

Valoración de la Calidad del Agua de Tres Ciénagas del Magdalena Medio Santandereano

Nathaly Andrea Montoya Torres

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Recursos Hídricos y Saneamiento

Ambiental

Director(a):

María Isabel Criales Hernández

Dr. *rer nat*

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2024

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Descripción del Problema	13
1.1 Pregunta de Investigación	14
2. Justificación	14
3. Objetivos	17
3.1 Objetivo General	17
3.2 Objetivos Específicos	17
4. Marco de Referencia	18
4.1 Marco Conceptual	18
4.1.1 Ciénagas	18
4.1.2 Pulso de Inundación	18
4.1.3 Índices de Calidad de Agua	20
4.1.3.1 Índice de Estado Trófico modificado por Toledo et. al. (1984) (IETm).	21
4.1.3.2 Metodología para la Determinación de Calidad del Agua.	23
4.1.3.3 Índice de calidad de agua (ICA) IDEAM.	24
4.2 Estado del Arte	27
5. Metodología	30
5.1 Área de Estudio	30
5.1.1 Contexto Regional	30

VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE TRES CIÉNAGAS	3
5.1.2 Contexto Local	32
5.2 Población y Muestra	37
5.3 Fase de Campo	38
5.4 Fase de Análisis	40
5.4.1 Descripción de las características fisicoquímicas entre las tres ciénagas	40
5.4.2 Establecimiento de la calidad del agua a través de diferentes índices	41
5.4.3 Análisis de la variación en la calidad del agua entre las tres ciénagas	42
5.5 Alcances	43
6. Resultados	43
6.1 Descripción de características fisicoquímicas del agua en las ciénagas	43
6.1.1 Resultados conductividad, oxígeno disuelto, pH y Temperatura	43
6.1.1.1 Conductividad..	43
6.1.1.2 Oxígeno.	49
6.1.1.3 pH.	53
6.1.1.4 Temperatura.	56
6.1.2 Resultado Concentración de Clorofila.	60
6.1.2.1 Comparación de los Datos de Clorofila..	63
6.2 Establecimiento de la Calidad del Agua de las Ciénagas por Medio de Índices	63
6.2.1 Índice Estado Trófico Modificado	63
6.2.2 Índice Canadian Water Quality Index	65
6.2.3 Índice de Calidad de Agua ICA IDEAM	66
6.3 Análisis de Variación en la Calidad del Agua de las Ciénagas.	67
6.3.1 Variación Temporal	68

VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE TRES CIÉNAGAS	4
6.3.2 Variación Espacial	69
7. Discusión	70
8. Conclusiones	75
9. Recomendaciones	76
Referencias	77
Apéndices	85

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Valores Mensuales de Precipitación en el Magdalena Medio.</i>	20
Figura 2. <i>Mapa de la distribución de las Ciénagas objeto estudio y su ubicación dentro del departamento de Santander.</i>	32
Figura 3. <i>Ciénaga de Paredes.</i>	34
Figura 4. <i>Ciénaga del Llanito.</i>	35
Figura 5. <i>Ciénaga de Río Viejo.</i>	36
Figura 6. <i>Perfiles verticales de conductividad.</i>	47
Figura 7. <i>Perfiles verticales de oxígeno.</i>	52
Figura 8. <i>Perfiles verticales de pH</i>	55
Figura 9. <i>Perfiles verticales de temperatura.</i>	59
Figura 10. <i>Diagrama box plot concentración clorofila por tipo de pigmento marzo y mayo 2022</i>	62

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación del IETm</i>	22
Tabla 2. <i>Variables cálculo ICA IDEAM y Ponderación</i>	24
Tabla 3. <i>Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA</i>	27
Tabla 4. <i>Coordenadas geográficas de las ciénagas de estudio y estaciones de muestreo.</i>	37
Tabla 5. <i>Estadística de la concentración de clorofilas a, b, y c marzo-mayo 2022</i>	61
Tabla 6. <i>Índice Estado Trófico modificado (IETm)</i>	64
Tabla 7. <i>Resultados del cálculo del índice Canadian Water Quality Index</i>	65
Tabla 8. <i>Índice ICA – IDEAM – Ciénagas</i>	67
Tabla 9. <i>Comparativa de los índices promediados espacio temporalmente</i>	68
Tabla 10. <i>Prueba Kruskal Wallis – Ciénagas El Llanito, Paredes y Río Viejo</i>	70
Tabla 11. <i>Prueba de Kruskal Wallis para la espacialidad de las ciénagas</i>	71

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Registros de los extractos en el mes de marzo 2022; Río Viejo, Llanito y Paredes.</i>	85
Apéndice B. <i>Registros de los extractos en el mes de mayo 2022; Río Viejo, Llanito y Paredes.</i>	86
Apéndice C. <i>Resultados estadística descriptiva - parámetros fisicoquímicos.</i>	87
Apéndice D. <i>Resultados IETm para la Ciénaga Llanito.</i>	90
Apéndice E. <i>Resultados IETm para la Ciénaga Paredes.</i>	91

Resumen

Título: Valoración de la Calidad del Agua de Tres Ciénagas del Magdalena Medio Santandereano

Autora: Nathaly Andrea Montoya Torres

Palabras Claves: Ciénagas, Calidad del agua, ciénagas, momentos hidrológicos, propiedades fisicoquímicas.

Descripción

El presente proyecto evalúa la incidencia de la variabilidad climática en la calidad de agua en las ciénagas El Llanito, Paredes, y Río Viejo del Valle Medio del Río Magdalena, para ello se realizó un análisis de la calidad fisicoquímica en dos momentos hidrológicos contrastantes (Aguas altas y aguas bajas).

El presente estudio se desarrolló a partir de la evaluación de variables fisicoquímicas y ambientales de muestras tomadas en seis campañas de monitoreo en las ciénagas en el periodo de 2013 y 2022, y que fueron suministradas por el laboratorio de hidrobiología de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Se calculó y evaluó el índice de calidad del agua y estado trófico de las Ciénagas mediante los Índices de Estado Trófico Modificado por Toledo (IETm), Índice de Calidad de Agua ICA-IDEAM y Índice Canadian Water Quality Index (CWQI). Dichos índices fueron promediados por cada Ciénaga, para generar el cálculo de desviación estándar y con ellos de la calidad del agua.

Finalmente se encontró que en la temporada de aguas altas los valores de calidad de agua fueron menores a los valores obtenidos en la temporada de aguas bajas en las tres ciénagas, el Llanito y Paredes se obtuvo una calidad de agua buena en temporada aguas bajas y apta en temporada de aguas altas, para el caso de la ciénaga Río Viejo en ambos periodos hidrológicos es calidad apta.

Abstract

Title: Assessment of the Water Quality of Three Ciénagas del Magdalena Medio Santandereano

Author: Nathaly Andrea Montoya Torres

Keywords: Swamps, Water quality, hydrological moments, physicochemical properties.

Description

This project assesses the impact of climate variability on water quality in the wetlands of El Llanito, Paredes, and Río Viejo in the Middle Valley of the Magdalena River. The study involved a physicochemical analysis of water quality conducted during two contrasting hydrological periods (high water and low water). Data were collected from six monitoring campaigns between 2013 and 2022, provided by the Hydrobiology Laboratory of the Industrial University of Santander (UIS).

The water quality and trophic state of the wetlands were evaluated using the Modified Toledo Trophic State Index (IETm), the IDEAM Water Quality Index (ICA-IDEAM), and the Canadian Water Quality Index (CWQI). These indices were averaged for each wetland to calculate the standard deviation and assess water quality.

The results revealed that during high water periods, water quality values were lower compared to those obtained during low water periods in all three wetlands. Specifically, El Llanito and Paredes wetlands showed good water quality during low water periods and suitable quality during high water periods. In contrast, Río Viejo wetland maintained suitable water quality throughout both hydrological periods.

Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la vida en nuestro planeta. Es esencial para el desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, así como para la preservación de los ecosistemas (ONU, 2019). No solo sustenta los ecosistemas y su biodiversidad, sino que también es fundamental para el desarrollo social y económico de las comunidades humanas.

Colombia es un país privilegiado por su riqueza hídrica, donde se encuentran diversos ecosistemas acuáticos que contribuyen a la provisión de servicios ecosistémicos vitales, como lo señala Salas (2022), señala que los ecosistemas acuáticos continentales proveen múltiples beneficios, entre ellos que son fuentes de agua dulce, favorecen la disminución de susceptibilidad de regulación de inundaciones, ayudan al control de la erosión, la mitigación del cambio climático y la provisión de hábitats para especies de flora y fauna. Entre estos ecosistemas, los humedales, y en particular las ciénagas, tienen una gran importancia ecológica y socioeconómica. Sin embargo, enfrentan serias amenazas debido a la contaminación y la degradación. Las ciénagas son ecosistemas de transición entre ambientes acuáticos y terrestres, caracterizados por su poca profundidad y la presencia de vegetación acuática.

Estos humedales desempeñan funciones cruciales, como la regulación del ciclo hidrológico, el control de inundaciones, la depuración del agua, el almacenamiento de carbono y la provisión de hábitats para una diversidad de especies de flora y fauna (Ramsar, 2018). Además, constituyen áreas de gran valor cultural, recreativo y económico para las comunidades locales, ya que ofrecen oportunidades para la pesca, la agricultura y el turismo, entre otras actividades (Ramsar, 2018).

Lamentablemente, las ciénagas en Colombia se enfrentan a numerosas presiones antrópicas que amenazan su integridad y su capacidad para brindar servicios ecosistémicos. Algunas de las principales amenazas incluyen la contaminación por vertidos industriales y domésticos, la sedimentación excesiva, la deforestación de las zonas ribereñas, la sobreexplotación de recursos y el cambio climático (Ochoa et al., 2020). Estos factores han contribuido a la degradación de la calidad del agua, la pérdida de hábitats, la disminución de la biodiversidad y, en algunos casos, la desaparición completa de estas áreas de humedales.

En el departamento de Santander, ubicado en la región del Magdalena Medio colombiano, se encuentran tres importantes ciénagas: la Ciénaga de Paredes, la Ciénaga el Llanito y la Ciénaga de Río Viejo. Estas ciénagas son reconocidas por su gran riqueza y biodiversidad ecológica, además de su importancia para la conservación de especies amenazadas, como el manatí antillano (*Trichechus manatus*). Asimismo, poseen un significativo valor socioeconómico para las comunidades locales.

Sin embargo, a pesar de su gran valor ecosistémico al igual que muchos otros humedales en el país, las ciénagas motivo de estudio del presente proyecto se han visto afectadas por la creciente actividad antrópica que ha deteriorado la biodiversidad biológica ocasionando el detrimento de esta, por actividades de expansión urbanística, la deforestación, ganadería (Garzón y Gutiérrez 2013) (Además, la ausencia de sistemas adecuados de tratamiento de aguas residuales y la falta de conciencia sobre la importancia de estos humedales han exacerbado los problemas (ENA, 2022)

A pesar de la gran actividad agrícola y de la gran importancia por aporte hídrico en la región, estos cuerpos de agua no cuentan con información de la calidad del agua. Esta falta de datos dificulta la implementación de medidas efectivas para la conservación y la gestión sostenible

de estos ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, es imperativo llevar a cabo estudios exhaustivos que permitan evaluar las condiciones hídricas temporales y espaciales, así como identificar los factores que influyen en la calidad del agua en estas áreas.

Por ello, se propone estudiar el estado de la calidad del agua de estas tres ciénagas que hacen parte de la cuenca hídrica del Magdalena Medio, a través de información secundaria proveniente de proyectos desarrollados por el Laboratorio de Hidrobiología de la Universidad Industrial de Santander, donde se analizó la variación de la calidad del agua durante los periodos de aguas altas y de aguas bajas, a partir de la medición de las variables fisicoquímicas recolectadas durante los años 2013 y 2022 y el cálculo de índices de calidad.

Los resultados de este estudio contribuyen a llenar el vacío de información existente, sino que también proporcionarán una base sólida para el desarrollo de planes de manejo y estrategias de conservación más efectivas en los humedales de Colombia. Comprender la calidad del agua en estos ecosistemas acuáticos es fundamental para garantizar su sostenibilidad a largo plazo y preservar los servicios ecosistémicos que brindan. Al mismo tiempo, este conocimiento será una herramienta para respaldar la toma de decisiones informadas y promover la gobernanza efectiva del recurso hídrico en la región del Magdalena Medio santandereano. En última instancia, este estudio representa un esfuerzo por contribuir a la conservación de la biodiversidad y al bienestar de las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas. Al abordar los desafíos relacionados con la contaminación y la degradación de las ciénagas, se espera sentar las bases para un futuro más sostenible, en el que estos humedales puedan seguir brindando sus invaluable beneficios a las generaciones presentes y futuras.

1. Descripción del Problema

El Magdalena Medio, reconocido por su diversidad de ecosistemas, ofrece una amplia gama de bienes y servicios ecosistémicos, tales como control de inundaciones, reposición de aguas subterráneas, depuración de aguas, biodiversidad, bienestar humano y mitigación del cambio climático (Wulf, 2016). Entre estos ecosistemas, los humedales, definidos por la convención Ramsar, se destacan por su importancia ecológica y su diversidad, incluyendo ciénagas, marismas, pantanos y turberas.

Las ciénagas, dentro de los humedales del Magdalena Medio, son ecosistemas de alta productividad biológica y se consideran zonas de amortiguación y reservas de biodiversidad (Yang et al., 2022). Estos cuerpos de agua poco profundos, con conexiones estacionales o permanentes con los ríos circundantes, son cruciales para el país debido a su valor ecológico y su contribución a la biodiversidad nacional (Moreno *et al.*, 2020).

Sin embargo, las ciénagas del Magdalena Medio, puntualmente en el departamento de Santander, enfrentan una preocupante degradación, lo que representa una amenaza para las especies nativas y las comunidades biológicas asociadas. Esta degradación, causada principalmente por contaminantes derivados de actividades humanas como la ganadería, la agricultura y los asentamientos humanos, así como el vertido directo de residuos industriales y domésticos, ha llevado a pérdidas significativas de biodiversidad y a la disminución del efecto de amortiguación natural, como las inundaciones periódicas (ENA, 2022).

Además, el deficiente sistema de alcantarillado en las comunidades circundantes ha contribuido a la degradación de la calidad del agua en estas ciénagas, exacerbando el déficit hídrico prolongado y aumentando la salinidad y la aridez del suelo (Tomita Vidal, 2022). Dada esta

preocupante situación, es crucial llevar a cabo una evaluación integral de la calidad del agua en estas ciénagas para comprender mejor la naturaleza y el alcance de la degradación.

La valoración de la calidad del agua permite evaluar las características físicas, químicas y biológicas del agua en relación con los estándares naturales y las necesidades humanas (Marín *et al.*, 2018). Como se mencionó anteriormente y de forma específica, existe un total de 69 humedales a lo largo del Magdalena Medio Santandereano distribuidos en 7 municipios, de los cuales fueron seleccionadas tres ciénagas (Ciénaga de Paredes, Ciénaga el Llanito y Ciénaga de Rio Viejo) en los municipios de Puerto Wilches, Cimitarra y Barrancabermeja. Estas tres ciénagas fueron seleccionadas por su gran importancia ambiental, social y económica, los servicios ecosistémicos que proveen y el alto grado de impacto contaminante sobre los cuerpos de agua y sus ecosistemas asociados.

Por lo tanto, este proyecto tiene como objetivo principal realizar una evaluación detallada de la calidad del agua en tres ciénagas de la cuenca del Magdalena Medio, centrándose en la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del agua y el cálculo de índices de calidad.

1.1 Pregunta de Investigación

¿Existen cambios en la calidad del agua en las ciénagas del Magdalena medio santandereano durante momentos hidrológicos contrastantes?

2. Justificación

La relevancia del presente estudio se fundamenta en una serie de factores multidisciplinarios y contextuales que demandan una atención integral y urgente en términos de conservación ambiental y gestión sostenible de recursos naturales en Colombia.

En primer lugar, Colombia ha sido reconocida como una potencia hídrica, como lo confirma el Informe Nacional del Estado de los Recursos Hídricos en Colombia del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2023). Sin embargo, esta abundancia de recursos hídricos no es sinónimo de garantía de calidad. La creciente presión antropogénica sobre los cuerpos de agua, impulsada por actividades industriales, agrícolas y urbanas, plantea serias amenazas a la integridad y la salud de los ecosistemas acuáticos (ENA, 2022).

La comprensión de los impactos ambientales en los sistemas acuáticos colombianos es esencial para guiar la toma de decisiones informadas en materia de conservación y gestión de recursos hídricos. El decálogo de impactos ambientales presentado por Donato-Rondón (2021) proporciona una estructura para identificar y abordar las principales amenazas que enfrentan los ecosistemas acuáticos del país.

Además, la evaluación del impacto ambiental de sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, como lo ha investigado Jiménez Sanabria et al. (2023), ofrece información valiosa sobre la eficacia y los posibles efectos secundarios de estas tecnologías en los ecosistemas acuáticos locales. La designación de ciertos humedales colombianos como Humedales de Importancia Internacional, conforme al Decreto 2881 de 2007, destaca la relevancia y la fragilidad de estos ecosistemas únicos en términos de biodiversidad y servicios ecosistémicos. Este reconocimiento oficial subraya la necesidad de fortalecer los esfuerzos de conservación y gestión de humedales en Colombia.

Estas ciénagas del Magdalena Medio a pesar de ser importantes para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos han sido poco estudiadas y en los últimos años enfrentan serias amenazas derivadas de la presión antropogénica debida especialmente a la ganadería y agricultura que en

muchas ocasiones desconocen los servicios ecosistémicos que estos cuerpos de agua aportan en la dinámica hídrica del departamento (Ruiz-Jiménez, *et. al*, 2023).

El estudio propuesto aborda una evaluación detallada de la caracterización fisicoquímica del agua y una estimación de índices de calidad del agua en momentos hidrológicos contrastantes. Las fluctuaciones en el nivel del agua debidos a los cambios estacionales pueden influir significativamente en la composición y la calidad del agua en estas ciénagas (Cardona *et al.*, 2023). La metodología propuesta permitirá una comprensión más completa de las condiciones hídricas temporales y espaciales en las ciénagas seleccionadas.

En última instancia es importante resaltar como el propósito investigativo de este proyecto se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible ODS los cuales buscan mejorar las condiciones de vida de las personas y reducción de la pobreza a nivel mundial. Específicamente se armoniza con el objetivo seis de los ODS que busca garantizar la disponibilidad y gestión del agua limpia, por lo que los ecosistemas como los humedales juegan un papel vital en la purificación del recurso hídrico. (Duraiappah, 2014)

También se alinea con el objetivo 13 de la acción por el cambio climático, ya que los sistemas ambientales de las ciénagas y humedales en general actúan como filtros naturales de carbono favoreciendo la mitigación de los efectos adversos de este en el calentamiento global y la disminución de la ocurrencia de eventos como inundación, avenidas torrenciales, etc.

Al abordar los desafíos relacionados con la contaminación y la degradación de las ciénagas, se espera sentar las bases para un futuro más sostenible, en el que estos humedales puedan seguir brindando sus invaluable beneficios a las generaciones presentes y futuras.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar las condiciones de calidad del agua de tres ciénagas del Magdalena medio santandereano a través de la valoración de diferentes índices considerando su comportamiento hídrico temporal y espacial.

3.2 Objetivos Específicos

Describir las características fisicoquímicas entre las tres ciénagas del Magdalena medio santandereano.

Establecer la calidad del agua a través de diferentes índices entre las tres ciénagas del Magdalena medio santandereano.

Analizar la variación en la calidad del agua entre las tres ciénagas del Magdalena medio santandereano, considerando su comportamiento hídrico temporal y espacial.

4. Marco de Referencia

4.1 Marco Conceptual

4.1.1 Ciénagas

Las ciénagas según la convención RAMSAR se define como cuerpos de agua con poca profundidad, que se caracterizan por tener conexión directa y/o indirecta a un río, esta puede ser permanente o temporal. La columna de agua de estos sistemas no supera los 10 m de profundidad, estos son considerados polimícticos cálidos continuos, presentando estratificación en el día y mezcla e isoterminia en la noche, además exhiben vegetación flotante y enraizada temporalmente y con concentraciones altas de sustancias húmicas y suelos saturados (Gutiérrez & Pinilla, 2016).

Las ciénagas presentan aspectos específicos que aportan a su clasificación, se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Tipo I. Ciénaga simple y primaria conectada directamente al río.
- Tipo II. Conjunto o racimo de ciénagas, consistente en una primaria conectada directamente al río y una o más ciénagas secundarias conectadas directa o indirectamente a la primaria.
- Tipo III. Ciénaga primaria conectada indirectamente al río.
- Tipo IV. Ciénaga aislada sin conexión con el río.

4.1.2 Pulso de Inundación

El concepto de pulso de inundación representa una dinámica fundamental en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, especialmente en aquellos vinculados a llanuras aluviales y humedales. Este fenómeno se define como el ciclo natural de inundación y desecación

periódica que experimentan estos ecosistemas en respuesta a los cambios estacionales en los regímenes hidrológicos de los ríos y cuerpos de agua circundantes (Talbot *et al.*, 2018).

La investigación de Talbot *et al.* (2018) destaca la importancia del pulso de inundación en la provisión de servicios ecosistémicos vitales, incluida la recarga de acuíferos, la provisión de hábitat y refugio para la vida silvestre, la dispersión de nutrientes y la regulación del ciclo del agua. Este fenómeno no solo influye en la estructura y composición de la biota acuática, sino que también moldea la geomorfología y la dinámica de los paisajes acuáticos.

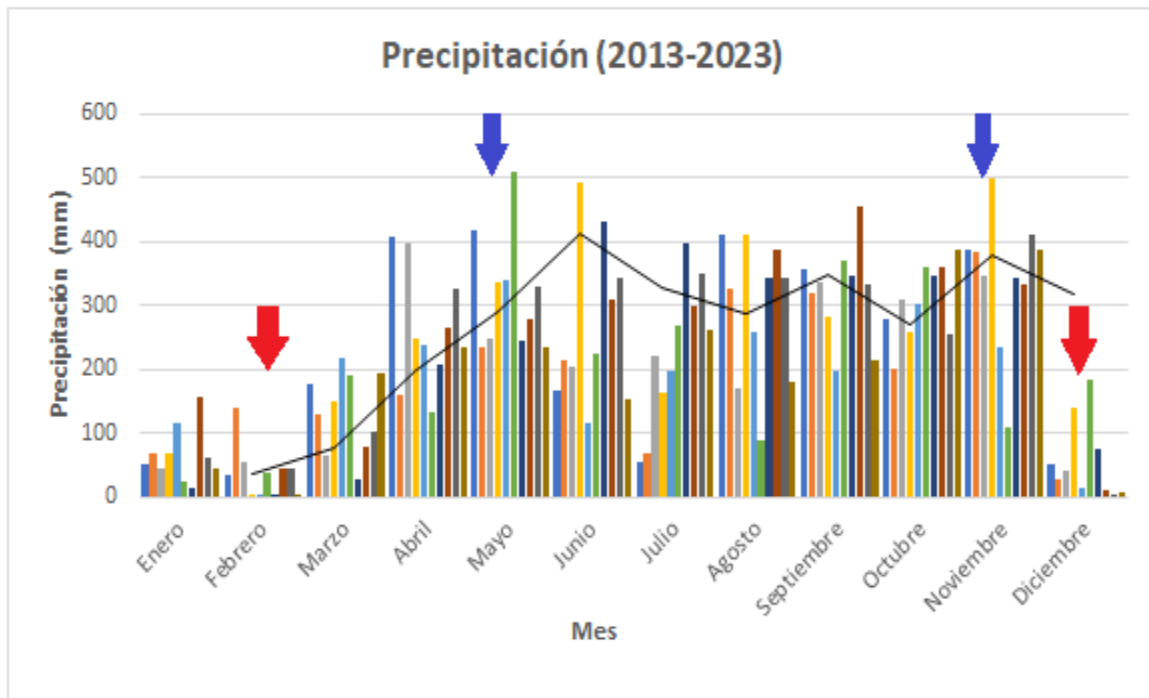
Un enfoque emergente en la comprensión del pulso de inundación es el concepto de flujos funcionales propuesto por Yarnell *et al.* (2020). Este enfoque se centra en la identificación de métricas de flujo que son ecológicamente relevantes para los ecosistemas acuáticos, lo que permite una mejor evaluación de cómo las alteraciones en el régimen de inundación pueden afectar la salud y la resiliencia de estos sistemas.

La investigación de Sousa *et al.* (2022) proporciona una visión más específica de cómo el pulso de inundación regula la distribución longitudinal de las comunidades de peces en las llanuras aluviales amazónicas. Este estudio resalta la influencia significativa del pulso de inundación en la biodiversidad y la dinámica de los ecosistemas acuáticos, así como su importancia para la subsistencia de numerosas especies.

Además, el estudio de Gutiérrez Cala (2020) destaca la relevancia de considerar la memoria socioecológica y la paleoecología para comprender los cambios históricos en los ecosistemas acuáticos afectados por el pulso de inundación. Esta perspectiva retrospectiva ofrece información valiosa para la gestión y conservación de estos ecosistemas en un contexto de cambio ambiental global.

Figura 1.

Valores Mensuales de Precipitación en el Magdalena Medio.



Nota: Valores medios mensuales de precipitación promedio durante el 2013-2023 (Datos tomados del IDEAM estaciones Puerto Wilches y Paredes).

Datos tomados del IDEAM. Flechas azules: Periodos de aguas altas. Flechas rojas: Período de aguas bajas (Figura 1). Régimen de lluvias de distribución bimodal y pulso hidrológico definido con valores máximos de precipitación durante los meses de mayo y noviembre asociado al período de aguas altas, y los mínimos niveles en diciembre y febrero asociado al período de aguas bajas (Barón *et al.*, 2006; Criales-Hernández y Jerez-Guerrero, 2015).

4.1.3 Índices de Calidad de Agua

El concepto de índice de calidad del agua utilizado en la evaluación y monitoreo de la salud de los cuerpos de agua es una medida compuesta, que evalúa el estado general del agua en función de varios parámetros físicos, químicos y biológicos. Según Osorio-Ortega *et al.* (2021), este índice

se define como una expresión simple que refleja el grado de contaminación mediante la combinación de varios parámetros. Esta medida proporciona una visión general del estado del sistema acuático y puede representarse numéricamente, verbalmente, o mediante símbolos o colores. En el contexto específico de este estudio en las ciénagas del Valle Medio del Río Magdalena, Santander, el índice de calidad del agua será una herramienta esencial para evaluar el impacto de las actividades humanas y ambientales en la salud de estos ecosistemas. Permitirá identificar áreas con problemas de contaminación y guiará la implementación de medidas de mitigación y restauración. A continuación, se mencionan los índices de calidad para establecer el estado evolutivo de la calidad del agua de la Ciénaga de Paredes, Ciénaga El Llanito y Ciénaga de Río Viejo

4.1.3.1 Índice de Estado Trófico modificado por Toledo et. al. (1984) (IETm). El índice de estado trófico modificado (IETm) es una herramienta para evaluar la condición trófica de un cuerpo de agua, es decir, su nivel de productividad biológica. Este índice fue desarrollado por Toledo et al. (1984) como una modificación del índice de Carlson, creado en el año 1977 originalmente para zonas templadas.

El IETm se basa en la medición de tres variables clave que sirven como indicadores de la calidad del agua. Su cálculo se realiza utilizando las siguientes fórmulas:

$$IETm(DS) = 10\left(6 - \frac{0.64 + \ln DS}{\ln 2}\right)$$

$$IETm(Chl) = 10\left(6 - \frac{2.04 - 0.695 \ln Chl}{\ln 2}\right)$$

$$IETm(P) = 10\left(6 - \frac{\ln \ln \left(\frac{80.32}{P}\right)}{\ln 2}\right)$$

Donde:

- Profundidad Secchi (DS): Es la medida de la transparencia del agua, la cual está influenciada por la cantidad de algas y otros materiales en suspensión.
- Clorofila a (Chl): Es un pigmento verde presente en las algas y otras plantas fotosintéticas, y es un indicador de la biomasa algal.
- Fósforo total (P): Es la cantidad total de fósforo presente en el agua, tanto en forma disuelta como particulada. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de las algas.

Una vez se obtienen estos índices, posteriormente se calcula el índice IETm, por medio de la media aritmética simple de los tres índices descritos anteriormente, del siguiente modo:

$$IETm = \frac{IETm(DS) + IETm(Chl) + IETm(P)}{3}$$

El resultado del IETm se clasifica en diferentes categorías tróficas, según la siguiente tabla:

Tabla 1.

Clasificación del IETm

Categoría trófica	Rango IETm
Ultra oligotrófico	<20
Oligotrófico	21-40
Mesotrófico	41-50
Eutrófico	51-60
Hipertrófico	> 61

Nota. Toledo, *et. al.* (1984)

El IETm ofrece ventajas en comparación con el índice de Carlson original, incluyendo mayor precisión en aguas tropicales, mayor sensibilidad a cambios tróficos y mayor facilidad de cálculo. Sin embargo, tiene limitaciones en aguas muy turbias o profundas y no considera otros

factores ambientales relevantes. Este índice tiene diversas aplicaciones para el monitoreo, la evaluación de impactos y la gestión de recursos hídricos.

4.1.3.2 Metodología para la Determinación de Calidad del Agua. Metodología canadiense CWQI (Canadian Water Quality Index), para la determinación de la calidad de agua, a través de la medición de 10 variables: oxígeno disuelto, pH, DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales y tensoactivos.

El índice está basado en la consecución de objetivos para proteger los usos de un cuerpo de agua, y dependiendo de las sustancias el objetivo se expresa de forma diferente: cuando son contaminantes el valor se expresa como el límite máximo permitido en el cuerpo de agua; cuando son sustancias esenciales (como el oxígeno disuelto) el objetivo se expresa como el valor mínimo que debe contener (Uddin, Nash & Olbert, 2021). En su forma de cálculo incorpora una ecuación de promedio armónico no ponderado, cuya ecuación es la siguiente:

$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}$$

Donde F1, es el porcentaje de parámetros que exceden la norma (alcance); F2 el porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma (frecuencia) y F3 la magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple. La clasificación del índice se desarrolló en una escala de cero a cien: excelente, entre 95 y 100 unidades; buena, entre 80 y 94 unidades; aceptable, entre 65 y 79 unidades; marginal, entre 45 y 64 unidades y pobre, entre 0 y 44 unidades (Uddin, Nash & Olbert, 2021).

4.1.3.3 Índice de calidad de agua (ICA) IDEAM. El Índice de Calidad del Agua (ICA), es un indicador crucial en la evaluación de la calidad del agua. Desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en 2011, este indicador se centra en proporcionar una medida integral que refleje las condiciones ambientales de los cuerpos de agua. Las ciénagas, al ser ecosistemas acuáticos, comparten muchas características con otros cuerpos de agua, como ríos y lagos.

Algunas de las variables consideradas, como el oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, pH y la relación nitrógeno total/fósforo total, son parámetros comúnmente utilizados para evaluar la calidad del agua en diferentes tipos de ambientes acuáticos, este índice se conforma por diversas variables fisicoquímicas y microbiológicas.

La metodología para calcular el ICA se detalla en la hoja metodológica del indicador (IDEAM, 2011). Este proceso implica la consideración de diversos parámetros, cada uno ponderado según su impacto en la calidad general del agua. El cálculo implica la evaluación individual de diversas variables a las cuales se les asigna un valor de ponderación, ya que cada una es representativa de aspectos específicos de la calidad del agua y tienen diferente grado de incidencia, en la Tabla 2 se presentan las variables del indicador y su respectiva ponderación.

Tabla 2.

Variables cálculo ICA IDEAM y Ponderación

Variable	Ponderación
Conductividad (CD)	15%
Temperatura	15%
pH	10%
Oxígeno disuelto (OD)	3%

Variable	Ponderación
DBO5	7%
Nitratos	3%
Fosfatos	3%
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	40%
Turbiedad	5%

Nota. Elaboración propia. (2024)

A continuación, se describen las ecuaciones y procedimientos para el cálculo de algunas de estas variables clave:

- Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto desempeña un papel biológico crucial en la preservación de la vida acuática. El cálculo del subíndice de calidad para el oxígeno disuelto (ODI) se realiza considerando la saturación de oxígeno y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$ODI = 1 - (1 - 0.01 * ODps)$$

Cuando la saturación de oxígeno es mayor al 100%, la fórmula se ajusta a:

$$ODI = 1 - (0.01 * (ODps - 1))$$

Donde ODps es el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, calculado como $(OD/Ox) * 100$, considerando la concentración de equilibrio de oxígeno (C_p).

- Sólidos Suspendidos Totales (SST)

La presencia de sólidos en suspensión en el agua indica cambios en las condiciones hidrológicas. El subíndice de calidad para sólidos suspendidos (SSTI) se calcula mediante la fórmula:

$$SSTI = 1 - (0.02 * SST + 0.003 * SST^2)$$

Si $SST \leq 4.5$, entonces $SSTI = 1$, y si $SST \geq 320$, entonces $SSTI = 0$.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO refleja la presencia de sustancias susceptibles de ser oxidadas. El subíndice de calidad para DQO (DQOI) se determina según la propuesta de la Universitat Politècnica de Catalunya:

$$DQOI = \{0.91 \text{ si } DQO \leq 20 \quad 0.71 \text{ si } 20 < DQO \leq 25 \quad 0.51 \text{ si } 25 < DQO \leq 40 \quad 0.26 \text{ si } 40 < DQO \leq 80 \quad 0.125 \text{ si } DQO > 80$$

- Conductividad Eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica (C.E.) está directamente vinculada a la suma de cationes y aniones en la forma química, reflejando el nivel de mineralización en el agua. El índice de calidad para la conductividad eléctrica (I.C.E.) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$I.C.E. = 1 - \frac{1}{1 + 10^{(3.26 - 1.34 * 10 * \log_{10}(C.E.))}}$$

En casos donde $I.C.E. < 0$, se ajusta a $I.C.E. = 0$.

- pH

El pH mide la acidez del agua, siendo extremos perjudiciales para la flora y fauna acuáticas.

El índice de calidad para el pH (IpH) se calcula de la siguiente manera:

$$IpH = \{0.1 \text{ si } pH \leq 4 \quad 0.02628419 * pH^{0.520025} \text{ si } 4 < pH \leq 7 \quad 1 \text{ si } 7 < pH \leq 8 \quad 0.5187742 * pH^{-1} - 1 \text{ si } 8 < pH \leq 11 \quad 0.1 \text{ si } pH > 11$$

- Nitrógeno Total/Fósforo Total (NT/PT)

El equilibrio de nutrientes para la productividad acuícola se evalúa mediante la relación entre nitrógeno y fósforo totales (NT/PT). El índice de calidad para NT/PT (INT/PT) se determina con la siguiente fórmula:

$$INT/PT = \{0.8 \text{ si } 15 \leq NT/PT \leq 20 \quad 0.6 \text{ si } 10 < NT/PT < 15 \quad 0.35 \text{ si } 5 < NT/PT \leq 10 \quad 0.15 \text{ si } NT/PT \leq 11 \quad \text{ó } NT/PT > 20$$

Finalmente, los resultados del indicador tienen una interpretación general de la calidad del agua y la representación de una señal de alerta a través de colores, en la Tabla 3.

Tabla 3.*Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA*

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta (Color)
0,00 – 0,25	Muy Mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	Azul

Nota. IDEAM (2011)

4.2 Estado del Arte

La evaluación de la calidad del agua en diferentes cuerpos hídricos de Colombia ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones recientes. Galvis Moncada (2021) realizó un estudio exhaustivo en la Ciénaga San Silvestre, ubicada en el municipio de Barrancabermeja - Santander. En este estudio, se llevaron a cabo tres etapas metodológicas clave. Primero, se identificaron las principales características bióticas y abióticas presentes en el área de influencia de la quebrada y la ciénaga, lo que proporcionó un diagnóstico primario del ecosistema predominante en la zona. Luego, se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica, microbiológica e hidrobiológica de los cuerpos de agua en su confluencia, con el fin de determinar los índices de calidad del agua. Finalmente, se identificaron los impactos ambientales que afectan a la zona, lo que condujo a la formulación de medidas técnicas de restauración ambiental para preservar los recursos naturales de la región. Este enfoque integral permitió reconocer la relación intrínseca entre la química del agua y el estado del hábitat en particular.

Cruz Montes y Durango Banquett (2023) llevaron a cabo una evaluación detallada de la calidad del agua en las ciénagas Guartinaja, Momil y Sapal de Córdoba-Colombia. Su estudio se

centró en la aplicación de modelos estadísticos y percepción remota para evaluar los parámetros de calidad del agua durante la temporada seca. Utilizando mediciones *in situ* y valores de reflectancia de imágenes satelitales, desarrollaron modelos estadísticos mediante regresión lineal múltiple de pasos sucesivos. Los resultados obtenidos mostraron una correlación significativa entre los datos *in situ* y los estimados, lo que permitió establecer condiciones para el uso del agua de las ciénagas. Sin embargo, identificaron que el pH fue uno de los parámetros que no cumplió con la normativa internacional para la protección de la vida acuática en su totalidad, lo que destaca la importancia de monitorear continuamente la calidad del agua y tomar medidas correctivas cuando sea necesario.

Hernández, Hernández y Tangua (2022) llevaron a cabo un estudio para determinar el estado ecosistémico de la subcuenca La Gómez y la ciénaga de Paredes en los municipios de Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander. Su enfoque se centró en el uso de macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad, realizando monitoreos hidrobiológicos en diferentes épocas del año. Los resultados mostraron que, según el índice BMWP, la calidad del agua es aceptable en general, pero varía significativamente según la época del año. Este hallazgo subraya la necesidad de implementar diferentes medidas de conservación y gestión ambiental para garantizar la salud continua de los ecosistemas acuáticos en la región.

Guerrero Lizarazo (2021) desarrolló una herramienta de evaluación de la salud ecosistémica basada en la composición y características biológicas de la comunidad de algas perifíticas en la ciénaga de Zapatosa. Este estudio permitió determinar la integridad biótica y el estado ecológico del Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ). Los resultados revelaron la correlación entre el índice de integridad biótica y las variables ambientales evaluadas, proporcionando una herramienta inicial para la gestión y predicción de cambios estacionales en la

hidrología del CCZ. Este enfoque multidimensional destaca la importancia de considerar no sólo los parámetros fisicoquímicos del agua, sino también la salud de las comunidades biológicas asociadas, como indicadores clave del estado de un ecosistema acuático.

Por otro lado, Aguirre, Piraneque y Linero-Cueto (2021) llevaron a cabo un estudio sobre la concentración de metales pesados y la calidad fisicoquímica del agua en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM). Este ecosistema, vital para la biodiversidad, se ve afectado por las actividades antrópicas que generan residuos y contaminantes. Los resultados revelaron la presencia de metales pesados como plomo, cadmio, cromo y níquel en niveles que constituyen una alerta para el ecosistema, lo que sugiere una afectación en la calidad del agua y la salud del ecosistema. Estos hallazgos subrayan la urgente necesidad de abordar las fuentes de contaminación y mejorar la gestión de los recursos hídricos en la región para proteger la integridad ambiental de la CGSM y salvaguardar su importancia ecológica y socioeconómica para las comunidades locales.

Finalmente, Moreno Pallares (2021) realizó una evaluación detallada de las condiciones bióticas y abióticas que influyen en la variación espacial y temporal de las náyades de *Miathyria Marcella* en ciénagas del departamento del Atlántico. Su investigación contribuyó significativamente al entendimiento de la dinámica de los ecosistemas acuáticos y cómo estas condiciones pueden influir en la biodiversidad presente en ellos. Este estudio destaca la importancia de considerar factores tanto biológicos como abióticos al evaluar la calidad del agua y su impacto en la fauna acuática.

Estas investigaciones proporcionan una comprensión más profunda de los desafíos ambientales que enfrentan las ciénagas colombianas y resaltan la importancia de implementar medidas de gestión y conservación para proteger estos valiosos ecosistemas y los servicios que brindan a las comunidades locales y al medio ambiente en general. Su enfoque holístico y

multidisciplinario ofrece una base sólida para futuras investigaciones y acciones de conservación orientadas a promover la sostenibilidad y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos en Colombia.

5. Metodología

El presente estudio se desarrolló evaluando la calidad del agua en tres Ciénagas del Valle Medio del Río Magdalena en el Departamento de Santander (Ciénaga de Paredes, Ciénaga el Llanito y Ciénaga de Río Viejo) mediante información secundaria suministrada por el Laboratorio de Hidrobiología de la UIS quien a través de diferentes proyectos efectuó la medición de las características fisicoquímicas y ambientales de estos cuerpos de agua. Con el presente trabajo se recopiló información para conocer las afectaciones que se presentan sobre los humedales del Magdalena medio, por medio del uso de información tomada en períodos contrastantes hidrológicos, de aguas altas y de aguas bajas.

5.1 Área de Estudio

5.1.1 Contexto Regional

- Magdalena medio

El Magdalena Medio, situado en Colombia, es un vasto valle interandino que abarca una extensa área en la parte central del valle del río Magdalena. Esta región, caracterizada por su ubicación geográfica estratégica y su diversidad natural, ha sido objeto de interés tanto en términos económicos como ambientales. Según Galvis Moncada (2021), el valle del Magdalena Medio se extiende entre los rápidos circundantes con la ciudad tolimense de Honda y la entrada del río a las llanuras costeras del Mar Caribe. Esta área, con una superficie de aproximadamente 32,949 km²,

alberga una serie de ciénagas que desempeñan un papel crucial en el ecosistema regional y la biodiversidad del país.

En el departamento de Santander, específicamente en el valle medio del río Magdalena, se encuentran ubicados los humedales del Magdalena Medio Santandereano. Según la Corporación Autónoma de Santander (CAS, 2021), estos humedales se distribuyen principalmente en las llanuras de inundación en la vertiente oriental del río Magdalena. La región cuenta con un total de 69 humedales distribuidos en 7 municipios, siendo Puerto Wilches el municipio con mayor número de humedales, seguido por Barrancabermeja y Cimitarra.

El sistema hidrológico del Magdalena Medio Santandereano está conformado por el río Magdalena y sus principales afluentes departamentales, como el río Carare, El Opón, Sogamoso y Lebrija, así como las ciénagas de diferentes tipos que se forman a lo largo de la margen derecha del río. Estos humedales, según las recomendaciones de la resolución 196 de febrero del 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se organizan en 16 complejos de humedales, los cuales juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos en la región.

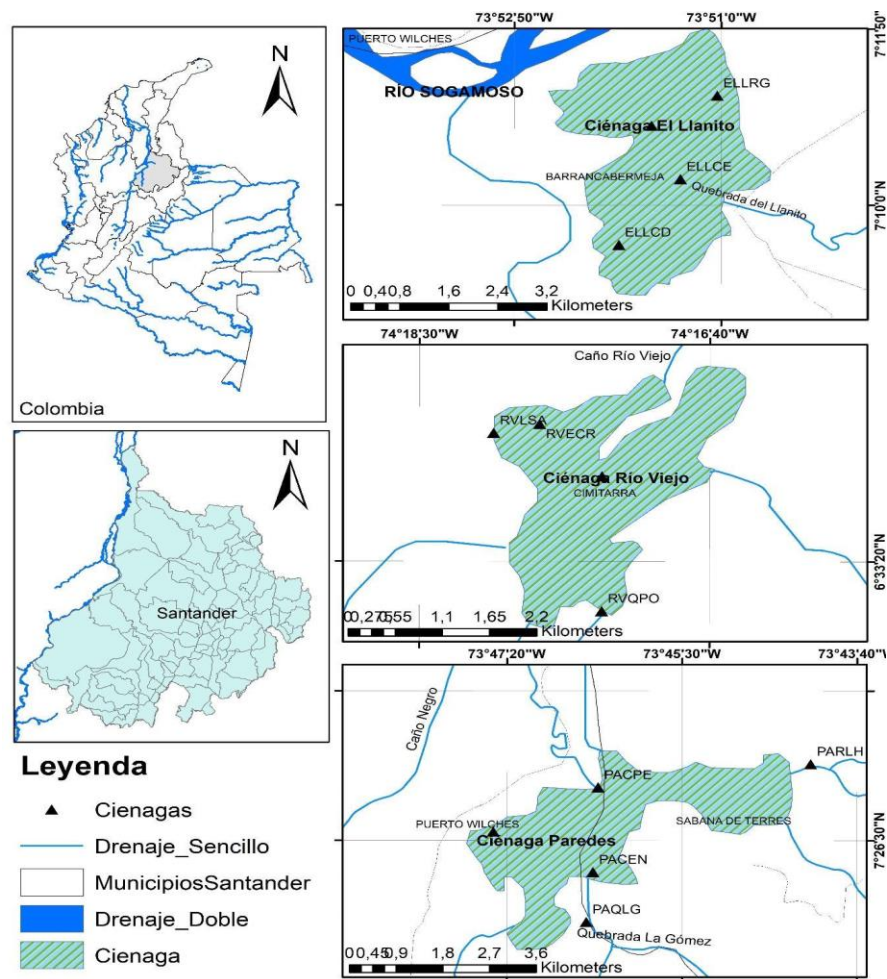
Las ciénagas del Magdalena Medio Santandereano son vitales para el mantenimiento de la biodiversidad y el equilibrio ecológico en la región. Sin embargo, enfrentan diversos desafíos, incluida la contaminación y la degradación ambiental debido a actividades humanas como la agricultura, la minería y la urbanización. Por lo tanto, es crucial implementar estrategias efectivas de conservación y manejo sostenible para garantizar la protección a largo plazo de estos valiosos ecosistemas.

5.1.2 Contexto Local

El área del estudio abarca los cuerpos de agua que comprenden tres ciénagas fundamentales del departamento de Santander: la Ciénaga de Paredes, la Ciénaga el Llanito y la Ciénaga de Río Viejo. En la Figura 2 se ilustra la distribución geográfica de las ciénagas mencionadas.

Figura 2.

Mapa de la distribución de las Ciénagas objeto estudio y su ubicación dentro del departamento de Santander.



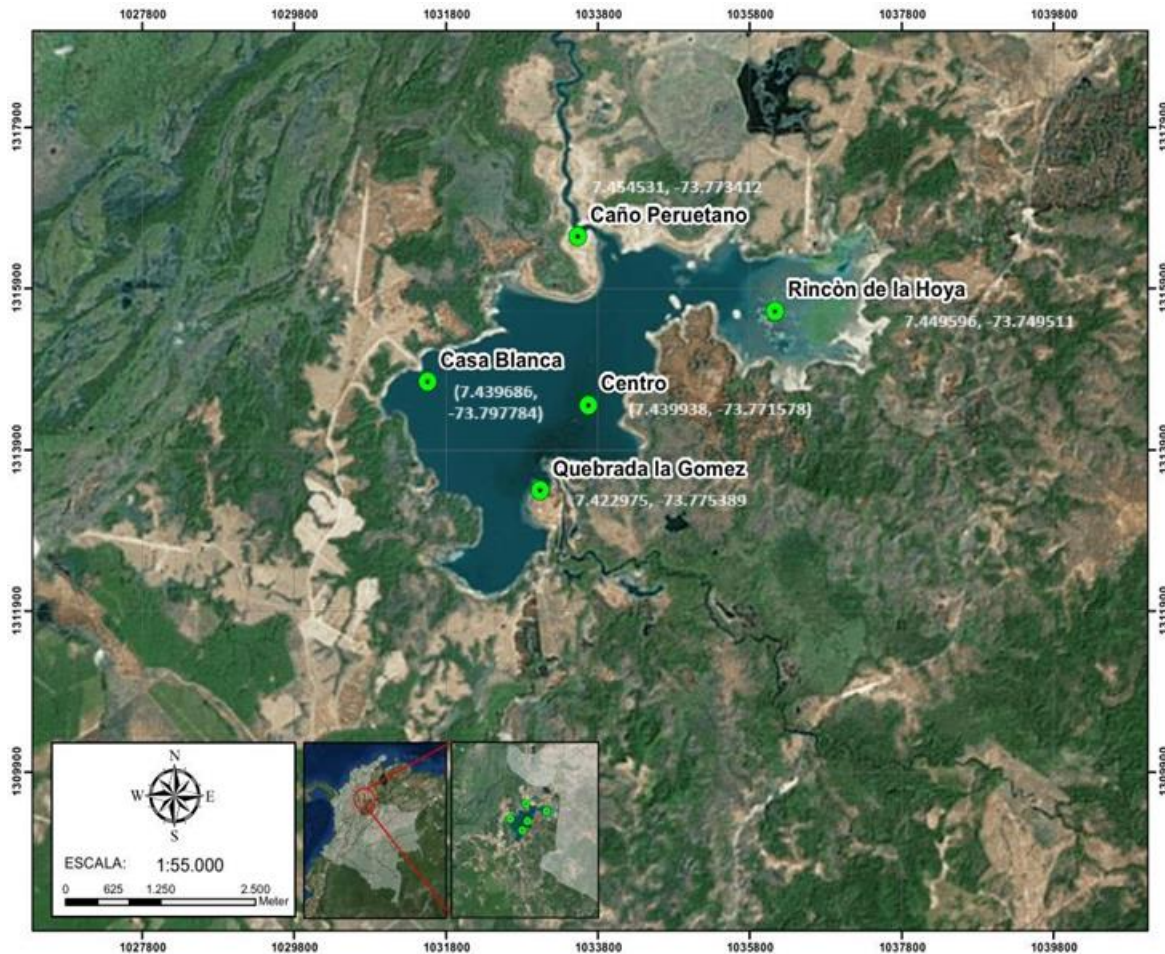
Nota. ARGIS (2024)

- Ciénaga Paredes

La Ciénaga de Paredes, localizada entre los municipios de Puerto Wilches y Sabana de Torres, constituye un valioso ecosistema dentro del Magdalena Medio Santandereano. Con aproximadamente 1,431 hectáreas de extensión, esta ciénaga es considerada un cuerpo cenagoso tipo II, siendo alimentada principalmente por la quebrada La Gómez y conectada al Río Lebrija mediante el Caño Peruétano (Figura 3).

Este ecosistema alberga una amplia variedad de especies, incluyendo mamíferos acuáticos como el Manatí, la Martesja y la Nutria de río, así como depredadores como el Tigre y el Jaguar. Sin embargo, estas especies enfrentan presiones significativas, como la caza indiscriminada y la pérdida de hábitat debido a la contaminación del agua y la destrucción de coberturas boscosas. Estos factores han llevado a una disminución en la distribución y tamaño de las poblaciones de estas especies, lo que resalta la importancia de implementar medidas de conservación y protección en este frágil ecosistema (Blanco & Cáceres, 2012).

Figura 3.

Ciénaga de Paredes.

Nota. Se indican las estaciones de monitoreo Caño Peruetano (efluente), Quebrada la Gómez (afluente), Centro (Punto de mayor profundidad) y Rincón de la Hoya (Punto que menor incidencia antrópica).

- Ciénaga el Llanito

El corregimiento El Llanito, perteneciente al municipio de Barrancabermeja, alberga la impresionante Ciénaga El Llanito, un área de 917 hectáreas que constituye un importante centro de biodiversidad y tradición en el Magdalena Medio Santandereano. Este ecosistema se caracteriza por su complejo sistema hidrográfico, que proporciona un hábitat vital para una exuberante

variedad de flora y fauna nativa (Figura 4). Esta ciénaga es considerada un cuerpo cenagoso de tipo II, siendo alimentada principalmente por el caño el Deseo, que se encuentra conectado al Río Sogamoso.

La ciénaga El Llanito es especialmente conocida por albergar especies en peligro de extinción, como el Manatí, así como una gran diversidad de micos, peces, reptiles y vegetación. Además de su valor ecológico, esta ciénaga juega un papel crucial en la vida de los aproximadamente 2,700 habitantes que dependen de ella para su sustento. Las tradiciones ancestrales, como la pesca artesanal con atarrayas, y la rica gastronomía local son parte integral de la vida en este corregimiento, atrayendo visitantes y generando un comercio arraigado en la cultura local (Carvajal-Urrea, 2021).

Figura 4.

Ciénaga del Llanito.

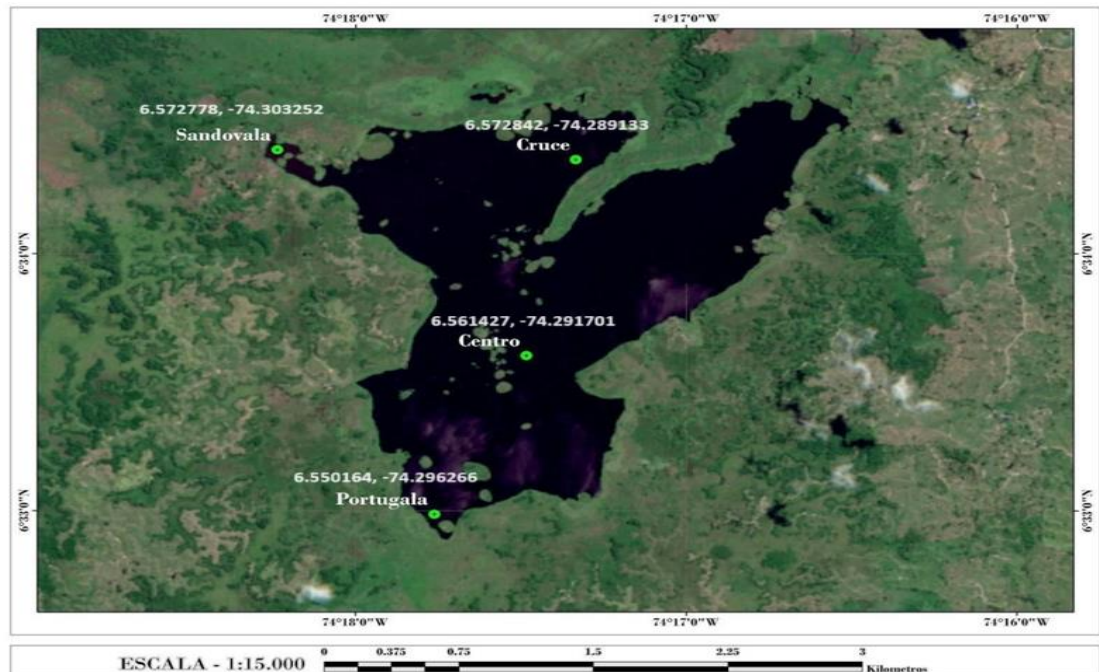


Nota. Se indican las estaciones de monitoreo Rincón del Guache (afluente), Caño el Deseo (Efluente), Centro (Punto más profundo) y Caño el Llanito (Punto con menor incidencia antrópica).

- Ciénaga de Río Viejo

La ciénaga Río Viejo, ubicada en el municipio de Cimitarra, emerge como un refugio natural en medio del Magdalena Medio Santandereano. Con una extensión aproximada de 129 km², este ecosistema se encuentra rodeado de relictos de bosque húmedo tropical y tierras dedicadas a la ganadería y la agricultura (Figura 5).

Clasificada como una ciénaga tipo III debido a su conexión con el río Magdalena a través del caño Río Viejo, esta ciénaga alberga una rica biodiversidad que incluye una variedad de especies de flora y fauna nativas. Desde la quebrada La Sandovala, hasta el caño Río Viejo, este ecosistema proporciona un hábitat vital para numerosas especies, contribuyendo así a la conservación de la biodiversidad en la región (Crales-Hernández *et al.*, 2023).

Figura 5.*Ciénaga de Río Viejo.*

Nota. Se indican las estaciones de monitoreo Sandovala (Afluente), Cruce (Efluente), Centro (Punto más profundo) y Portugala (Punto con menor incidencia antrópica).

5.2 Población y Muestra

En este estudio, la población analizada incluye tres ciénagas representativas del Magdalena Medio Santandereano: la Ciénaga de Paredes, la Ciénaga El Llanito y la Ciénaga de Río Viejo. Los datos utilizados fueron recolectados en el 2013 y el 2023 en cinco estaciones de muestreo dentro de cada una de las ciénagas seleccionadas (Figuras 2, 3 y 4). Es importante destacar que los datos se tomaron directamente del laboratorio de hidrobiología de la Universidad Industrial de Santander, sin ningún tipo de procesamiento previo. Cada estación de muestreo fue cuidadosamente seleccionada para asegurar la representatividad de las condiciones ambientales y la diversidad de hábitats dentro de cada ciénaga. Los detalles de las estaciones de muestreo para cada ciénaga se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.*Coordenadas geográficas de las ciénagas de estudio y estaciones de muestreo.*

Ciénaga	Estación	Abr	Coordenadas
El Llanito	Centro	ELLCE	7°10'16,3" N 73°51'21,7" W
	Rincón del Guache	ELLRG	7°11'08,3" N 73°51'02,2" W
	Caño el Deseo	ELLCD	7°09'35,3" N 73°51'54,4" W
	Caño Llanito	ELLCL	7°10'49,6" N 73°51'37,1" W
Río Viejo	El Cruce	RVECR	6°34'21,1" N 74°17'44,5" W
	Centro	RVCEN	6°33'57,9" N 74°17'20,8" W
	Quebrada Portugala	RVQPO	6°32'57,4" N 74°17'18,5" W
	La Sandovala	RVLSA	6°34'17,1" N 74°18'01,9" W
Paredes	Centro	PACEN	7°26'06,7" N 73°46'25,9" W
	Caño Peruétano	PACPE	7°27,1'09,0" N 73°46'22,7" W

Ciénaga	Estación	Abr	Coordenadas
	Quebrada La Gómez	PAQLG	7°25'29,9 0" N 73°46'30,1" W
	Rincón de la Hoya	PARLH	7°27'26,2" N 73°44'09,2" W
	Casa Blanca	PACB	7°26'36,3" N 73°47'28,6" W

Nota. Elaboración propia.

5.3 Fase de Campo

Los datos del presente estudio fueron recopilados en diversas salidas de campo realizadas como parte de las asignaturas de profundización de Limnología de la Escuela de Biología entre los años 2013 y 2021. Se incluyeron datos provenientes del Proyecto VIE-UIS-5715, que abordó un estudio comparativo sobre la variación de la estructura de la comunidad fitoplanctónica en la ciénaga de Paredes y su relación con las condiciones hidrológicas durante los fenómenos de El Niño-La Niña entre 2013 y 2014. Asimismo, se tomaron datos del proyecto 8866, centrado en la investigación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos para la gestión y el fortalecimiento de capacidades, específicamente en el marco del descubrimiento de los ecosistemas estratégicos para el fortalecimiento de la gobernanza en el departamento de Santander, llevado a cabo entre 2018 y 2019. Por último, se incorporaron datos de los proyectos UISVIE-5770 y UIS-VIE-2777, relacionados con la institucionalización de semilleros de investigación, específicamente el Semillero de Estudios Hidrobiológicos (SEHIB), durante los períodos 2019-2020 y 2021-2022 respectivamente.

La colecta de información proveniente de cada ciénaga corresponde a muestras del afluente principal, el efluente principal, en el punto más profundo de la ciénaga o zona limnética (el cual

generalmente está en la zona central de la ciénaga) y el punto con menores presiones antrópicas (previamente identificado por salidas anteriores). Los monitoreos se hicieron durante dos momentos del ciclo hidrológico: aguas altas y aguas bajas, basados en los registros históricos del periodo 2022-2023 del IDEAM (Figura 1).

Se recopiló la información de seis campañas de monitoreo, en cada punto de estudio se midió la transparencia, por medio del uso del disco Secchi (Tyler, 1968) y la profundidad máxima con un ecosonda HONDEX ps-7. Se utilizaron las variables *in situ* de temperatura (C°), oxígeno (mg/L), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) con una sonda multiparamétrica Hach (conductividad: $0,5 \mu\text{S}/\text{cm}$, temperatura: $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ y mV: 0,1 mV).

Se utilizaron perfiles verticales para estas variables, midiendo cada 10 cm desde la superficie, hasta la profundidad donde se tomó la muestra cuantitativa de fitoplancton, aproximadamente hasta los 2 metros de profundidad. Se utilizó adicionalmente la información de muestras de agua superficial colectadas en los muestreos para análisis químicos y que fueron analizados en un laboratorio certificado. La información suministrada fue la siguiente: pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, % de saturación de O₂, nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico, amonio, dureza, alcalinidad, sílice, DBO y Clorofilas *a*, *b*, *c* y Feofitas. Estas variables fueron estimadas siguiendo la metodología APHA (2005) Standard methods 10200H.

5.4 Fase de Análisis

5.4.1 Descripción de las características fisicoquímicas entre las tres ciénagas

Se realizaron gráficas de los perfiles verticales para los años 2013, 2014, 2018, 2021 y 2022 de temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto para cada ciénaga y estación de muestreo. Estos perfiles permiten visualizar el comportamiento de estas variables a diferentes profundidades en los cuerpos de agua. Los perfiles verticales se graficaron para los dos momentos hidrológicos

(aguas altas y aguas bajas) con el fin de analizar las posibles diferencias temporales en la distribución vertical de estas variables.

Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo de las variables fisicoquímicas medidas en las tres ciénagas. Se calcularon estadísticos como mínimos, máximos, media y desviación estándar para cada variable, con el fin de comprender su comportamiento y variabilidad en cada ciénaga. Se aplicaron pruebas de normalidad, como la prueba de Shapiro-Wilk, y pruebas de homogeneidad de varianza, como la prueba de Levene, para determinar si los datos seguían una distribución normal y si las varianzas eran iguales entre las ciénagas. Al identificar distribuciones no normales se procedió con métodos estadísticos no paramétricos.

5.4.2 Establecimiento de la calidad del agua a través de diferentes índices

En esta fase, se calcularon tres índices para evaluar la calidad del agua y el estado trófico de las ciénagas:

- Índice de Estado Trófico Modificado por Toledo (IETm):

El IETm se calculó utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{IETm (DS)} = 10 \times (6 - (\ln (\text{DS}) / \ln (2)))$$

$$\text{IETm (Chl)} = 10 \times (6 - ((0,92 - 0,34 \times (\ln (\text{Chl}))) / \ln (2)))$$

$$\text{IETm(P)} = 10 \times (6 - (\ln (80,32 / \text{P}) / \ln (2)))$$

Donde DS es la profundidad Secchi, Chl es la concentración de clorofila a, y P es la concentración de fósforo total.

El IETm final se obtuvo como el promedio de estos tres subíndices, lo que permitió clasificar el estado trófico de cada ciénaga en una escala que va desde oligotrófico hasta eutrófico.

- Índice de Calidad de Agua ICA-IDEAM

Este índice colombiano se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$ICA = \Sigma (\text{Subíndice} \times \text{Ponderación})$$

Donde cada subíndice se calculó a partir de las curvas de función de valor para cada variable (conductividad, temperatura, pH, oxígeno disuelto, DBO5, nitratos, fosfatos, coliformes fecales y turbiedad), y cada variable tiene una ponderación específica. El resultado final clasifica la calidad del agua en diferentes categorías.

- Índice Canadian Water Quality Index (CWQI)

Este índice se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$CWQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{1.732}}$$

Donde F1, F2 y F3 son factores de alcance que se calculan a partir de las variables profundidad del disco Secchi (DS), concentración de fósforo total (P), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y oxígeno disuelto (OD). El resultado final clasifica la calidad del agua en diferentes categorías.

Los índices calculados se promediaron para el conjunto de estaciones de muestreo en cada ciénaga, y se calculó la desviación estándar para evaluar la variabilidad dentro de cada ciénaga.

5.4.3 Análisis de la variación en la calidad del agua entre las tres ciénagas

En esta fase, se evaluaron las diferencias espaciales y temporales en la calidad del agua entre las tres ciénagas.

Para el análisis espacial, se aplicaron pruebas estadísticas como el Análisis de Varianza (ANOVA) o la prueba de Kruskal-Wallis, dependiendo de si se cumplían los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Estas pruebas permitieron determinar si existían diferencias significativas en las variables fisicoquímicas y los índices de calidad de agua entre las ciénagas.

Para el análisis temporal, se compararon los parámetros fisicoquímicos y los índices de calidad de agua entre los períodos de lluvia y sequía para cada ciénaga. Se utilizaron pruebas estadísticas como la prueba t de Student o la prueba de Wilcoxon, dependiendo de si se cumplían los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.

Se utilizaron gráficos de caja y bigotes (boxplot) para representar visualmente la distribución y variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y los índices de calidad de agua entre las ciénagas y los períodos hidrológicos.

5.5 Alcances

El presente estudio contribuye con la caracterización y estado de la calidad del agua de las tres ciénagas mencionadas, a través de las características fisicoquímicas de los cuerpos hídricos y con el uso de índices de calidad del agua (ICA), con el fin de proporcionar herramientas que permitan recopilar información sobre estos ecosistemas. Estos datos también podrán ser usados en un futuro dentro de planes de manejo del recurso hídrico y para toma de decisiones en el territorio, siendo lo último, el máximo alcance del presente proyecto.

6. Resultados

6.1 Descripción de características fisicoquímicas del agua en las ciénagas

6.1.1 Resultados conductividad, oxígeno disuelto, pH y Temperatura

La descripción de las características fisicoquímicas de las ciénagas Llanito, Paredes y Río Viejo se presenta a partir de los perfiles verticales resultado de los valores promedio de evaluación de la conductividad, la presencia de oxígeno, pH y temperatura, evaluados en las ciénagas de El Llanito, Paredes y Río Viejo en diferentes periodos hidrológicos que incluyen los periodos

hidrológicos de aguas altas (mayo a noviembre) y el periodo de aguas bajas (diciembre a febrero), en cada una de las estaciones de muestreo. En el anexo C, Excel se presentan los datos utilizados para la realización del presente análisis.

6.1.1.1 Conductividad. El resultado de los valores promedios de la conductividad en relación con la profundidad de muestreo en cada una de las ciénagas puede observarse en la Figura 6.

Al comparar los resultados obtenidos en las tres ciénagas, se observan diferentes patrones en la variabilidad de la conductividad eléctrica (CD) a lo largo de las estaciones de muestreo, en los períodos contrastantes de aguas altas y bajas en relación con el aumento de profundidad.

El mayor valor de conductividad registrado en las tres ciénagas fue de 135 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se presentó en la Ciénaga Llanito en mayo de 2022 en el periodo de aguas altas, y el valor mínimo que se registró fue de 19,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la ciénaga Paredes en la temporada de aguas altas en octubre de 2013.

Según los resultados obtenidos el mayor y menor reporte del valor promedio de conductividad se presentó en el periodo hidrológico de aguas altas, en cuanto al periodo hidrológico de aguas bajas que corresponde a los muestreos en el mes de febrero del año 2014, el reporte de conductividad más alto y bajo reportados fueron de 35,51 y 30,86 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente en la de ciénaga Paredes.

A continuación, se presentan los resultados de los valores promedios obtenidos en cada ciénaga.

- Resultado conductividad en la Ciénaga Llanito en los periodos de aguas altas en los años 2021 y 2022

Se obtuvo como resultado que la Ciénaga El Llanito exhibe una tendencia al aumento de la Conductividad (CD) con la profundidad como puede observarse en la Figura 6, especialmente durante el mes de octubre del año 2021 que corresponde a que periodo hidrológico de aguas altas, se observa como el promedio de CD en las profundidades de los 0 m a los 0,9 m corresponde a valores entre los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 108 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a 1 metro de profundidad se presenta un aumento del valor a los 131,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo este el mayor valor reportado; luego se observa que a los 1,5 m de profundidad vuelve a disminuir el valor de CD a aproximadamente 118 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y finalmente a los 2 m de profundidad vuelve a normalizarse el valor cerca de los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En cuanto al mes de mayo del año 2022 que hace parte del periodo hidrológico de aguas bajas, los valores promedios de conductividad registrados desde la superficie (0 m) hasta el 1 m de profundidades presentan variaciones entre los 73 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y desde cerca de los 1,1 m hasta los 1,2 m de profundidad donde presentan un aumento de 109 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 135 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo este último el mayor valor reportado.

Se obtuvo entonces que los valores de resistividad disminuyeron en su mayoría en el muestreo realizado en 2021 respecto a 2022, sin embargo, la tendencia de comportamiento de los datos es correspondiente en ambos casos, presentando un comportamiento con una tendencia de valores en el primer metro de profundidad y que aumenta de fuera del patrón de comportamiento luego al superar esta profundidad.

- Resultado de la conductividad en la Ciénaga de Paredes en los periodos de aguas altas y aguas bajas durante los años 2013, 2014 y 2022.

El resultado del perfil de promedio de conductividad de la ciénaga de Paredes permite observar una diversidad de resultados en los diferentes años de muestreo.

En los meses de agosto, septiembre y octubre (periodo hidrológico de aguas altas), del año 2013 los registros de CD fueron valores aproximados a los 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los 0 m y 2,25 m de profundidad, a partir de esta profundidad hasta los 3,5 m en los meses de septiembre y octubre presentan valores entre los 19 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el mes de abril del 2013 se registraron valores de promedio de CD que no siguen una tendencia pero que se mantienen en el rango de 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los reportes de conductividad promedio del año 2014, en el mes de febrero el cual corresponde a un periodo hidrológico de sequía, los resultados presentan una tendencia a los 35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los 0,3 m y los 0,5 m de profundidad, luego se observa una leve dispersión de valores que descienden a 34, 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y los registros del mes de mayo el inicio de la temporada de aguas altas presenta una tendencia de registros alrededor de los 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la profundidad de 0,2 m a los 2,25 m, de esta última profundidad se observan valores que oscilan entre los 93 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los 103 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Y en los resultados del año 2022 se observa valores aproximados de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ desde los 0 m a los 2,3 m.

- Resultado de la conductividad en la Ciénaga de Río Viejo en los periodos de aguas altas y bajas del año 2018 y el 2022

La Ciénaga Río Viejo presenta estratificación en sus perfiles verticales de CD, con cambios abruptos en los valores a diferentes profundidades. Se observa una tendencia general de aumento en la CD con la profundidad, aunque con algunas variaciones entre estaciones.

Los reportes en el mes de julio (aguas altas) del año 2018 los valores de CD tienden a disminuir en un rango de 92 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a la par que se aumenta la profundidad de los 0,1 m a los 0,6 m, a partir de esta última profundidad se ve una tendencia en los valores de conectividad

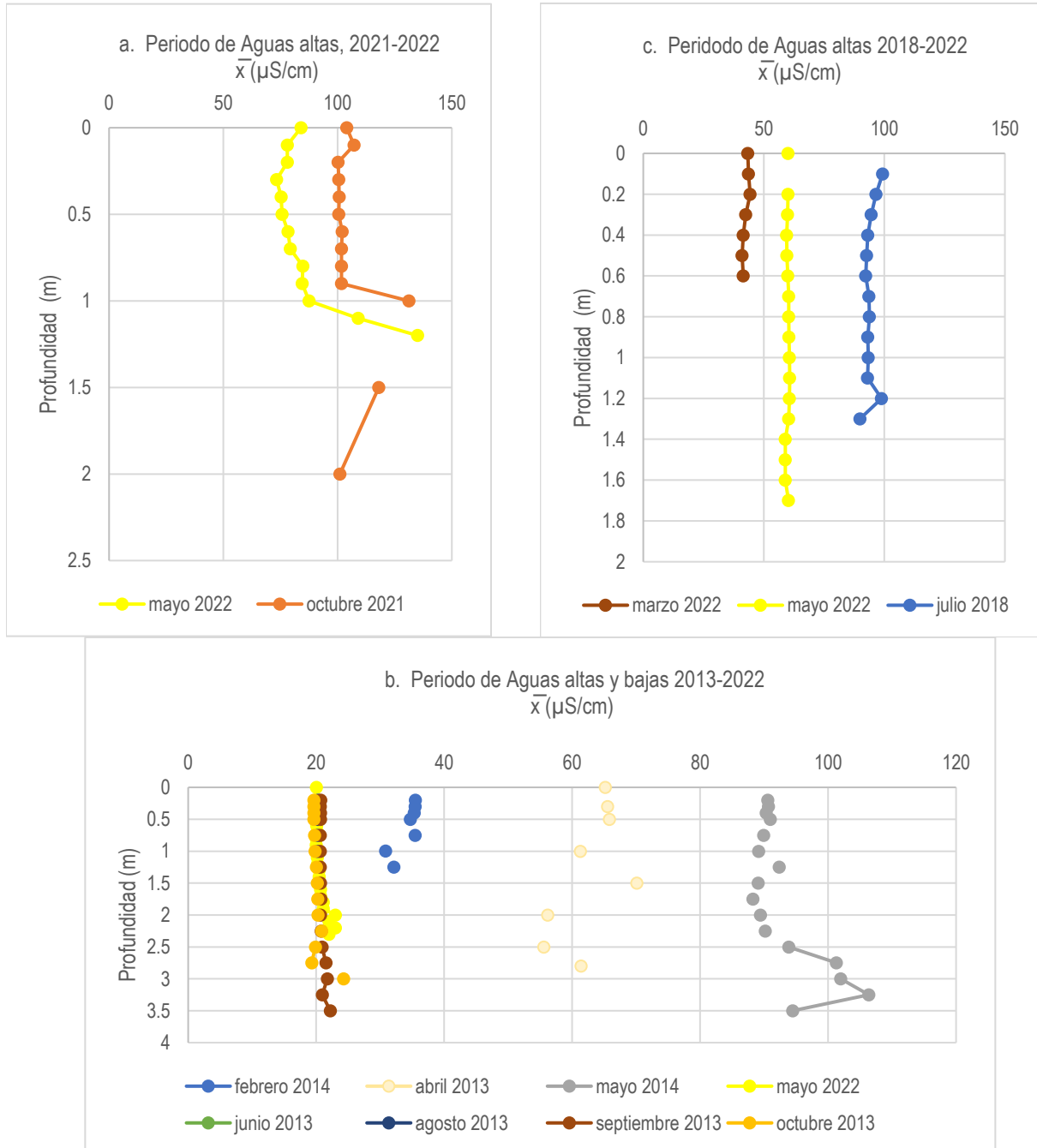
en los 93 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 1,1 m luego se observa un aumento hasta los 98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y vuelve a disminuir hasta los 89 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En cuanto a los registros de las muestras de marzo de 2022, los valores registrados entre los 0 m y los 0,2 m son valores cercanos a los 43 $\mu\text{S}/\text{cm}$, luego los valores descienden paulatinamente hasta los 41 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los registros del mes de mayo se encuentran en valores cercanos a los 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ desde los 0 m hasta los 1,3 m de profundidad, seguido de esto disminuyen los registros en valores cercanos a los 58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 1,8 m de profundidad donde vuelve a registrarse un valor de 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Se realizaron análisis de perfiles verticales de parámetros fisicoquímicos en las tres ciénagas durante los años 2013, 2014, 2021 y 2022: a) Ciénaga El Llanito, b) Ciénaga Paredes y c) Ciénaga Río Viejo

Figura 6.

Perfiles verticales de conductividad.



Nota. Elaboración propia.

Los valores de conductividad registrados en la ciénaga El Llanito en el mes de octubre de 2021 (periodo aguas altas) son mayores en comparación a los valores registrados en el mes de octubre de 2022 en el periodo de aguas altas. En la ciénaga de Paredes en el año 2013 los valores registrados en el mes de abril (posterior al mes de aguas bajas y previo a la temporada de aguas altas), durante los meses de agosto y septiembre (aguas altas) se observa un aumento en los valores de conductividad y en el mes octubre en el periodo de aguas altas, se observa una disminución de los resultados de conectividad, para febrero de 2013 en el periodo de aguas bajas los valores de conductividad aumentan en relación a los del agosto a octubre del año anterior, en el periodo de aguas altas de 2014 en el mes de mayo vuelve a observarse un aumento de los registros de conductividad, sin embargo en mayo de 2022 los valores vuelven a disminuir.

En la ciénaga Río Viejo los valores registrados en el periodo de aguas altas de julio 2018 son mayores a los registrados en marzo (final de periodo de lluvias bajas) del 2022 pero vuelven a presentar un aumento en el mes de mayo de 2022 que corresponde a periodo de aguas altas.

6.1.1.2 Oxígeno. El resultado de los valores promedios de oxígeno en relación con la profundidad de muestreo en cada una de las ciénagas puede observarse en la Figura 7. Al comparar los resultados obtenidos en las tres ciénagas, se observan diferentes patrones en la variabilidad de oxígeno (OD) a lo largo de las estaciones de muestreo, en los periodos evaluados y la profundidad.

El mayor valor de oxígeno registrado entre las tres ciénagas fue de 60,30 mg/L en la ciénaga Río Viejo durante el mes de marzo del año 2022 durante el periodo hidrológico transitorio entre aguas bajas y previo al comienzo del periodo de aguas altas. El menor valor promedio registrado fue de 0,01 mg/L también fue en la ciénaga de Río Viejo en el mes de mayo de 2022 durante el periodo hidrológico de aguas altas. En el periodo hidrológico de aguas bajas (durante el

mes de febrero), los registros mínimo y máximo fueron de 7,65 y 9,10 mg/L respectivamente, en la ciénaga de Paredes.

A continuación, se presentan los resultados de los valores promedios obtenidos en cada ciénaga.

- Resultado de oxígeno en la Ciénaga Llanito en el periodo de aguas altas en los años 2022 y 2021

El perfil resultado del muestreo de oxígeno en el mes de octubre del 2021 que corresponde a al periodo de aguas altas, se observa una tendencia a la disminución de la cantidad de OD desde la superficie (0 m) hasta cerca de los 3m, los valores registrados desde la profundidad 0 m hasta el 1 m se encuentran en un rango de valores entre los 20 mg/L y los 30 mg/, luego los valores del 1,1 m al 1,2 m presentan un promedio de oxígeno de aproximadamente 44 mg/L, luego en la profundidad de los 1,5 m a los 2 m se observan dos resultados similares alrededor de los 2,6 mg/L.

En el muestreo de mayo del 2022 el inicio del periodo hidrológico de aguas altas, no se observa uniformidad en los valores registrados, los datos desde la profundidad 0 m hasta el 1 m se encuentran en un rango de valores entre los 20 mg/L y los 30 mg/, luego los valores del 1,1 m al 1,2 m presentan un promedio de oxígeno de aproximadamente 44,50 mg/L.

- Resultado de oxígeno en la Ciénaga Paredes en los periodos de aguas altas y bajas de los años 2013,2014; y 2022.

Durante el mes de abril del año 2013 del periodo de transición de aguas bajas a aguas altas los registros promedio de oxígeno presentaron un comportamiento descendente en relación con la profundidad del muestreo iniciando en los 0 m con un valor cercano de los 7 mg/L hasta los 3 m de profundidad con un reporte de cerca de 4 mg/L.

En cuanto en el periodo de aguas altas durante el mes de junio presentan valores en el rango de aproximado de 4 mg/L y 8,5 mg/L, los cuales tienen un patrón descendente en relación con el aumento de la profundidad; continuando en la temporada en el mes de agosto los registros presentaron un comportamiento descendente en relación con la profundidad (0,2 m a 1 m) en el rango de 8,7 mg a 8,8 mg/L presentando solo un valor que difiere en el reporte con un valor de 8,1 mg/L.

En los meses de septiembre y octubre (aguas altas), los resultados obtenidos presentaron un comportamiento descendente a medida que se aumentó la profundidad, los reportes del mes de septiembre estuvieron en el rango de 1,3 mg/L a 6,7 mg/L.

En el año 2014 se tomaron muestras en el periodo de aguas bajas en el mes de febrero durante el periodo de aguas altas, en ambos casos se obtuvieron valores con tendencia descendente en relación con la profundidad, los resultados del promedio de oxígeno en el mes de febrero estuvieron en el rango de 7,6 mg/L a 9,1 mg/L y para el mes de mayo oscilaron entre los 3,3 mg/L y los 8,2 mg/L.

El muestreo realizado en el año 2022 se realizó durante la temporada de aguas altas en el mes de mayo y el resultado del promedio de oxígeno arrojó valores dispersos, se presentó una disminución de OD a medida que aumentaba la profundidad, sin embargo, de los 0 m a los 1,5 m los valores estuvieron en el rango de 7 mg/L a 7,7 mg/L, de ahí en lo adelante los valores disminuyeron desde los 6 mg/L hasta cerca de los 00 mg/L.

- Resultado de oxígeno en la ciénaga Río Viejo en los periodos de aguas altas y bajas en los años de 2018 y 2022

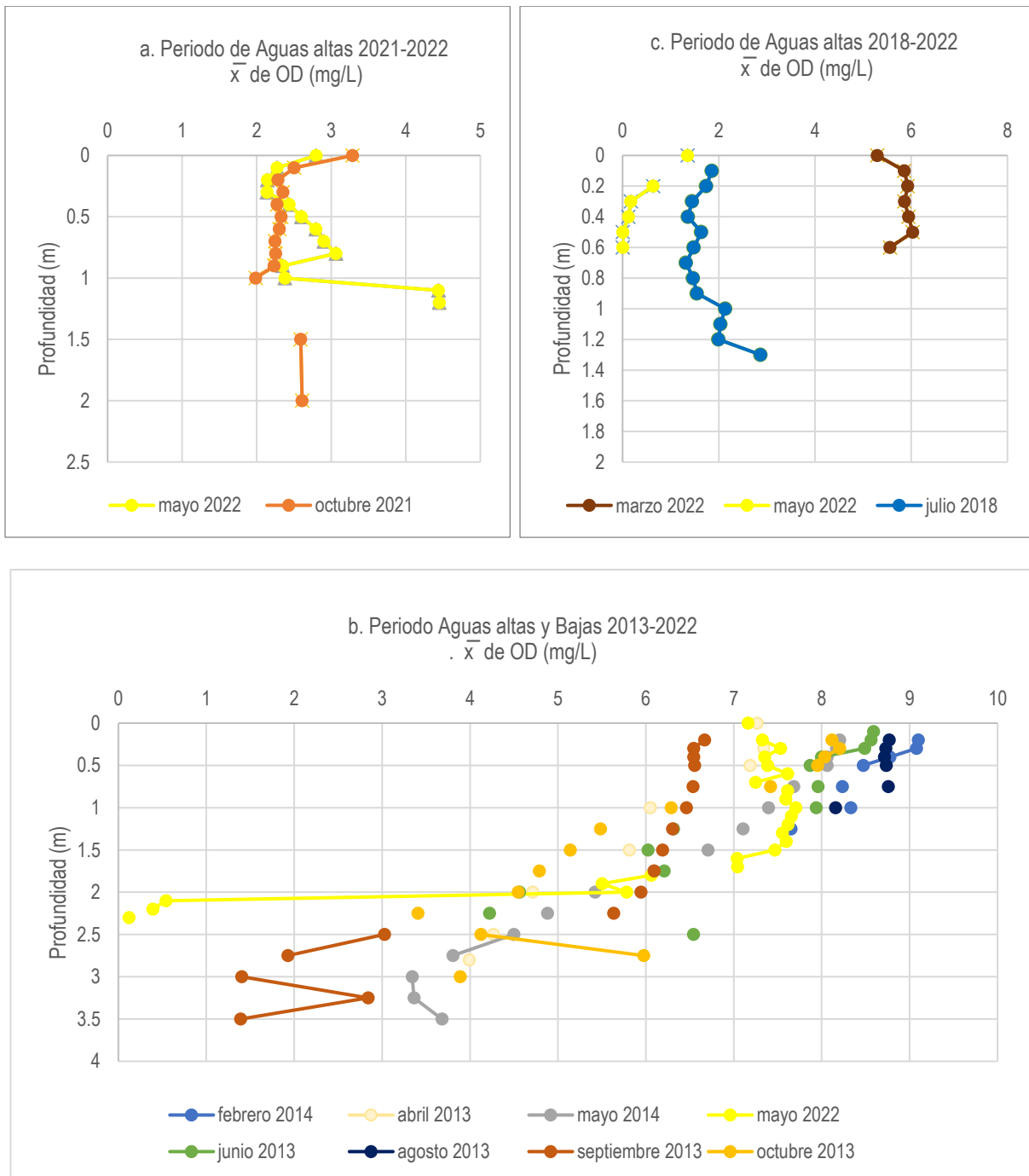
El muestreo realizado en la ciénaga Río Viejo en el año 2018 se realizó en el mes de julio que corresponde a periodo hidrológico de aguas altas, los valores promedio de oxígeno registrados

presentan una tendencia constante con baja variabilidad en relación con la profundidad de muestreo el resultado estuvo fueron valores entre 0,005 mg/L y 1,3 mg/L.

Los registros del muestreo en el año 2022 se realizaron en marzo al finalizar el periodo hidrológico de aguas bajas y en mayo periodo hidrológico de aguas altas donde los valores tuvieron una tendencia constante con baja variabilidad con relación a la profundidad de muestreo con resultados entre 1,3 y 2,8 mg/L. En cuanto al mes de marzo del 2022 la cantidad promedio de OD presentó una tendencia a aumentar en relación con la profundidad de muestreo, variando entre los 52,9 mg/L y los 60 mg/L.

Figura 7.

Perfiles verticales de oxígeno.



Nota. Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que en las ciénagas El Llanito y de Paredes presentan similitudes en cuanto a que los valores obtenidos de oxígeno son menores en el periodo hidrológico de aguas altas (mayo, julio y octubre) respecto a los registros realizados en los meses de variando más o menos 19 unidades de mg/L en la ciénaga El Llanito y más de unidades de 50 mg/L en Río Viejo. Los registros observados en la ciénaga de Paredes en los diferentes años y los periodos hidrológicos contrastantes no muestran una variación en la concentración de oxígeno como en las otras dos ciénagas, a lo largo de los diferentes meses y años analizados las variaciones fueron más o menos de 3 unidades de mg/L.

6.1.1.3 pH. El resultado de los valores promedios de pH en relación con la profundidad de muestreo en cada una de las ciénagas puede observarse en la Figura 8. Al comparar los resultados obtenidos en las tres ciénagas, se observan diferentes patrones en la variabilidad de pH a lo largo de las estaciones de muestreo, en los periodos evaluados y la profundidad. El valor máximo de pH registrado fue de 8,64 (ligeramente alcalino) y se presentó en la ciénaga Río Viejo en el mes de marzo al finalizar el periodo de aguas bajas; mientras que el menor valor registrado fue de 4,26 (moderadamente ácido) en la ciénaga paredes durante el mes de mayo (aguas altas).

A continuación, se presentan los resultados de los valores promedios obtenidos en cada ciénaga.

- Resultado pH Ciénaga El Llanito en los periodos de aguas altas en los años de 2018 y 2022.

Se tomaron los valores promedios de pH del muestreo del periodo hidrológico de aguas altas en octubre 2021 donde los valores estuvieron en el rango de 6,5 a 7 (ligeramente ácido a neutro) y en el mes de mayo de 2022 donde los valores presentaron una variabilidad de pH 5,4 a 7 (ácido a neutro); en ambos muestreos los valores presentaron una tendencia a disminuir en

relación con el aumento de la profundidad hasta alrededor de 1m luego presentan un leve aumento de valor del pH.

- Resultado de pH en la Ciénaga de Paredes en los periodos de aguas altas y bajas los años 2013, 2014 y 2022

En el año 2013 los muestreos durante las aguas altas realizados en los meses de junio y agosto, para junio los valores resultantes de pH promedio estuvieron en el rango de 5,2 a 6,5 (ligeramente ácido) presentando una tendencia de aumento desde los 0 m hasta 1 m luego de esta profundidad los valores tienden a disminuir y no presentan ninguna tendencia. Los resultados obtenidos en el mes de agosto los registros se realizaron de los 0 m a 1 m donde presentan una tendencia similar de los datos de pH varían entre los 7,4 y 7,5 (neutro).

Los muestreos de pH previos a las aguas altas realizados en abril, y durante las aguas altas en los meses de septiembre y octubre presentan una tendencia a disminuir a medida que se aumenta la profundidad, el rango de variación del promedio de pH en el mes de abril fue de 5,7 a 6,8 (ligeramente ácido); en el mes de septiembre de 6,2 a 6,8 (ligeramente ácido) y en el mes de octubre 6,3 a 7,4 (ligeramente ácido a neutral).

En el año 2014 el muestreo se realizó en el mes de febrero durante el periodo de aguas bajas y mayo aguas altas, los valores de pH promedio tienden a disminuir a medida que se aumenta la profundidad, en el mes de febrero los valores estuvieron en un rango de 8 a 8,5 (ligeramente alcalino) y en el mes de mayo 7,1 a 7,8 (neutral).

En el año 2022 se realizó muestreo en el mes de mayo durante el periodo de aguas altas los valores promedio de pH presentaron una tendencia a disminuir a medida que se aumenta la profundidad en un rango de 4,2 a 6,2 (moderada a ligeramente ácido).

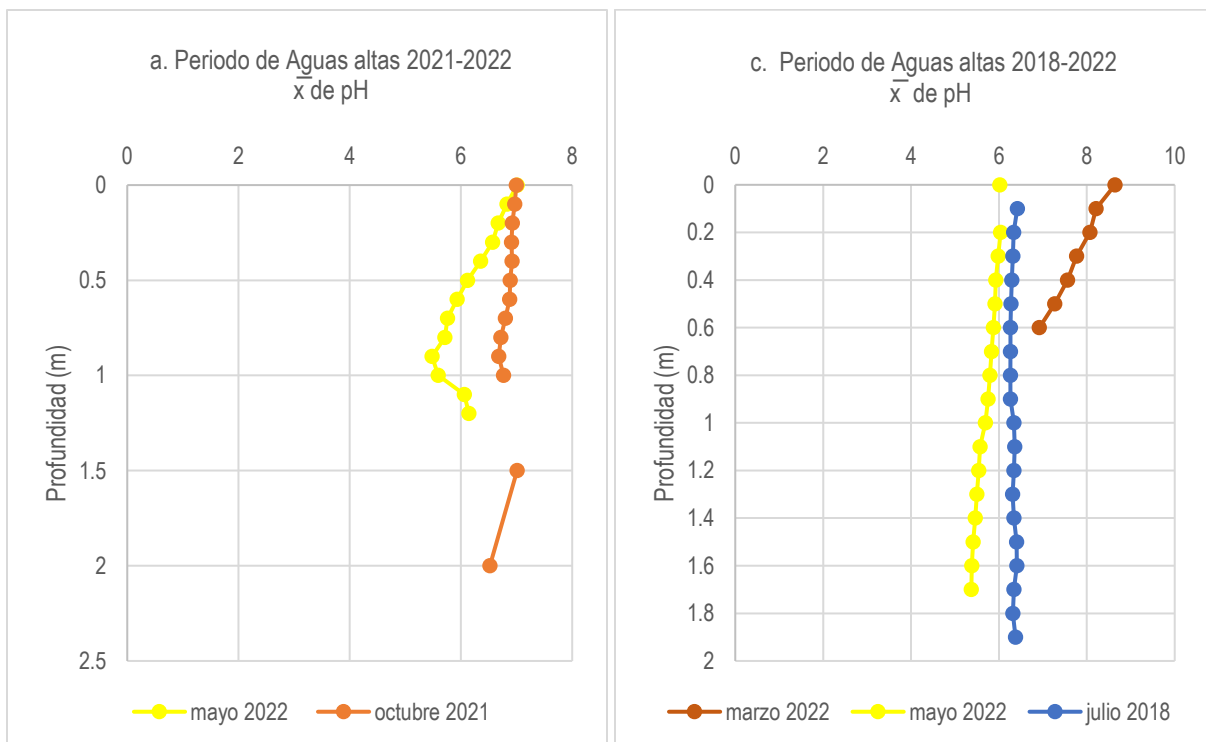
- Resultado de pH Ciénaga de Rio Viejo en los periodos de aguas altas y bajas en los años 2018

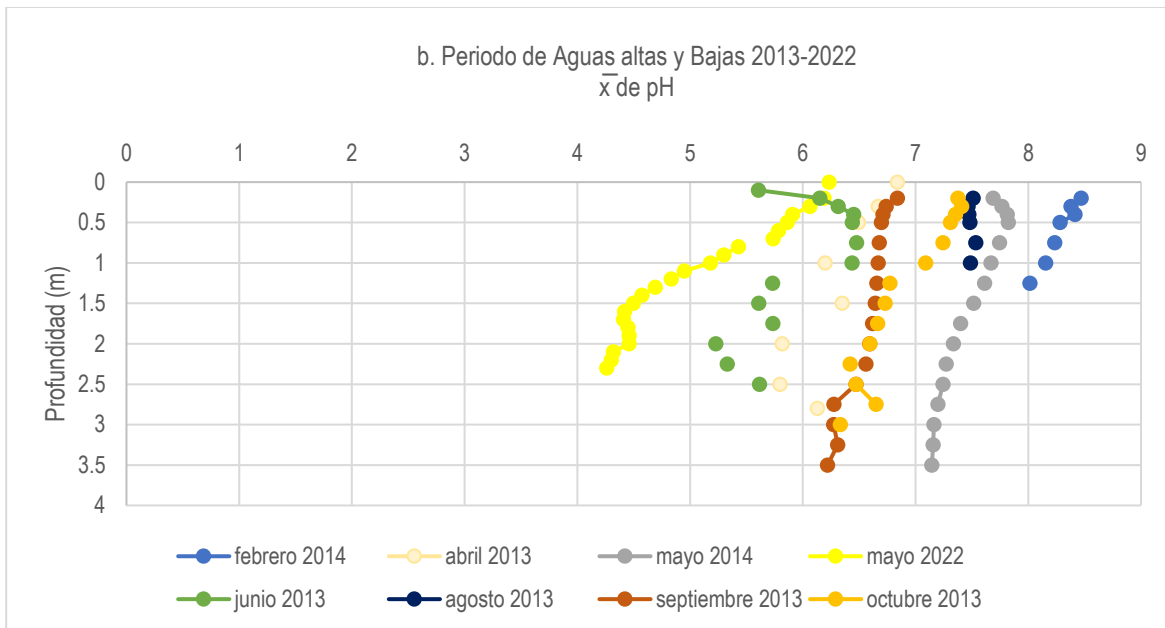
En el resultado del muestreo realizado en el mes de julio de 2018 que corresponde al periodo de aguas altas, se puede observar cómo los valores de pH varían levemente en el rango de los 6,2 y 6,4 (ligeramente ácido).

Para el año 2022 el muestreo en el periodo de sequía se realizó en el mes de mayo y en el mes de marzo en la finalización del periodo de aguas bajas, en ambos muestreos los valores presentaron una tendencia a disminuir el valor de pH en relación con el aumento de la profundidad, los valores de mayo el rango de los valores de pH fue de 5,3 a 6,1 (ligeramente ácido); y en el mes de marzo el rango de pH fue de 6,9 a 8,64 (ligeramente ácido a ligeramente alcalino).

Figura 8.

Perfiles verticales de pH





Nota. Elaboración propia.

En la ciénaga el Llanito las variaciones de los valores de pH promedio tomadas en dos años diferentes, ambas durante el periodo de lluvias presentan diferencias más o menos de 1,2 unidades, siendo mayores en el año 2021 en relación con el 2022.

En la ciénaga de Paredes los muestreos en periodo de aguas altas y bajas presentaron reportes de valores que oscilaban en los mismos rangos.

En la ciénaga Río Viejo, si se observa diferencias en los reportes de pH, se observa como en el muestreo en aguas altas (mayo y julio) los valores de pH son menores que los registrados a finales del periodo de aguas bajas (marzo).

6.1.1.4 Temperatura. Los resultados de los valores promedios de temperatura en relación con la profundidad de muestreo en cada una de las ciénagas pueden observarse en la Figura 9.

Al comparar los resultados obtenidos en las tres ciénagas, se observan diferentes patrones en la variabilidad de la temperatura a lo largo de las estaciones de muestreo, en los periodos evaluados y la profundidad. El mayor valor de temperatura promedio se registró en el año 2022 en

la ciénaga Llanito con un valor de 34,44 °C en el mes de marzo es decir al finalizar el periodo de aguas bajas, y el menor valor registrado fue de 27,78°C en la ciénaga Río Viejo en el mes de mayo durante las aguas altas.

A continuación, se presentan los resultados de los valores promedios obtenidos en cada ciénaga.

- Resultado de temperatura en la Ciénaga el Llanito en el periodo de aguas altas en los años 2021 y 2022

Se tomaron los valores promedios de temperatura del muestreo del periodo hidrológico de aguas altas en octubre 2021 donde los valores estuvieron en el rango de 28,9 °C a 34,4 °C; y en mayo de 2022 y los valores presentaron entre los 29,1 °C y 34,4 °C; en ambos muestreos los valores presentaron una tendencia a disminuir en relación con el aumento de la profundidad.

- Resultado de temperatura en la Ciénaga de Paredes en los periodos de aguas altas y bajas de los años 2013, 2014 y 2022

En el año 2013 los muestreos en el periodo hidrológico de aguas altas se realizaron en los meses de junio, agosto y septiembre; para junio los valores resultantes de temperatura promedio estuvieron en el rango de 30,2 °C y 32,5°C presentando una tendencia de aumentar hasta los 0,4 m y luego presentando un cambio notorio a la disminución de la temperatura. En el mes de agosto la temperatura varía entre los 31,8 °C y 33,5 °C los valores no presentan ningún tipo de tendencia sin embargo la disminución de temperatura más marcada se presentó a partir de los 0,75 m. En el mes de septiembre los valores de temperatura variaron entre los 29,9 °C y los 30,7°C presentando un cambio de temperatura desde los 0,5 m donde muestra una tendencia a la disminución.

Los muestreos realizados en el mes de abril (previo al inicio de las aguas altas) y octubre (durante el periodo de aguas altas) los valores de temperatura presentan una tendencia a disminuir

a medida que se aumenta la profundidad, el rango de variación del promedio de temperatura en el mes de abril fue de 29,8 °C a 32,5 °C; y en el mes de octubre la temperatura presentó variación entre los 29,2 °C y los 30,7 °C.

En el año 2014 el muestreo se realizó en el mes de febrero durante el periodo de aguas bajas, y mayo periodo de aguas altas, los valores de temperatura promedio tienden en ambos muestreos a presentar una tendencia a disminuir a partir de los 0,5 m, en el mes de febrero los valores de temperatura variaron entre los 31,7 °C y los 32,7 °C; y en el mes de mayo los valores se presentaron en el rango 30 °C y 31,3 °C.

En el año 2022 se realizó muestreo en el mes de mayo durante las aguas altas y los valores promedio de temperatura presentaron una tendencia a disminuir a medida que se aumenta la profundidad en un rango de 28,5 °C hasta los 31,5°C.

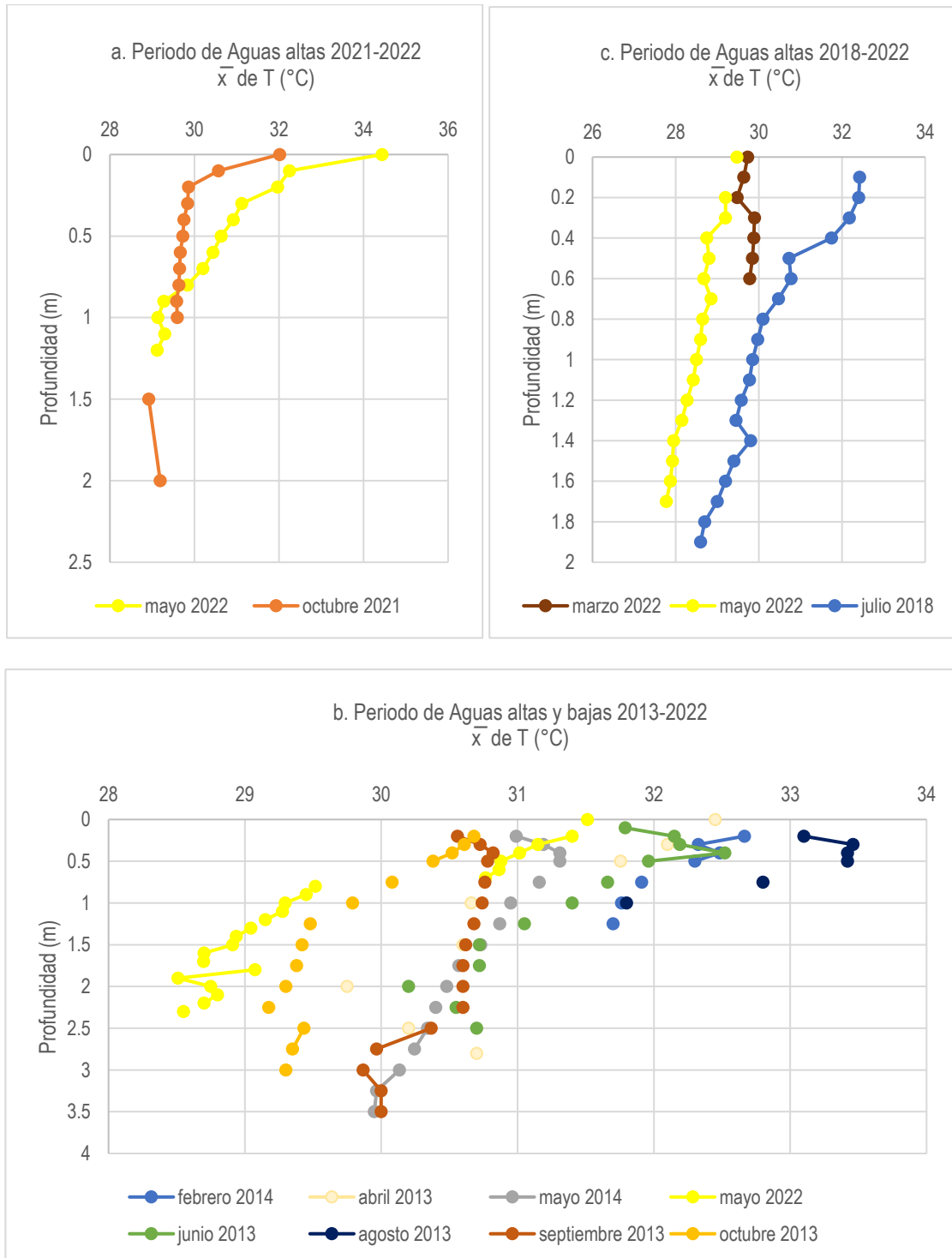
- Resultado de temperatura en la Ciénaga de Río Viejo en los periodos de aguas altas y bajas en los años 2018 y 2022

En el resultado del muestreo realizado en el mes de julio de 2018 que corresponde al periodo hidrológico aguas altas, se puede observar cómo los valores de temperatura tienden a disminuir a medida que aumenta la profundidad y varían en el rango de 28,6 °C hasta los 32,43°C, presentando los cambios más marcados de temperatura a los 0,4 m y los 0,5 m.

En mayo de 2022 durante las aguas altas los valores de temperatura disminuyeron a medida que se aumenta la profundidad y se registraron temperaturas en el rango de 27,78 °C a 29,48 °C. En el mes de marzo de 2022 finalizando el periodo de aguas bajas los valores variaron entre disminuir y aumentar sucesivamente a razón del aumento de la profundidad variando en un rango de 29,48 °C y 29,90 °C.

Figura 9.

Perfiles verticales de temperatura.



Nota. Elaboración propia.

En la ciénaga el Llanito los valores registrados de temperatura durante el periodo de aguas altas en el mes de mayo de 2022 y octubre de 2021 presentan variaciones de temperatura aumentando en 2022 respecto al año 2021 en promedio más o menos 1 °C.

En la ciénaga de paredes, en el registro del año 2013 los valores de temperatura observados durante los meses de junio, agosto, septiembre y octubre correspondientes a aguas altas y los registros del mes de abril que es una temporada previa a las aguas altas presentan variaciones de aumento y descenso de temperatura, sin embargo, se observa un aumento en los reportes del muestreo realizado en febrero 2014 respecto a los de la temporada de aguas altas del 2013, y para mayo de 2014 vuelve a observarse un descenso en la temperatura; en mayo de 2022 puede observarse como los valores de temperatura vuelven a disminuir.

En cuanto a los registros de temperatura en la ciénaga de Río Viejo se observa una disminución de temperatura de los valores en relación con el aumentar los años, siendo los registros de temperatura promedio en julio de 2018 (aguas altas) mayores en relación con los valores en comparación con marzo de 2022 (finalización de lluvias seas) y estos a su vez mayores a los de mayo (aguas altas) de 2022.

Se observa entonces como la temperatura en las ciénagas de Paredes y Río Viejo a medida que pasan los años la temperatura disminuye, solo en la ciénaga Llanito se observa un aumento de temperatura con el paso del tiempo.

6.1.2 Resultado Concentración de Clorofila.

Los anexos A y B contienen los registros de concentración de clorofilas correspondientes a los meses de marzo y mayo de 2022, respectivamente.

En marzo, el valor medio de Chl *a* fue de 13,03 mg/m³, mientras que en mayo fue de 10,90 mg/m³. Durante el período de muestreo, los valores de Chl *a* oscilaron entre 1,28 mg/m³ y 48,85

mg/m³. Finalmente se puede inferir que, en marzo de 2022, se observaron los mayores valores de clorofila *a*, que variaron desde 1,28 mg/m³ hasta 48,85 mg/m³, mientras que, en mayo, los valores fluctuaron entre 1,78 mg/m³ y 25,89 mg/m³.

A continuación, en la Tabla 5 se presenta un resumen estadístico que incluye medidas de tendencia central y dispersión de los valores.

Tabla 5.

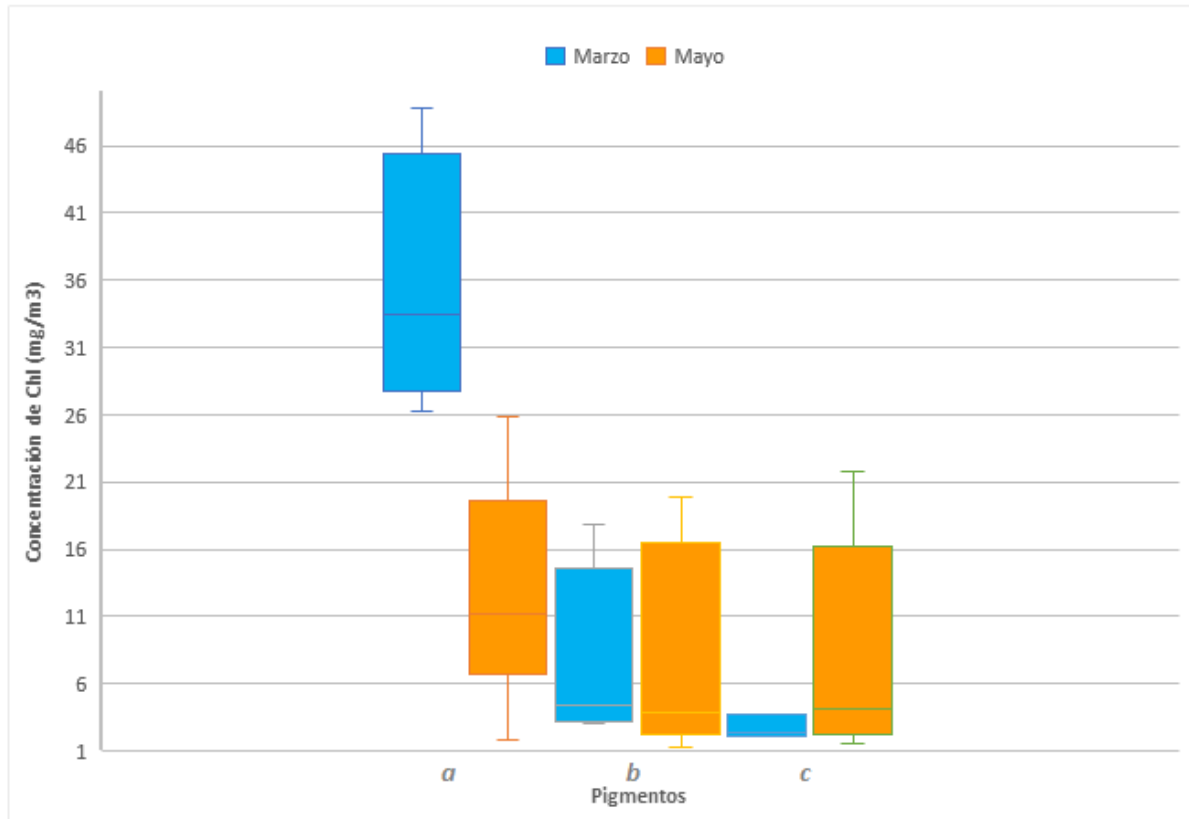
Estadística de la concentración de Chl a, b, y c marzo-mayo 2022

Estadístico		Marzo			Mayo		
		Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>c</i>	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>c</i>
		(mg/m ³)			(mg/m ³)		
Medidas de tendencia	media	13,03	14,96	12,90	10,90	2,42	2,64
	mediana	12,90	14,93	12,89	10,89	2,42	2,64
	moda	12,89	14,91	12,89	10,89	2,42	2,64
Medidas de dispersión	varianza	149,05	171,98	149,05	112,01	11,59	11,59
	desviación estándar	12,21	13,10	12,21	10,63	3,44	3,44

Nota. Elaboración propia.

Figura 10.

Diagrama box plot concentración de clorofilas por tipo de pigmento marzo y mayo 2022



Nota. Elaboración propia.

La Figura 10 exhibe un gráfico box plot que muestra las concentraciones de Chl *a*, *b* y *c*. Para la Chl *a*, los valores oscilan entre 1 y 49 mg/m³, con una predominancia de valores por encima de la mediana.

En cuanto a la Chl *b*, la mayoría de los registros se encuentran en el rango de 0 a 5 mg/m³.

La tendencia general muestra que la mayoría de los valores están por encima de la mediana. Por último, en la Chl *c*, la mayoría de los datos se agrupan entre 0.1 y 4 mg/m³.

6.1.2.1 Comparación de los Datos de Clorofila. Debido a que los resultados no mostraron una distribución normal, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis para contrastar las concentraciones de clorofila entre los meses de marzo y mayo de 2022 en cada ciénaga, evaluando los tres tipos de clorofila (a, b y c). Se fijó un nivel de significancia de 0,05 para este análisis estadístico.

- Hipótesis nula: No hay diferencias significativas en las concentraciones de clorofilas a, b y c entre los meses de marzo y mayo.
- Hipótesis alternativa: Existen diferencias significativas en los niveles de clorofila entre los meses de marzo y mayo.

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis indican que las concentraciones de clorofila *a*, *b* y *c* difieren significativamente entre los meses de marzo y mayo en cada una de las ciénagas evaluadas. Esto se basa en que los valores de *p* obtenidos fueron inferiores al nivel de significancia establecido ($p < 0.05$), lo que lleva al rechazo de la hipótesis nula y a la aceptación de la hipótesis alternativa.

6.2 Establecimiento de la Calidad del Agua de las Ciénagas por Medio de Índices

6.2.1 Índice Estado Tráfico Modificado

Los resultados de la evaluación de los Índices de Estado Tráfico para cada una de las ciénagas en cada una de las estaciones de muestreo se presentan en la Tabla 6, se observa que en la ciénaga Paredes el menor valor tráfico modificado (IETm) registrado fue de 30,28 en la estación Centro y la máxima fue de 35,34 en la estación Gómez. El menor resultado de IETm en la ciénaga Río Viejo fue de 15,77 en la estación La Sandovala y el valor máximo registrado fue de 23,72 en la estación Q. Portugala, y en los valores mínimos y máximos en la ciénaga Llanito fue de 32,04

(Est. Centro) y 42,79 (Est. Caño deseo) respectivamente. El resto de los valores calculados para obtener el valor final se presentan igualmente en la Tabla 6.

Tabla 6.*Índice Estado Trófico modificado (IETm)*

Ciénaga	Estación	Fecha	Periodo Hidrológico	Profundidad Secchi (DS)	Clorofila a (Chl) (mg/m3)	Fósforo				
						total (P) (mg/L)	IETm (DS)	IETm (Chl)	IETm(P)	IETm
Paredes	Centro	24/05/2022	Aguas Altas	0,5	0,03	0,1	60,76	-2,48	32,58	30,28
	Peruétano	20/02/2022	Aguas Bajas	0,5	0,12	0,1	60,76	9,55	32,58	34,3
	Gómez	24/05/2022	Aguas Altas	0,5	0,16	0,1	60,76	12,68	32,58	35,34
	Hoya	20/02/2022	Aguas Bajas	0,5	0,1	0,1	60,76	7,77	32,58	33,7
	Casa Blanca	24/05/2022	Aguas Altas	0,5	0,13	0,1	60,76	10,18	32,58	34,51
Río viejo	Cruce	21/05/2022	Aguas Altas	8	0,07	1,15	20,76	4,72	39,13	21,54
	Centro	3/03/2022	Aguas Bajas	9	0,04	1,63	19,06	-1,7	40,37	19,24
	Q. Portugala	21/05/2022	Aguas Altas	8,5	0,13	1,78	19,89	10,56	40,7	23,72
	La Sandovala	3/03/2022	Aguas Bajas	9	0,01	1,39	19,06	-11,54	39,79	15,77
El Llanito	Centro	24/05/2022	Aguas Altas	0,29	0,07	1,38	68,62	4,72	39,77	37,7
	Rincón del Guache	21/02/2022	Aguas Bajas	0,23	0,04	1,26	71,96	-1,7	39,45	36,57
	Caño el Deseo	24/05/2022	Aguas Altas	0,15	0,13	1,35	78,13	10,56	39,69	42,79

Ciénaga	Estación	Fecha	Periodo Hidrológico	Profundidad Secchi (DS)	Clorofila a (Chl) (mg/m ³)	Fósforo				
						total (P) (mg/L)	IETm (DS)	IETm (Chl)	IETm(P)	IETm
	Antiguo caño Llanito	21/02/2022	Aguas Bajas	0,3	0,01	1,29	68,13	-11,54	39,53	32,04

Nota. Elaboración propia.

6.2.2 Índice Canadian Water Quality Index

El índice CWQI (Canadian Water Quality Index) es un método para evaluar la calidad del agua en ríos y lagos. El índice se basa en cuatro parámetros: la profundidad del disco Secchi, la concentración de fósforo total, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el oxígeno disuelto (OD), en la Tabla 7 se presenta el resultado de este índice para las tres ciénagas objeto de estudio.

Tabla 7.

Resultados del cálculo del índice Canadian Water Quality Index

Indice Canadian Quality Index (ICWQI)			
Ciénaga	Mes / año	Canadian Water Quality	
		Index	Clasificación
El Llanito	jul-21	31,1	Marginal
	jun-21	24,4	Marginal
	sep-21	23,3	Marginal
	oct-21	20	Marginal
	feb-22	15,5	Marginal
	may-22	12	Marginal
Río Viejo	mar-18	27,4	Marginal
	may-22	25,3	Marginal
Paredes	feb-13	32,1	Marginal

Indice Canadian Quality Index (ICWQI)			
Ciénaga	Mes / año	Canadian Water Quality	
		Index	Clasificación
	jun-13	27,4	Marginal
	feb-14	25,3	Marginal
	oct-14	21	Marginal
	feb-22	14,1	Marginal
	may-22	10	Marginal

Nota. Elaboración propia.

6.2.3 Índice de Calidad de Agua ICA IDEAM

Con el fin de obtener el último indicador de calidad de agua, se ajustó lo contemplado en la etapa del marco teórico sobre el indicador ICA – IDEAM, teniendo en cuenta los parámetros previamente calculados de las tres ciénagas, además de que las mediciones de estos parámetros que son los valores generalizados de las tomas ejecutadas en las diversas estaciones de cada ciénaga y generando los promedios a través de los tiempos de toma de dichas muestras:

Para obtener el ICA en la ciénaga Llanito, se mantuvieron los mismos parámetros y ponderaciones, sin embargo, hubo diferencias en sus valores, para obtener el ICA en la ciénaga Paredes, fue necesario validar los parámetros obtenidos en las ciénagas, estos son la Conductividad (CD), temperatura, pH, Oxígeno disuelto (OD), DBO₅, Nitratos, Fosfatos, Coliformes fecales (UFC/100 ml) y la Turbiedad, las ponderaciones y valores de estos factores se evidencian a continuación en la tabla, Para obtener el ICA en la ciénaga Río Viejo, se mantuvieron los mismos parámetros y ponderaciones, sin embargo, hubo diferencias en sus valores.

En la Tabla 8 se presentan los parámetros considerados para la evaluación del Índice de Calidad de Agua del IDEAM, el resultado obtenido en cada una de las ciénagas. Los resultados de los calidad de agua (ICA) para la Ciénaga de Paredes dio un valor de 0,7848, para la ciénaga El

llanito el ICA fue de 0,7303 y la ciénaga de Río Viejo obtuvo ICA de 0,6457 lo cual según el IDEAM (2011) en los parámetros estandarizados para determina la calificación de la calidad del se presentan en este documento en la Tabla 3, se puede concluir que las calidad del agua en Llanito y Paredes es Buena y es calificada como aceptable, y para la ciénaga del Río Viejo la calidad del agua es aceptable.

Tabla 8.*Índice ICA – IDEAM – Ciénagas*

Parámetro	Ciénaga el Llanito			Ciénaga de Paredes			Ciénaga Río Viejo		
	Valor	Ponderación	Subíndice	Valor	Ponderación	Subíndice	Valor	Ponderación	Subíndice
Conductividad (CD)	30,04	0,15	4,50	30,04	0,15	4,50	67,83	0,15	10,17
Temperatura	30,95	0,15	4,64	30,95	0,15	4,64	29,49	0,15	4,42
pH	6,62	0,10	0,66	6,62	0,10	0,66	6,14	0,10	0,61
Oxígeno disuelto (OD)	6,81	0,03	0,20	6,81	0,03	0,20	11,64	0,03	0,34
DBO5	38,58	0,07	2,70	2,94	0,07	0,20	64,37	0,07	4,50
Nitratos	5,77	0,02	0,14	0,50	0,02	0,01	10,88	0,02	0,27
Fosfatos	2,83	0,02	0,07	0,10	0,02	0,003	1,32	0,02	0,03
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	150,00	0,40	60,00	170,00	0,40	68,00	110,00	0,40	44,00
Turbiedad	2,00	0,05	0,10	5,00	0,050	0,25	4,00	0,05	0,20

Parámetro	Ciénaga el Llanito			Ciénaga de Paredes			Ciénaga Río Viejo		
	Valor	Ponderación	Subíndice	Valor	Ponderación	Subíndice	Valor	Ponderación	Subíndice
Resultado ICA - IDEAM	Llanito		0,7303	Paredes		0,7848	Río Viejo		0,6457

Nota. Elaboración propia.

6.3 Análisis de Variación en la Calidad del Agua de las Ciénagas.

Con el fin de determinar la calidad del agua de las tres ciénagas en diferentes espacios temporales y espaciales, en la Tabla 9 se muestra los comparativos de las tres ciénagas para cada una de sus estaciones mediante los índices ICA – IDEAM y el IETm para diferentes espacios temporales de meses y años, dado que los índices requerían la evaluación de diferentes parámetros tanto físicos como químicos, se realizó la comparación entre las temporalidades donde se tenía resultado de los índices, en el caso del Canadian Water Quality Index para Llanito se eligió los valores máximos tanto en aguas altas como bajas de cada uno de los dos años de muestreo.

Tabla 9.

Comparativa de los índices promediados espacio temporalmente

Ciénaga	Periodo	Canadian Water Quality Index		IETm		ICA - IDEAM	
		Aguas Bajas	Aguas Altas	Aguas Bajas	Aguas Altas	Aguas Bajas	Aguas Altas
Paredes	2013	32,1	27,4	30,28	34,3	0,6952	0,6425
	2014	25,3	21	31,25	34,51	0,7848	0,7054
	2022	14,1	10	33,7	35,34	0,7685	0,6524
Río Viejo	2022	27,4	12	15,77	19,24	0,6457	0,6012
Llanito	2021	24,4	31,1	37,7	42,79	0,7021	0,6525
	2022	15,5	12	32,04	36,57	0,7303	0,6952

Nota. Elaboración propia.

6.3.1 Variación Temporal

A continuación, se presenta el análisis de la calidad del agua en las ciénagas de Paredes, Río Viejo y Llanito durante dos períodos hidrológicos contrastantes de la región de aguas bajas y aguas altas, para lo cual se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar si existen diferencias significativas en los indicadores de calidad del agua entre los períodos mencionados.

Antes de llevar a cabo el análisis de la calidad del agua en las ciénagas durante la temporada de aguas altas y bajas, se establecieron las siguientes hipótesis y se definió un valor de significancia del 5 % ($p < 0.05$):

- Hipótesis Nula (H_0): No hay diferencias significativas en los indicadores de calidad del agua entre los períodos de aguas altas y bajas en las ciénagas estudiadas.
- Hipótesis Alternativa (H_1): Existen diferencias significativas en los indicadores de calidad del agua entre los períodos de aguas altas y bajas en las ciénagas estudiadas.

Estas hipótesis se formularon con base en la comprensión de que los fenómenos climáticos en temporada de aguas bajas y aguas altas, la variación de estos genera impactos en la calidad del agua de los ecosistemas acuáticos, debido a cambios en las condiciones hidrológicas, la temperatura del agua y la disponibilidad de nutrientes.

En la tabla 10 se presenta el resultado del estadístico de prueba de Kruskal Wallis en la ciénaga paredes, donde se observa que los valores de Estadísticos de prueba el Valor de P en cada uno de los indicadores es menor a 0,05, por lo cual se rechaza la hipótesis nula.

En el caso de la ciénaga Río Viejo, se observa que los valores p de los indicadores CWQI y IETm son inferiores a un nivel de significancia de $p < 0.05$, mientras que para el indicador ICA el valor p es superior a este nivel. Esto señala una disparidad significativa en la calidad del agua evaluada por estos indicadores. En consecuencia, se puede inferir que los indicadores CWQI y

IETm ofrecen una representación más precisa de las variaciones en la calidad del agua en comparación con el índice ICA

En la Tabla 10 se presenta el resultado del estadístico de prueba de Kruskal Wallis en ciénaga Llanito, donde se observa que los valores de Estadísticos de prueba el Valor de $p < 0.05$, por lo cual se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 10.

Prueba Kruskal Wallis – Ciénagas El Llanito, Paredes y Río Viejo

Indicador	Ciénaga Paredes		Ciénaga Río Viejo		Ciénaga de Llanito	
	Estadístico de Prueba	Valor p	Estadístico de Prueba	Valor p	Estadístico de Prueba	Valor p
CWQI	25.03	0.0001	5.267	0.0218	10.72	0.0047
IETm	22.63	0.0001	6.571	0.0103	11.46	0.0033
ICA	22.89	0.0001	3.789	0.0512	12.61	0.0021

Nota. Elaboración propia

6.3.2 Variación Espacial

Para establecer la variación espacial se consideraron los indicadores obtenidos de la prueba de Kruskal Wallis y se mantuvo las mismas consideraciones de Hipótesis nula y alternativa y el valor de significancia $p < 0.05$.

En la Tabla 11 se puede observar que para la ciénaga de Paredes y el Llanito los valores son menores al valor de significancia ($p < 0.05$) por lo que se rechaza la hipótesis nula, en el caso de la ciénaga Río Viejo dos de los parámetros evaluados el Valor p es menor al valor de significancia ($p < 0.05$) y solo uno es mayor por lo que se rechaza la hipótesis nula lo que indica

que existen diferencias significativas en los indicadores de calidad del agua entre los períodos de aguas bajas y altas en las ciénagas estudiadas.

Tabla 11.

Prueba de Kruskal Wallis para la espacialidad de las ciénagas

Ciénaga	Indicador	Estadístico de Prueba	Valor p
Paredes	CWQI	13.81	0.001
	IETm	12.43	0.002
	ICA	14.97	0.001
Río Viejo	CWQI	4.94	0.026
	IETm	5.72	0.017
	ICA	3.41	0.064
Llanito	CWQI	8.61	0.014
	IETm	9.12	0.010
	ICA	7.31	0.026

Nota. Elaboración propia.

7. Discusión

Durante los períodos contrastantes, las propiedades fisicoquímicas de las tres ciénagas del Magdalena Medio santandereano presentaron características similares en temperatura y conductividad. Específicamente la estabilidad térmica se debe a que estos cuerpos hídricos están

situados en el piso térmico cálido, característico de la región neotropical, con temperaturas anuales promedio que oscilan entre 24 °C y 28 °C (Mojica *et al.*, 2006).

En cuanto a la conductividad, se observó un comportamiento similar al registrado en otras ciénagas del Magdalena Medio santandereano, como la Ciénaga de Chucurí, Ciénaga de Aguas Negras, Ciénaga San Silvestre, Ciénaga del Opón y Ciénaga Miramar (Pedraza *et al.*, 1989; Ramírez & Viña, 1998; Pava *et al.*, 2006; Barón-Rodríguez *et al.*, 2006; Roldán & Ramírez, 2008, Criales & Sánchez 2022). Estas ciénagas comparten características ambientales y geográficas similares, lo que sugiere que pueden experimentar influencias comunes y presentar comportamientos paralelos en cuanto a la conductividad del agua.

En el 2018, en la ciénaga de Río viejo los niveles de OD estuvieron por debajo de 4 mg/L, señalando una calidad deficiente del agua. Para marzo de 2022, los registros superaron los 4 mg/L, indicando una posible mejora. No obstante, en mayo de 2022, los valores volvieron a descender por debajo de 4 mg/L, reflejando nuevamente una condición desfavorable del agua en esta ciénaga en particular.

Estos hallazgos indican que las concentraciones de oxígeno son muy variables en las ciénagas y pueden depender de otros factores propios de cada cuerpo de agua como los aportes de materia orgánica, o el incremento en la productividad primaria debida por la actividad agrícola y ganadera de la región, son clave para determinar la calidad del agua y el estado de conservación de la misma. Pérez y Sánchez (2020), indican como la influencia de la agricultura intensiva en la contaminación del agua en el Magdalena Medio, particularmente en la cuenca del río Viejo, emerge como un factor determinante en la variabilidad observada en la concentración de oxígeno disuelto. Esta influencia se ve reflejada en la alteración de los procesos ecológicos y la calidad del

agua, como se observa en los cambios significativos en la concentración de oxígeno disuelto a lo largo del tiempo.

El pH es otra de las variables que exhibió una variabilidad significativa en las ciénagas Llanito y Río Viejo, tanto temporal como espacialmente. Aristizábal y colaboradores (2017) encontraron, durante los periodos de aguas bajas, se aprecia un incremento en los niveles de pH, atribuible posiblemente a la menor dilución de materia orgánica y también de contaminantes, debido a la reducción del caudal fluvial en los afluentes de las ciénagas. En periodos de aguas altas, se observa una tendencia a la acidificación, fenómeno que podría relacionarse con la mayor entrada de materia orgánica al ecosistema durante estas temporadas, lo que genera procesos de descomposición y liberación de ácidos orgánicos alterando el pH en las ciénagas. Cataño Vergara (2015) encontraron comportamientos similares en la ciénaga grande del bajo Sinú durante las temporadas de aguas altas, se registró una tendencia a la acidificación, evidenciada por una disminución en los niveles de pH, este fenómeno se atribuyó a la sobresaturación de dióxido de carbono (CO_2) proveniente de la atmósfera y a la descomposición orgánica en el ecosistema acuático.

Al analizar los índices de calidad estimados en este estudio, se destacó que el Índice de Estado Trófico Modificado por Toledo (IETm) exhibe variaciones significativas entre las ciénagas investigadas. Es particularmente notable el caso de la Ciénaga del Llanito, donde se observó una marcada heterogeneidad en el estado trófico a lo largo de las estaciones, señalando síntomas de eutrofización moderada. Este fenómeno no sólo podría atribuirse a los aportes de materia orgánica suspendida, sino también a otros factores como los aumentos en la productividad primaria, que favorecen el crecimiento de algas y contribuyen a la degradación de la calidad del agua.

Por otro lado, la Ciénaga de Paredes se clasifica como oligotrófica en todas sus estaciones, lo que sugiere una baja productividad biológica para este tipo de ciénagas en general (Quiñonez-Velázquez et al. 2020). Esto podría atribuirse a una menor entrada de nutrientes o una mayor filtración del agua, limitando así la disponibilidad de nutrientes y manteniendo la productividad biológica en niveles más bajos.

En cuanto a la Ciénaga Río Viejo, se observa una variabilidad en su estado trófico, con algunas estaciones mostrando signos de eutrofización moderada y otras permaneciendo en un estado mesotrófico. Este patrón puede ser el resultado de una combinación de factores ambientales y antropogénicos, como la presencia de nutrientes provenientes de actividades humanas y la dinámica natural del ecosistema (Wang & Zhang 2020).

El Índice Canadian Water Quality Index (CWQI) proporcionó datos significativos sobre la calidad del agua en las tres ciénagas. Aunque los valores se sitúan en un rango similar, catalogados como "marginales" en todas las ciénagas, la calidad del agua en la Ciénaga Paredes parece mostrar una ligera disminución en el ICA en comparación con Llanito y Río Viejo, mostrando valores más bajos. Con los resultados se debe resaltar la tendencia de deterioro gradual en la calidad del agua en la Ciénaga el Llanito a lo largo del tiempo, según lo señalado por Sandoval Rodríguez, J. L. (2022), esto puede deberse principalmente a los altos aportes de materia orgánica, producto de la intensiva actividad agrícola y ganadera que ha ido en detrimento de la ronda hídrica de este cuerpo de agua. Se debe resaltar que se ha documentado que, para esta ciénaga durante períodos de aguas bajas, el espejo de agua de la Ciénaga Llanito tiende a disminuir o desaparecer, lo que contribuye a incrementar esta situación.

En cuanto al Índice de Calidad de Agua (ICA) del IDEAM, se evidencian diferencias entre las tres ciénagas estudiadas, si se sigue la clasificación propuesta por este índice para determinar

los diversos usos del agua. En Llanito y Paredes, donde se califica la calidad del agua como aceptable, el recurso hídrico es idóneo para una variedad de propósitos. Sin embargo, la ciénaga de Río Viejo está clasificada con una calidad regular, por lo que se requiere tratamientos previos para ciertos usos.

Estos resultados destacan la importancia de un monitoreo continuo de la calidad del agua en estas ciénagas y la implementación de medidas de conservación y gestión efectivas para asegurar su salud y sostenibilidad a largo plazo, especialmente en áreas donde se requiere tratamiento previo para un uso adecuado. Cuando observamos los cambios en la calidad del agua en las tres Ciénagas estudiadas el pulso hidrológico de aguas altas y aguas bajas presenta diferencias.

Durante las épocas de aguas altas, se incrementan los aportes de materia orgánica, sedimentos y contaminantes, provenientes del aumento del caudal fluvial y el arrastre de pesticidas agrícolas y desechos urbanos durante las lluvias intensas, lo que puede deteriorar la calidad del agua (González 2023). En las épocas de aguas bajas, la menor dilución del agua propicia una mayor concentración de sólidos particulados, como acumulación de contaminantes y nutrientes, aumentando la turbidez de las ciénagas, la concentración de nutrientes y los niveles de oxígeno disuelto disminuyen (Wang & Zhang 2020). Estos procesos están influenciados por diversos factores, como la temperatura del agua, la intensidad de la luz solar y la actividad biológica, lo que contribuye a la variabilidad en los indicadores de calidad del agua. Por lo tanto, estos resultados resaltan la complejidad de los factores locales y su interacción con los procesos hidrológicos y ambientales, subrayando la necesidad de una gestión adaptativa y precisa para garantizar la calidad del agua en estas ciénagas del Magdalena medio santandereano.

Con los resultados observados en este trabajo hay que destacar que el Índice de Estado Trófico Modificado por Toledo (IETm) es el indicador que mejor se ajusta en las Ciénagas para evaluar la calidad del agua en cuerpos hídricos. Este índice proporciona detalles sobre su productividad biológica y susceptibilidad a la eutrofización. Basado en parámetros fisicoquímicos y biológicos, según García Gallego y Salcedo Salgado (2021), este índice ofrece una evaluación integral al considerar la concentración de nutrientes y variables biológicas como la biomasa fitoplanctónica y la transparencia del agua.

Toro Barragán (2022), también mencionan que la sensibilidad del IETm para detectar cambios en el estado trófico de los cuerpos de agua es bastante bueno, lo que lo convierte en un indicador más robusto y confiable para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos. Además, su capacidad para evaluar la susceptibilidad a la eutrofización, como lo señalaron Vera Rodríguez y Zambrano Mera (2021), lo hace una herramienta valiosa para identificar áreas de mayor riesgo y orientar estrategias de gestión y conservación.

8. Conclusiones

Las variación espacial y temporal de las características fisicoquímicas de las ciénagas estudiadas se ven moduladas directamente por el pulso de inundación y el tipo de ciénaga. La Ciénaga de Río Viejo, al ser tipo III abastecida a través del Caño Río viejo se conecta directamente al río Magdalena, presenta los valores más altos de productividad y de materia orgánica. En contraste, las ciénagas de Llanito y de Paredes, al ser humedales de tipo II con entradas secundarias de ríos como el Sogamoso y Lebrija presentaron menores valores de productividad y materia orgánica.

El análisis detallado de la calidad del agua en las ciénagas de Paredes, Río Viejo y Llanito revela que los cambios en los períodos hidrológicos de aguas bajas y aguas altas ejercen una influencia significativa en los Índices de Calidad del Agua (ICA).

Los resultados del Índice de Calidad del Agua (IDEAM), indica que la calidad del agua en las ciénagas El Llanito y Paredes, ubicadas en el Magdalena Medio santandereano, son aceptables, mientras que la ciénaga de Río Viejo presenta una calidad de agua clasificada como regular.

El Índice de Estado Trófico Modificado por Toledo (IETm) es el que mejor se ajusta en estas ciénagas para determinar la calidad del agua, porque integra parámetros fisicoquímicos y biológicos, permitiendo una evaluación integral de la productividad biológica y la susceptibilidad a la eutrofización.

9. Recomendaciones

Es importante realizar un monitoreo de los parámetros fisicoquímicos de estas ciénagas para garantizar que la calidad del agua se mantenga dentro de los límites aceptables.

Para mejorar la calidad del agua en el sitio de muestreo, se deben tomar las siguientes medidas:

- Reducir la contaminación de aguas residuales y de fertilizantes agrícolas.
- Reducir la contaminación industrial.

Además de estas medidas, también se pueden realizar acciones para mejorar la calidad del agua en el sitio de muestreo, como la reforestación de las zonas ribereñas y la creación de zonas de humedales protegidas.

Dada la diversidad de los resultados fisicoquímicos en las tres ciénagas es esencial abordar la gestión y el monitoreo de la calidad del agua de manera individualizada, considerando las particularidades de cada sistema acuático, pero sin perder de vista la interconexión y la dinámica global de estas ciénagas dentro del ecosistema regional.

Referencias

- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., & Linero-Cueto, J. (2021). Concentración de metales pesados y calidad fisicoquímica del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), e1313. Epub April 21, 2021. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1313>
- Aristizábal, E., Olivera, M., Osorio, J., & García, J. (2017). Variabilidad espacial y temporal del pH y su relación con la calidad del agua en la ciénaga de Ayapel, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(157), 53-62.
- Barrera Molina, S. C. (2023). Contribución a la estructuración del plan de conservación y manejo de tortugas marinas en el departamento del Magdalena.
- Cardona, C. G., Moreno, J., Contreras, A., Sanchez-Nuñez, D., Moreno, N. A., Guerrero, D., ... & Navarro, J. L. (2023). Accounting of marine and coastal ecosystems at the Ramsar Site, Estuarine Delta System of the Magdalena River, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *One Ecosystem*, 8, e98852.
- Carvajal Urrea, Y., Sepúlveda Delgado, C. A., & Benítez Pérez, M. I. (2021). Amphibia: estrategias para mejorar la resiliencia socio ecológica en el asentamiento Antonio Nariño del borde urbano rural de la Ciénaga San Silvestre, Barrancabermeja (Santander) (Maestría en procesos urbanos y ambientales, Universidad EAFIT).
- Cataño Vergara, Y. (2015). Estudio de la vegetación acuática en un área de inundación de la ciénaga grande del bajo Sinú, sector Purísima, departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(20). Recuperado a partir de <https://revistaaccb.org/r/index.php/accb/article/view/58>

- Congreso de la República de Colombia. (2007). Decreto 2881 de 2007. [https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1876728#:~:text=\(julio%2031\)-,por%20el%20cual%20se%20designan%20unos%20humedales%20para%20ser%20incluidos,la%20Ley%20357%20de%201997](https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1876728#:~:text=(julio%2031)-,por%20el%20cual%20se%20designan%20unos%20humedales%20para%20ser%20incluidos,la%20Ley%20357%20de%201997).
- Criales-Hernández, M. I., Lobo, D. M. S., Parra, A. M. R., & López-Gómez, S. M. (2023). Diversidad y estructura de la comunidad zooplanctónica en la ciénaga de paredes. *Acta Biológica Colombiana*, 28(1), 95-107.
- Criales-Hernández, M. I., Sanchez-Lobo, D. M., & Almeyda-Osorio, J. K. (2020). Expanding the knowledge of plankton diversity of tropical lakes from the Northeast Colombian Andes. *Revista de Biología Tropical*, 68, 159-176.
- Cruz Montes, E. C., & Durango Banquett, M. M. (2023). Evaluación de la calidad de agua de las Ciénagas Guartinaja, Momil y Sapal–Córdoba mediante modelos estadísticos y percepción remota. *Ecological Indicators*, 122, 107218.
- Donato-Rondón, J. C. (2021). Decálogo de impactos ambientales: Geografía de las transformaciones en sistemas acuáticos de Colombia.
- Duraiappah, A. K. (2014). Wetlands ecosystem services and poverty alleviation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.013>
- ENA (Estudio Nacional del Agua). (2022). Informe Nacional del Estado de los Recursos Hídricos en Colombia.
- Galvis, A. M. (2022). Evaluación de la calidad del agua de la fuente hídrica Ciénaga San Silvestre, en la desembocadura de la quebrada el Zarzal en jurisdicción del municipio de Barrancabermeja - Santander. [Proyecto aplicado]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/57836>.

- García Gallego, J. M., & Salcedo Salgado, J. (2021). Modelación de transporte de nutrientes para el análisis del estado trófico de la Ciénaga de Betancí.
- García, M. E., & López, R. (2018). "Differential responses of algal communities to seasonal environmental changes: insights from a long-term study in a tropical wetland." *Aquatic Sciences*, 52(4), 789-802.
- Guerrero Lizarazo, M. C. Evaluación de la integridad biótica de la comunidad de algas perifíticas de la ciénaga de Zapatosa, departamento de Cesar y Magdalena, Colombia (Tesis de maestría en ciencias, Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82686>.
- Gutierrez Cala, L. (2020). Looking for the present in the past: Social-Ecological Memory and Palaeoecology to explore changes in Ciénaga Grande de Santa Marta-Colombia.
- Gutiérrez, C., & Pinilla, A. (2016). Efectos de la conectividad local sobre los ensambles de peces en una planicie de inundación tropical: Effects of the local connectivity on fish assemblages in a tropical floodplain. *Caldasia*, 38(2), pp. 300-313.
- Hernández, M. F. A., Hernández, J. S., & Tangua, F. C. V. (2022). Determinación del estado ecosistémico de la subcuenca la Gómez y ciénaga de Paredes a través de macroinvertebrados acuáticos indicadores de calidad en Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander. *Revista Matices Tecnológicos*, 14, 25-31.
- Hincapié Pérez, M. M. & Chaverra Cardona, G. M. (2014). Diagnóstico de aguas. Manual de laboratorio. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11407/2727>.
- Hutchinson, G.E. & Loeffler, H. (1956). The thermal classification of lakes. *Proceedings of Natural Academy of Sciences, USA*. 42: 84-86.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). (2023).

Informe Nacional del Estado de los Recursos Hídricos en Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2011). Hoja

metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,1). Sistema de

Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. 10 p.

<http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36->

[3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031](http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031)

Jiménez Sanabria, M. P., Rios Rodríguez, S. Y., & Ardila Gómez, J. J. (2023). Evaluación del

impacto ambiental de un sistema de hum

Jiménez Sanabria, M. P., Rios Rodríguez, S. Y., & Ardila Gómez, J. J. (2023). Evaluación del

impacto ambiental de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas

residuales de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio.

Largo Taborda, W. A. (2022). Desarrollo de un método de micro extracción en fase líquida con

fibra hueca en modo barra de solvente “hf-sbme”, para el análisis de contaminantes

emergentes (benzodiazepinas y compuestos fenólicos) en muestras de aguas residuales

(Tesis de maestría, Universidad de Caldas). Repositorio Institucional Ucaldas.

<https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/17362>.

López, M., Rodríguez, A., Pérez, L., & González, F. (2018). Variabilidad temporal y espacial del

pH en cuerpos de agua dulce: un estudio de caso en la ciénaga Grande de Santa Marta,

Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Naturales, 42*(2), 143-156.

Lorduy González, J. F., & Vellojín Muñoz, K. E. (2023). Índice de idoneidad de hábitat del

bocachico (*Prochilodus magdalena*; Steindachner 1879) en la ciénaga grande del Bajo

Sinú y Ciénaga de Betancí, Córdoba, mediante la implementación de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua.

Marín, J. A. G., González, C. D. V. V., & Mata, N. J. M. (2018). Evaluación de la calidad del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de estudio: Cuenca del Río Guarapiche, Monagas, Venezuela. In *Anales Científicos* (Vol. 79, No. 1, pp. 111-119). Universidad Nacional Agraria La Molina

Mojica, J. I., Galvis, G., Sánchez-Duarte, P., Castellanos, C., & Villa-Navarro, F. A. (2006). Peces del valle medio del río Magdalena, Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

Molano, M., & Garcia, M. (2015). Informe de calidad y niveles de la red de piezómetros municipio de Santiago de Cali. Alcaldía de Santiago de Cali., Cali.

Moreno Pallares, M. I. (2021). Evaluación de las condiciones bióticas y abióticas sobre la variación espacial y temporal de las náyades de *Miathyria marcella* (Odonata: Libellulidae) en ciénagas del departamento del Atlántico (Tesis doctoral en ciencias biológicas, Universidad Nacional de Colombia).

Moreno, M. V., Paruelo, J. M., & Kowaljow, E. (2020). Cambios en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca del Río Salado (Argentina) y su relación con la calidad del agua. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 77(2), 191-202.

Ochoa-Balbacea, D., Gonzales, S., Apeño, A., & Aponte, H. (2022). Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 182-191.

- ONU. (2019). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. UNESCO.
- Osorio-Ortega, M.A.; García-González, J.; Saquicela-Rojas, R. A.; Cadme M.L. (2021). Determinación del índice de calidad del agua en ríos de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Ingeniería del agua*. 25 (2): 115–126. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13921>
- Pérez, L., & Sánchez, M. (2020). Influencia de la agricultura intensiva en la contaminación del agua en el Magdalena Medio: un estudio de caso en la cuenca del río Viejo. *Revista de Investigación Agrícola*, 15(1), 67-80.
- Quinonez-Velazquez, C., González-Silvera, A., & Herrera-Silveira, J. A. (2020). Water Quality and Phytoplankton Communities in a Caribbean Coastal Lagoon Impacted by Anthropogenic Activity. *Water*, 12(10), 2850. <https://doi.org/10.3390/w12102850>
- Romero, J. G., García, J. C., Gavidia, A., & Santana, A. G. V. (2020). Desarrollo sostenible: Desde la mirada de preservación del medio ambiente colombiano. *Revista de Ciencias Sociales*, 26(4), 293-307.
- Ruiz-Jiménez, Jenny-Alejandra, Cohuo-Duran, Sergio, & Criales-Hernandez, María-Isabel. (2023). Efecto del pulso de inundación sobre el ensamble de ostrácodos (Ostracoda: Podocopida) en microambientes en la Ciénaga Río Viejo, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e52779. <https://dx.doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.52779>
- Salas Oquendo, D. (2022). Aproximación conceptual y metodológica para identificar la estructura ecológica en el ordenamiento ambiental, referencia Cuenca Río Sucio Alto. Universidad Nacional de Colombia.
- Sandoval Rodríguez, J. L. (2022). Análisis de la calidad del agua en la ciénaga el Llanito de Barrancabermeja, Santander utilizando índices de contaminación.

- Smith, J., & Jones, A. (2019). Temporal variability in chlorophyll concentrations in aquatic ecosystems: implications for environmental monitoring. *Aquatic Ecology*, 45(3), 321-335.
- Sousa, R. G. C., Oliveira, N. S., & da Rosa, F. R. (2022). The flood pulse regulates the longitudinal distribution of fish assemblages in the amazonian floodplain lakes. *Boletim do Instituto de Pesca*, 48.
- Talbot, C. J., Bennett, E. M., Cassell, K., Hanes, D. M., Minor, E. C., Paerl, H., ... & Xenopoulos, M. A. (2018). The impact of flooding on aquatic ecosystem services. *Biogeochemistry*, 141, 439-461.
- Toledo, M., & Duarte, C. M. (1984). Índice de estado trófico modificado para aguas tropicales. *Limnetica*, 1, 41-46.
- Tomita Vidal, S. (2022). Adaptación del índice biótico signal-2 (Chessman, 2003) para evaluar la salud ambiental de la cuenca del Río Maipo, Zona Centro-Sur, Chile.
- Toro Barragán, K. M. (2022). Evaluación del estado trófico en tres zonas costeras del Caribe y Pacífico colombiano en 2021 (Bachelor's thesis).
- Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20311572>.
- Van Wyk, P., & Scarpa, J. (1999). Water quality requirements and management. Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems, 4520, 141-161.
- Vera Rodríguez, J. P., & Zambrano Mera, D. D. (2021). Grado de eutrofización del humedal La Segua (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM MFL).

- Wang, H., & Zhang, L. (2020). "Understanding the significance of outliers in chlorophyll concentration data: implications for ecological studies." *Journal of Environmental Monitoring*, 28(2), 201-215.
- Wulf, A. (2016). *La invención de la naturaleza: el nuevo mundo de Alexander von Humboldt*. Taurus.
- Yang, G., Zhang, Q., Wan, R., Lai, X., Jiang, X., Li, L., ... & Lu, Y. (2016). Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river–lake interactions: advances in research on the middle Yangtze river. *Hydrology Research*, 47(S1), 1-7.
- Yang, L., Zhao, S., & Liu, S. (2022). A global analysis of urbanization effects on amphibian richness: Patterns and drivers. *Global Environmental Change*, 73, 102476.
- Yarnell, S. M., Stein, E. D., Webb, J. A., Grantham, T., Lusardi, R. A., Zimmerman, J., ... & Sandoval-Solis, S. (2020). A functional flows approach to selecting ecologically relevant flow metrics for environmental flow applications. *River Research and Applications*, 36(2), 318-324.

Apéndices

Apéndice A. Registros de los extractos en el mes de marzo 2022; Río Viejo, Llanito y Paredes.

		Sandovala	Portugala	Centro	Cruce
Marzo	[Chla]Ca (extracto)	0,86884	0,99749	0,86007	0,64456
Marzo	[Chla]Cb (extracto)	0,024	0,06802	0,06063	0,07034
Marzo	[Chla]Cc (extracto)	0,01532	0,03839	0,03219	0,01308
Marzo	Clorofila a mg/m3	13,0326	14,96235	12,90105	9,6684
Marzo	Clorofila b mg/m3	0,36	1,0203	0,90945	1,0551
Marzo	Clorofila c mg/m3	0,2298	0,57585	0,48285	0,1962
		Centro	C Deseo	R Guache	Antiguo C Llanito
Marzo	[Chla]Ca (extracto)	0,08567	0,75698	2,46413	0,88938
Marzo	[Chla]Cb (extracto)	0,078744	0,03786	0,70584	0,00454
Marzo	[Chla]Cc (extracto)	0,153786	0,0847	7,65803	0,0213
Marzo	Clorofila a mg/m3	1,28505	11,3547	36,96195	13,3407
Marzo	Clorofila b mg/m3	1,18116	0,5679	10,5876	0,0681
Marzo	Clorofila c mg/m3	2,30679	1,2705	114,87045	0,3195
		R hoya	Peruetano	Gomez	Centro
Marzo	[Chla]Ca (extracto)	2,32994	1,75095	3,25708	2,13513
Marzo	[Chla]Cb (extracto)	0,2418	0,20619	0,3375	1,18735
Marzo	[Chla]Cc (extracto)	0,15382	0,13991	0,24544	13,62769
Marzo	Clorofila a mg/m3	34,9491	26,26425	48,8562	32,02695
Marzo	Clorofila b mg/m3	3,627	3,09285	5,0625	17,81025
Marzo	Clorofila c mg/m3	2,3073	2,09865	3,6816	204,41535

Apéndice B. Registros de los extractos en el mes de mayo 2022; Río Viejo, Llanito y Paredes.

		Sandovala	Portugala	Centro	Cruce
Mayo	[Chla]Ca (extracto)	0,72707	0,91634	0,74599	0,74216
Mayo	[Chla]Cb (extracto)	0,16166	0,45465	0,20857	0,11949
Mayo	[Chla]Cc (extracto)	0,17665	0,59072	0,19955	0,14114
Mayo	Clorofila a mg/m3	10,90605	13,7451	11,18985	11,1324
Mayo	Clorofila b mg/m3	2,4249	6,81975	3,12855	1,79235
Mayo	Clorofila c mg/m3	2,64975	8,8608	2,99325	2,1171
		Centro	C Deseo	R Guache	Antiguo C Llanito
Mayo	[Chla]Ca (extracto)	0,56927	0,41166	1,44272	0,88878
Mayo	[Chla]Cb (extracto)	0,14583	0,24252	0,44925	0,26923
Mayo	[Chla]Cc (extracto)	0,11543	0,26906	0,49626	0,27176
Mayo	Clorofila a mg/m3	8,53905	6,1749	21,6408	13,3317
Mayo	Clorofila b mg/m3	2,18745	3,6378	6,73875	4,03845
Mayo	Clorofila c mg/m3	1,73145	4,0359	7,4439	4,0764
		R hoya	Peruetano	Gomez	Centro
Mayo	[Chla]Ca (extracto)	1,54798	0,12857	0,11898	1,7265
Mayo	[Chla]Cb (extracto)	5,71658	1,32541	1,31707	0,08591
Mayo	[Chla]Cc (extracto)	6,71858	1,24443	1,45584	0,10004
Mayo	Clorofila a mg/m3	23,2197	1,92855	1,7847	25,8975
Mayo	Clorofila b mg/m3	85,7487	19,88115	19,75605	1,28865
Mayo	Clorofila c mg/m3	100,7787	18,66645	21,8376	1,5006

Apéndice C. Resultados estadística descriptiva - parámetros fisicoquímicos.

	Absorbancia a 630 nm	Absorbancia a 664 nm	Absorbancia a 675 nm	Absorbancia a 665 nm	Volumen extraído (v1) L	Volumen filtrado (v2) m3	Clorofila a mg/m3 por el método de feofitinas	Feofitina a mg/m3	Absorbancia a 664 nm corregida	Absorbancia a 647 nm corregida	Absorbancia a 630 nm corregida	[Chl a] Ca (clorofila de l extracto)	[Chl a] Cb (clorofila de l extracto)	[Chl a] Cc (clorofila de l extracto)	Clorofila de la muestra mg/m3	Clorofila de la muestra mg/m3	Clorofila de la muestra mg/m3	Absorbancia a 665 nm corregida
Media	0,0994333	0,1898666	0,1679	0,0669866	0,0069433	0,0043333	791545902,5	-52314773,6	0,096513333	0,009933333	0,032446667	84622,28916	-36499,16982	36215,2118	352495557,1	781474378,2	137888513,5	0,061446667
Error típico	0,016808159	0,016269903	0,0046094	0,01255301	0,00230675	7,46614E-06	396021919,1	331402574,6	0,00849303	0,008499213	0,006786326	13287,53029	12619,39794	14052,82661	205583025,4	341864506,9	414223136,7	0,007968297
Mediana	0,0605	0,174	0,0945	0,0385	0,0135	0,0004	476239	274876,5	0,099	-0,008	0,0275	110865,5	-0,48457	0,53323	9529800	-463255	884575	0,0655

	Absorbancia a 630 nm	Absorbancia a 664 nm	Absorbancia a 647 nm	Absorbancia a 750 nm	Absorbancia a 665 nm	Volumen extraído (v1) L	Volumen filtrado (v2) ml	Clorofila a mg/m ³ por el método de feofitinas	Feofitina mg/m ³	Absorbancia a 664 nm corregida	Absorbancia a 647 nm corregida	Absorbancia a 630 nm corregida	[Chl] Ca (clorofila del extracto)	[Chl] Cb (clorofila del extracto)	[Chl] Cc (clorofila del extracto)	Clorofila de la muestra mg/m ³	Clorofila b de la muestra mg/m ³	Clorofila c de la muestra mg/m ³	Absorbancia a 665 nm corregida
Desviación estándar	0,09202079	0,089113927	0,076933626	0,068768215	0,061938614	0,011046194	4,08938E-05	2169101383	1815166657	0,046518241	0,046552109	0,03717024	72778,80073	69119,28915	76970,5013	1126024605	1872469020	2268793558	0,043644162
Varianza de la muestra	0,008475426	0,007941292	0,0050918783	0,00472839067	0,00383635192	0,000122018	1,6723E-09	4,705E+18	3,29483E+18	0,002163947	0,002167099	0,001381627	5296753835	4777476133	5924458071	1,26793E+18	3,50614E+18	5,14742E+18	0,001904813
Curtosis	0,230286603	0,076839121	-0,30387201243	-0,30383372	0,366186351	29,0355676	-0,939247366	9,44204586	10,70854308	1,882554643	-1,107469768	0,472063858	-1,678056538	0,558424863	0,017728478	22,7823817	2,3312739	13,26861056	0,238592119
Coefficiente de asimetría	1,329846284	0,582573677	0,898863698	1,017593785	0,859493745	5,350686547	0,859806	3,096295808	0,58103978	-0,95844209	0,197423889	0,141808653	0,116229693	-1,510098958	1,043540379	4,604911757	2,003223973	-0,01080691	0,366931709

	Absorbancia a 630 nm	Absorbancia a 664 nm	Absorbancia a 647 nm	Absorbancia a 750 nm	Absorbancia a 665 nm	Volumen extraído (v1) L	Volumen filtrado (v2) m3	Clorofila a mg/m3 por el método de feofitinas	Feofitina a mg/m3	Absorbancia a 664 nm corregida	Absorbancia a 647 nm corregida	Absorbancia a 630 nm corregida	[Chl a] Ca (clorofila del extracto)	[Chl a] Cb (clorofila del extracto)	[Chl a] Cc (clorofila del extracto)	Clorofila de la muestra mg/m3	Clorofila b de la muestra mg/m3	Clorofila c de la muestra mg/m3	Absorbancia a 665 nm corregida
Rango	0,286	0,363	0,258	0,2254	0,251	0,0625	0,0001	9316022342	1269733334	0,217	0,16	0,167	190528,5134	200149,9983	305757	5963849568	5912233429	16966115556	0,184

	Absorbancia a 630 nm	Absorbancia a 664 nm	Absorbancia a 647 nm	Absorbancia a 750 nm	Absorbancia a 665 nm	Volumen extraído (v1) L	Volumen filtrado (v2) m3	Clorofila a mg/m3 por el método de feofitinas	Feofitina a mg/m3	Absorbancia a 664 nm corregida	Absorbancia a 647 nm corregida	Absorbancia a 630 nm corregida	[Chl] C a (clorofila de l extracto)	[Chl] C b (clorofila de l extracto)	[Chl] C c (clorofila de l extracto)	Clorofila a de la muestra mg/m3	Clorofila b de la muestra mg/m3	Clorofila c de la muestra mg/m3	Absorbancia a 665 nm corregida
Mínimo	0,015	0,059	0,021	0,006	0,037	0,0025	0,0004	-12,556667	-58146667	-0,048	-0,07	-0,057	-0,51342	-20,0149	-10,6668	-7316235	-325242125	-8372248889	-0,015
Máximo	0,301	0,422	0,279	0,226	0,288	0,065	0,0005	9303466667	6882666667	0,169	0,09	0,11	19,0528	0,9983	19,9089	5956533333	5586991304	8593866667	0,169
Suma	2,983	5,696	3,597	2,0096	3,853	0,2083	0,01291	23746377075	-1569443208	2,8954	0,298	0,9734	2538668,675	-1094975,095	1086456,354	10574866713	23444231347	4136655404	1,8434

	Absorbancia a 630 nm	Absorbancia a 664 nm	Absorbancia a 647 nm	Absorbancia a 750 nm	Absorbancia a 665 nm	Volumen extraído (v1) L	Volumen filtrado (v2) m ³	Clorofila a mg/ m ³ por el método de feofitinas	Feofitina a mg/ m ³	Absorbancia a 664 nm corregida	Absorbancia a 647 nm corregida	Absorbancia a 630 nm corregida	[Chl a] C a (clorofila de l extracto)	[Chl a] C b (clorofila de l extracto)	[Chl a] C c (clorofila de l extracto)	Clorofila a de la muestra mg/ m ³	Clorofila b de la muestra mg/ m ³	Clorofila c de la muestra mg/ m ³	Absorbancia a 665 nm corregida
Cuenta	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Nivel de confianza (95,0%)	0,034376545	0,033275687	0,028727488	0,025678474	0,023128259	0,004124717	1,527E-05	80995576,78	677794369	0,017370197	0,017382843	0,013879596	27176,082	25809,56674	28741,25754	420464,4976	699191,4231	847181,4377	0,016296998

Apéndice D. Resultados IETm para la Ciénaga Llanito.

IETm								
Ciénaga	Estación	Profundidad Secchi (DS)	Clorofila a (Chl) (mg/m3)	Fósforo total (P) (mg/L)	IETm(DS)	IETm(Chl)	IETm(P)	IETm
Llanito	Centro	0,29	0,076	1,38	68,6255037	4,72991661	39,7712262	37,7088822
Llanito	Rincón del guache	0,23	0,04	1,26	71,9696941	-1,70577935	39,4518384	36,5719177
Llanito	Caño el deseo	0,15	0,136	1,6	78,1364077	10,5646871	40,306137	43,0024106
Llanito	Antiguo caño Llanito	0,3	0,015	2,2	68,1364077	-11,54029	41,5298073	32,7086417

Apéndice E. *Resultados IETm para la Ciénaga Paredes.*

Ciénaga	Estación	Profundidad Secchi (DS)	Clorofila a (Chl) (mg/m3)	Fósforo total (P) (mg/L)	IETm(DS)	IETm(Chl)	IETm(P)	IETm
Paredes	CENTRO	0,5	0,037	0,1	60,7667517	-2,48747872	32,5829492	30,2874074
Paredes	PERUETANO	0,5	0,123	0,1	60,7667517	9,5572962	32,5829492	34,3023324
Paredes	GOMEZ	0,5	0,168	0,1	60,7667517	12,6834265	32,5829492	35,3443758
Paredes	HOYA	0,5	0,103	0,1	60,7667517	7,77799905	32,5829492	33,7092333
Paredes	CASA BLANCA	0,5	0,131	0,1	60,7667517	10,1891102	32,5829492	34,5129371