nitratos	6,25%
	Fósforo total	6,25%
	pH	18,75%
9	Turbiedad	12,5%
	Sólidos suspendidos	12,5%
	Oxígeno disuelto	12,5%
	Nitratos	12,5%
	Fósforo total	12,5%
	pH	6,67%
10	Turbiedad	6,67%
	Sólidos suspendidos	6,67%
	Oxígeno disuelto	6,67%
	Nitratos	6,67%
	Fósforo total	6,67%

9) Porcentaje de datos correspondiente a los valores atípicos con respecto a la totalidad de estos por cada estación dividida por parámetro

Estación	Parametro	Porcentaje de valores atípicos (%)
1	pH	12,50%
	Turbiedad	6,25%
	Sólidos suspendidos	12,50%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	0%
	Fósforo total	0%
2	pH	12,50%
	Turbiedad	12,50%
	Sólidos suspendidos	12,50%
	Oxígeno disuelto	6,25%
	Nitratos	6,25%
	Fósforo total	6,25%
3	pH	18,75%
	Turbiedad	12,50%
	Sólidos suspendidos	6,25%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	6,67%

	Fósforo total	18,75%
	pH	0%
	Turbiedad	13,33%
4	Sólidos suspendidos	13,33%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	6,67%
	Fósforo total	6,67%
	pH	0%
	Turbiedad	7,14%
5	Sólidos suspendidos	14,29%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	0%
	Fósforo total	7,14%
	pH	0%
	Turbiedad	13,33%
6	Sólidos suspendidos	13,33%
	Oxígeno disuelto	20%
	Nitratos	13,33%
	Fósforo total	13,33%
	pH	14,29%
	Turbiedad	7,14%
7	Sólidos suspendidos	14,29%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	7,14%
	Fósforo total	14,29%
	pH	0%
	Turbiedad	6,67%
8	Sólidos suspendidos	0%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	13,33%
	Fósforo total	0%
	pH	0%
	Turbiedad	0%
9	Sólidos suspendidos	14,29%
	Oxígeno disuelto	0%
	Nitratos	14,29%
	Fósforo total	0%
	pH	0%
	Turbiedad	0%
10	Sólidos suspendidos	13,33%
	Oxígeno disuelto	6,67%
	Nitratos	13,33%
	Fósforo total	13,33%

10) *Comparación de resultados de imagen con datos in-situ y su diferencia porcentual por parámetro en cada estación de monitoreo*

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Laguna de Sonso - Zona Sur		

	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	20,20	25,00	19%
Sólidos	34,64	21,00	65%
pH	7,05	7,89	11%
Oxígeno	1,97	4,66	58%
Nitratos	-0,44	0,20	320%
Fosforo	0,14	0,15	2%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Laguna de Sonso - Zona Centro		

	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	42,11	28,00	50%
Sólidos	81,33	177,00	54%
pH	7,42	7,75	4%
Oxígeno	1,65	4,48	63%
Nitratos	1,07	0,20	435%
Fosforo	0,18	0,17	9%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Laguna de Sonso - Zona Norte		

	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	16,12	29,00	44%
Sólidos	45,13	19,00	138%
pH	7,38	8,05	8%
Oxígeno	2,36	4,51	48%
Nitratos	0,59	0,20	193%
Fosforo	0,19	0,09	98%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Zanjon Garzonero		

	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	33,58	37	9%
Sólidos	54,65	49,00	12%
pH	7,99	8,50	6%
Oxígeno	4,84	5,67	15%
Nitratos	0,36	3,69	90%
Fosforo	0,28	0,09	199%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Zanjon Mocoa		
	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	39,51	11,00	259%
Sólidos	63,54	21,00	203%
pH	7,61	7,73	2%
Oxígeno	6,30	6,01	5%
Nitratos	3,32	0,20	1554%
Fosforo	0,15	0,51	70%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Zanjon El Vinculo		
	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	19,24	45,00	57%
Sólidos	58,59	65,00	10%
pH	7,58	8,42	10%
Oxígeno	2,72	7,37	63%
Nitratos	4,63	0,20	2183%
Fosforo	0,22	1,13	81%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Zanjon Guayabito		
	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	21,98	20,00	10%
Sólidos	25,31	28,00	10%
pH	7,85	7,94	1%
Oxígeno	8,22	3,31	148%
Nitratos	-2,46	0,20	1323%
Fosforo	0,17	0,74	77%

Estaciones de Muestreo			
Parametros	Zanjon Canada		
	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	24,60	7,90	211%
Sólidos	-25,26	11,60	318%
pH	7,57	7,42	2%

Oxígeno	11,89	5,94	100%
Nitratos	6,72	0,20	3242%
Fosforo	0,48	0,27	78%

Estaciones de Muestreo

Parametros Zanjon Guaymaral

	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	4,87	4,30	13%
Sólidos	8,70	11,60	25%
pH	7,51	7,77	3%
Oxígeno	-1,30	2,31	156%
Nitratos	0,70	0,20	246%
Fosforo	0,47	0,73	36%

Estaciones de Muestreo

Parametros Caño Nuevo

	Imagen	In-situ	Diferencia
Turbieda	2,85	8,20	65%
Sólidos	7,29	11,60	37%
pH	7,49	7,44	1%
Oxígeno	1,06	1,42	25%
Nitratos	0,44	1,17	62%
Fosforo	0,23	0,11	117%