



DIAGNÓSTICO FUNCIONAL DE CUERPOS LÓTICOS Y LÉNTICOS USANDO EL ÍNDICE DE VALORACIÓN TRÓFICA-ECOLÓGICA (IVT-ECOLÓGICA): CASO RÍO ORINOCO Y LAGUNA DE CASTILLERO, VENEZUELA

FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF LOTIC AND LENTIC WATER BODIES USING THE TROPIC-ECOLOGICAL VALUATION INDEX (IVT-ECOLOGICAL): CASE STUDY OF THE ORINOCO RIVER AND CASTILLERO LAGOON, VENEZUELA

Aristide Márquez^{1,*}

Joselyn Acosta Núñez²

¹ Universidad de Oriente, Instituto Oceanográfico de Venezuela, Cumaná, Venezuela.

² Universidad de Oriente, Escuela de Ciencias, Departamento de Química, Cumaná, Venezuela.

*Correspondencia. E-mail: aristd@gmail.com

Recibido: 12-09-2025, Aceptado: 17-11-2025, Publicado: 22-12-2025

RESUMEN

Los ecosistemas acuáticos continentales, lénticos y lóticos, son componentes esenciales de la biosfera porque generan bienes y servicios ecosistémicos que respaldan la vida humana y la biodiversidad. Los índices de calidad de agua y de estado trófico se han vuelto instrumentos fundamentales para diagnosticar y transmitir la situación ecológica en estos ecosistemas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la funcionalidad del río Orinoco y la laguna de Castillero, identificando los procesos internos de liberación y retención de fósforo en los sedimentos usando el índice valoración trófica-ecológica (IVT-Ecológica). Este índice se creó considerando la interrelación entre elementos fisicoquímicos y geoquímicos (pelágicos y bentónicos), incluyendo algunas variables que promueven la liberación del fósforo, así como las que actúan como estabilizadores o amortiguadores del sistema (PBD, P-O, P-Ad+Fe; PO_4^{3-} , NO_x , O_2 , SS; pH, $CaCO_3$). Los resultados fueron comparados mediante análisis multivariado (MDS, ANOSIM y SIMPER). Para el río Orinoco se observó un valor bajo de IVT-Ecológica ($0,04 \pm 0,02$), lo que permite clasificarlo como un sistema estable y exportador; mientras que la laguna, con un valor de $3,77 \pm 1,30$, actúa como un sistema de retención y reciclaje interno de fósforo, como resultado de la acumulación de P-lábil. No se detectaron impactos antropogénicos. Estos resultados confirman que el IVT-Ecológica es un indicador fiable para identificar vulnerabilidades tróficas con una buena sensibilidad; por lo tanto, se aconseja usarlo en programas de monitoreo, identificación de procesos de eutrofización, estudios comparativos y en la administración de ecosistemas tropicales.

PALABRAS CLAVE: agua y sedimento, eutrofización, fósforo, índice ecológico, sistemas acuáticos tropicales

ABSTRACT

Both lentic and lotic continental aquatic ecosystems are essential components of the biosphere because they generate the goods and services that support human life and biodiversity. Water quality and trophic status indices have become fundamental tools for assessing and communicating the ecological health of these ecosystems. This study aimed to evaluate functionality and identify internal phosphorus release and retention processes in the sediments of the Orinoco River and Castillero Lagoon using the Trophic Vulnerability Index (IVT-Ecological). This index considers the interrelationship between physicochemical and geochemical elements (pelagic and benthic), including variables that promote phosphorus release, as well as stabilisers and buffers for the system (BD-P, P-O, P-Ad+Fe, PO_4^{3-} , NO_x , O_2 , SS, pH and $CaCO_3$). The results were compared with multivariate analyses (MDS, ANOSIM and SIMPER). The Orinoco River showed a low IVT-Ecological value of 0.038, classifying it as a stable, export-dominated system. In contrast, the lagoon functioned as a system with retention and internal phosphorus recycling due to the accumulation of labile phosphorus, with a value of 3.77. No anthropogenic impacts were detected. These results confirm that the IVT-Ecological index is a reliable indicator for identifying trophic vulnerabilities with high sensitivity. Therefore, it is recommended for use in monitoring programs, eutrophication studies, comparative research and the management of tropical aquatic ecosystems.

KEYWORDS: water and sediment, eutrophication, phosphorus, ecological index, tropical aquatic systems

COMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO (APA 7ed): Márquez, A. & Acosta Núñez, J. (2025). Diagnóstico funcional de cuerpos lóticos y lénticos usando el Índice de Valoración Trófica-Ecológica (IVT-Ecológica): caso río Orinoco y laguna de Castillero, Venezuela. *Bol Inst Mar Perú*, 40(2), e444. <https://doi.org/10.53554/boletin.v40i2.444>

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos continentales, lénticos y lóticos, son componentes esenciales de la biosfera porque generan bienes y servicios ecosistémicos que respaldan la vida humana y la biodiversidad. Sin embargo, están bajo una presión cada vez mayor a causa de los cambios hidro-meteorológicos y las acciones humanas, como la urbanización, la construcción de represas y la agricultura intensiva (DE DEUS & MATOS, 2024). Estas acciones tienen el potencial de alterar sus condiciones sedimentarias, biológicas y fisicoquímicas, lo que pone en peligro su integridad funcional y ecológica (FABRE *et al.*, 2023; MOGANE *et al.*, 2023). La eutrofización es un proceso que sucede cuando se añaden cantidades excesivas de nutrientes, especialmente de fósforo a cuerpos de agua continentales como los lagos, ríos, embalses y los arroyos, así como también a ecosistemas marinos costeros (ESCOBER & PYTHIAS ESPINO, 2023). En vista de esta situación, se vuelve imprescindible tener métodos de evaluación que sean capaces de condensar la complejidad de las variables ambientales en categorías prácticas y claras para su administración y conservación (SINGH & YADAV, 2025).

En esta dirección, los índices de calidad de agua y de estado trófico se han vuelto instrumentos fundamentales para diagnosticar y transmitir la situación ecológica de embalses, ríos y lagos. Un caso notorio es el índice de estado trófico (TSI, según sus siglas en inglés), que fue propuesto por CARLSON (1977) y después adaptado a entornos tropicales por TOLEDO JÚNIOR *et al.* (1983). Se ha expandido su uso de manera significativa debido a su simplicidad y a que puede ser utilizado, ya que se fundamenta en aspectos como la clorofila-*a*, el fósforo total y la claridad del agua. No obstante, varios estudios han apuntado a restricciones en su validez universal, debido a que variables como la profundidad del cuerpo de agua, la resuspensión de sedimentos y la relación entre fósforo y nitrógeno pueden modificar los resultados, especialmente en ecosistemas tropicales y someros (HUPFER & LEWANDOWSKI, 2008; ZHANG *et al.*, 2023). Para esta investigación que se plantea en el río Orinoco y la laguna de Castellero, es inútil utilizarlo porque no integra las variables fisicoquímicas del agua y de los sedimentos, utilizadas en la presente investigación.

1. INTRODUCTION

Continental aquatic ecosystems—both lentic and lotic—represent vital components of the biosphere, providing ecosystem goods and services that sustain biodiversity and human well-being. However, these systems are increasingly exposed to pressure from hydro-meteorological variability and anthropogenic activities such as urban expansion, dam construction, and intensive agriculture (DE DEUS & MATOS, 2024). Such disturbances can alter sedimentary, biological, and physicochemical dynamics, threatening the ecological integrity and functional stability of aquatic environments (FABRE *et al.*, 2023; MOGANE *et al.*, 2023). Eutrophication occurs when excessive inputs of nutrients, particularly phosphorus, enter continental aquatic systems such as lakes, rivers, reservoirs, and streams, as well as coastal marine zones (ESCOBER & PYTHIAS ESPINO, 2023). Under these conditions, it becomes essential to develop assessment tools capable of integrating the complexity of environmental variables into practical, comprehensible categories that facilitate the management and conservation of these ecosystems (SINGH & YADAV, 2025).

Water quality and trophic state indices have therefore become key instruments for diagnosing and communicating the ecological condition of freshwater bodies. One of the most widely used is CARLSON'S Trophic State Index (TSI; 1977), later adapted for tropical environments by TOLEDO JÚNIOR *et al.* (1983). Its popularity lies in its simplicity and reliance on measurable variables such as chlorophyll-*a*, total phosphorus, and water transparency. Nevertheless, several studies have highlighted limitations in its universal applicability, as factors like water depth, sediment resuspension, and the phosphorus-to-nitrogen ratio can significantly affect results—especially in shallow or tropical ecosystems (HUPFER & LEWANDOWSKI, 2008; ZHANG *et al.*, 2023). For this reason, the TSI was deemed unsuitable for this study of the Orinoco River and Castellero Lagoon, as it does not account for the physicochemical parameters of water and sediments analyzed here.

Según investigaciones recientes (CHEN *et al.*, 2021; FAN *et al.*, 2021; YU *et al.*, 2022; LIANG *et al.*, 2024), las concentraciones de los nutrientes, especialmente el fósforo, no solamente dependen del oxígeno disuelto en el hipolimnion, sino que también lo hacen de la mineralización de la materia orgánica, de la composición sedimentaria y de la actividad microbiana. Estos resultados resaltan la relevancia de considerar el agua y los sedimentos en la evaluación trófica, considerando los procesos internos que liberan fósforo y el impacto de las cargas externas sobre la productividad primaria. Con este contexto, se han sugerido índices más complejos y multivariados que incluyen una gama de parámetros más extensa. Un ejemplo de esto es el índice de estado trófico multivariado (MTSI, según sus siglas en inglés) desarrollado por SUMAN *et al.* (2023), que fue diseñado para identificar estados hipereutróficos en los lagos indios, utilizando tanto variables fisicoquímicas como análisis estadísticos robustos. Además, los algoritmos de aprendizaje automático y la tele-detección, por ejemplo, los desarrollados por LI *et al.* (2023a), han permitido una evaluación muy precisa del estado trófico de centenares de lagos en China; esto ha abierto nuevas oportunidades para realizar diagnósticos a gran escala tanto temporal como espacial. No obstante, pese a estos progresos, la adaptación y validación de estas herramientas en zonas tropicales de Sudamérica continúa siendo un reto; esto se debe a que la variabilidad estacional, la hidrodinámica y la heterogeneidad morfométrica son diferentes en gran medida de los modelos templados para los que fueron creadas (ESCOBER & PYTHIAS ESPINO, 2023).

Aunque los sedimentos actúan como fuentes y reservorios de nutrientes que determinan la resistencia o fragilidad de los ecosistemas ante la eutrofización (DA SILVA *et al.*, 2024), los índices tradicionales suelen concentrarse, por lo general, en la columna de agua, ignorando el valor de los procesos sedimentarios, en los cuales el fósforo puede actuar como sumidero y fuentes para la columna de agua, afectando la productividad y salud de los ecosistemas fluviales (FAN *et al.*, 2021). En lugares como la laguna de Castillero y el río Orinoco, donde se encuentran aguas lólicas y lénticas, hay una notoria variación estacional en los nutrientes y una interacción agua-sedimento muy cercana (WEIBEZAHN *et al.*, 1990; VÁSQUEZ & WILBERT, 1992); por ello, se requiere tener méto-

Recent studies (CHEN *et al.*, 2021; FAN *et al.*, 2021; YU *et al.*, 2022; LIANG *et al.*, 2024) demonstrate that nutrient concentrations—particularly phosphorus—depend not only on the availability of dissolved oxygen in the hypolimnion but also on organic matter mineralization, sediment composition, and microbial activity. These findings underscore the need to consider both water and sediment compartments when assessing trophic dynamics, as internal phosphorus release and external nutrient loading jointly influence primary productivity. In light of this, several multivariate and integrative indices have been proposed. A notable example is the Multivariate Trophic State Index (MTSI) developed by SUMAN *et al.* (2023), designed to detect hypereutrophic conditions in Indian lakes through the inclusion of physicochemical variables and robust statistical methods. Furthermore, recent advances in remote sensing and machine learning—such as those applied by LI *et al.* (2023a)—have enabled high-resolution evaluations of trophic status across hundreds of lakes in China, allowing large-scale spatial and temporal assessments. However, despite such progress, adapting and validating these models in tropical South American systems remains challenging due to the region's distinct hydrodynamics, morphometry, and pronounced seasonality, which differ substantially from the temperate environments for which most indices were designed (ESCOBER & PYTHIAS ESPINO, 2023).

Although sediments act as both sources and sinks of nutrients, thus influencing ecosystem resilience or vulnerability to eutrophication (DA SILVA *et al.*, 2024), conventional indices often focus solely on the water column, neglecting the role of sedimentary processes. In reality, phosphorus exchanges between sediments and water are critical determinants of aquatic productivity and ecological balance (FAN *et al.*, 2021). In the case of the Orinoco River and Castillero Lagoon, systems where lentic and lotic conditions coexist and where seasonal variability and water, sediment interactions are particularly strong (WEIBEZAHN *et al.*, 1990; VÁSQUEZ & WILBERT, 1992), it is crucial to employ assessment tools that capture not only

dos que tomen en cuenta no solamente el estado trófico sino también la funcionalidad ecológica de estos ecosistemas. La variación estacional y la interacción agua-sedimento en estos sitios hacen imperativo un índice que evalúe la funcionalidad ecológica para la gestión hídrica en Venezuela.

En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la funcionalidad del río Orinoco y la laguna de Castillero, identificando los procesos internos de liberación y retención de fósforo en los sedimentos, usando el índice valoración trófico-ecológico (IVT-Ecológico), incorporando variables tanto de los sedimentos como del agua. Este índice podría extrapolarse para estudios funcionales en otros cuerpos fluviales del mundo. Su fundamento teórico se apoya en el modelo de interacción entre fracciones de fósforo, condiciones redox y materia orgánica que HUPFER y LEWANDOWSKI (2008) plantearon. El uso de este índice en dos ecosistemas destacados de la cuenca media del Orinoco, que presentan diferencias hidrogeomorfológicas notables, pone de manifiesto su potencial para combinar características funcionales y ecológicas. El IVT-Ecológico, en contraste con los índices tradicionales, pretende rebasar las restricciones que surgen de la simplificación paramétrica y ofrecer una perspectiva integral acerca del estado de salud de los ecosistemas; así se convierte en un instrumento fundamental para la preservación de los recursos hídricos en áreas tropicales y para la gestión adaptativa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos ambientes contrastantes de la cuenca del medio Orinoco. El río Orinoco, un sistema lótico de gran tamaño y longitud, característico de Sudamérica, que presenta un régimen hidrológico fuertemente influenciado por los pulsos estacionales de inundación. La cuenca está compartida geopolíticamente por Venezuela y Colombia y abarca una superficie de 1.080.000 km², de los cuales Venezuela posee el 71% y Colombia el 29% (VÁSQUEZ & WILBERT, 1992). Los volúmenes de precipitaciones en la cuenca del río Orinoco y su Delta típicamente varían de 120 a 360 mm año, las temperaturas son uniformes y oscilan entre 25 hasta 28 °C (CRESSA *et al.*, 1993). Las características fisicoquímicas del agua están

trophic state but also ecological functionality. These characteristics highlight the need for integrative indices capable of supporting adaptive water management strategies in Venezuela.

In this context, the present study aimed to assess the ecological functionality of the Orinoco River and Castillero Lagoon by identifying internal processes of phosphorus release and retention within sediments through the use of the Trophic–Ecological Evaluation Index (IVT-Ecological), which integrates both sedimentary and water parameters. This index could be applied to functional assessments of other fluvial ecosystems worldwide. Its theoretical foundation is based on the model proposed by HUPFER and LEWANDOWSKI (2008), which describes the interactions among phosphorus fractions, redox conditions, and organic matter dynamics. Applying this index to two distinct ecosystems within the middle Orinoco Basin—characterized by contrasting hydrogeomorphological conditions—demonstrates its capacity to integrate ecological and functional dimensions. Unlike traditional indices, the IVT-Ecological seeks to move beyond parametric simplification, providing a more comprehensive understanding of ecosystem health. Consequently, it emerges as a powerful tool for the conservation of tropical freshwater systems and the development of adaptive management frameworks for aquatic resources.

2. MATERIALS AND METHODS

Study Area

The study was conducted in two contrasting environments in the middle Orinoco basin. The Orinoco River, is a large, extensive lotic system typical of South America, characterized by a hydrological regime strongly influenced by seasonal flood pulses. The basin, which spans approximately 1,080,000 km², is shared geopolitically between Venezuela (71%) and Colombia (29%) (VÁSQUEZ & WILBERT, 1992). Annual precipitation across the basin and its delta typically ranges from 120 to 360 mm, with uniform temperatures

asociadas con las descargas de los ríos de margen izquierdo (proveniente de los Llanos) y de los del derecho (provenientes del Escudo Guayanés). Las aguas tienen pH que van desde ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, y dependen del régimen de descarga (VÁSQUEZ & WILBERT, 1992). El lecho del Orinoco está compuesto principalmente por arenas. Los sedimentos pueden viajar como carga de fondo (partículas que están siempre en contacto con el lecho) o en suspensión (partículas sostenidas por la turbulencia). Las partículas más finas viajan siempre suspendidas por el flujo. Por otra parte, la abundancia de elementos mayoritarios viene dada principalmente por aporte geogénico (MORA *et al.*, 2017). En contraste, la laguna de Castellero, un sistema léntico que se llena y drena principalmente por inundaciones de origen pluvial. Las planicies de inundación, de la cual forma parte la laguna de Castellero, sirven como amortiguadoras de las crecientes del río y al mismo tiempo como almacenadoras de una parte de la carga de sedimentos (material fino) que se desborda sobre las márgenes y es transportado por los múltiples y pequeños caños difluentes (MORA *et al.*, 2017). Aunque ambos comparten ciertos procesos, difieren notablemente en su escala espacial y temporal (MILLIMAN & MEADE, 1983; VÁSQUEZ & WILBERTH, 1992; MÁRQUEZ & LEMUS, 2020). La laguna de Castellero, ocupa una planicie de cota inferior a los 60 m sobre el nivel del mar y un área estimada de 140 ha, está localizada (66°08'56''W y 7°38'15''N) cerca de Caicara del Orinoco (estado Bolívar) y presenta baja energía hidráulica y alta retención de sedimentos finos (MÁRQUEZ *et al.*, 2008) (Fig. 1).

Diseño de muestreo y recolección

Se seleccionaron 14 estaciones en el río Orinoco y siete en la laguna de Castellero de manera aleatoria, durante el mes de febrero (2018), en la temporada de aguas bajas. Este mes se escogió por tener la condición más estable para la medición de sedimento. En cada estación, se recolectaron muestras de agua superficial (10 L) y sedimento superficial (0-5 cm) mediante draga de acero inoxidable tipo Diez Laffont (área: 0,02 m²). Las muestras fueron transportadas en condiciones refrigeradas para su posterior análisis en el laboratorio.

between 25 and 28 °C (CRESSA *et al.*, 1993). The river's physicochemical characteristics are influenced by inputs from the left-bank tributaries (originating in the Llanos) and the right-bank tributaries (originating from the Guiana Shield). Water pH varies from slightly acidic to slightly alkaline depending on discharge conditions (VÁSQUEZ & WILBERT, 1992). The riverbed consists mainly of sand, and sediments are transported either as bedload (particles in constant contact with the riverbed) or in suspension (particles maintained by turbulence). Finer materials remain continuously suspended in the flow. The abundance of major elements in sediments is largely of geogenic origin (MORA *et al.*, 2017). In contrast, Castellero Lagoon is a lentic system that fills and drains primarily through rainfall-induced flooding. The floodplains, of which the lagoon forms part, act as natural buffers during river floods, storing a fraction of fine sediment load that overflows the banks and is redistributed through small distributary channels (MORA *et al.*, 2017). Although both systems share certain processes, they differ markedly in spatial and temporal scales (MILLIMAN & MEADE, 1983; VÁSQUEZ & WILBERTH, 1992; MÁRQUEZ & LEMUS, 2020). Castellero Lagoon lies on a floodplain below 60 m a.s.l., covering approximately 140 ha near Caicara del Orinoco (Bolívar State) (66°08'56" W, 7°38'15" N). It is characterized by low hydraulic energy and high retention of fine sediments (MÁRQUEZ *et al.*, 2008) (Fig. 1).

Sampling Design and Collection

Sampling was conducted in February 2018, during the low-water season, at 14 randomly selected stations in the Orinoco River and seven in Castellero Lagoon. This period was chosen because it provides the most stable conditions for sediment sampling. At each station, surface water samples (10 L) and surface sediments (0-5 cm) were collected using a stainless-steel Diez Laffont grab (0.02 m²). Samples were transported under refrigerated conditions for subsequent laboratory analysis.

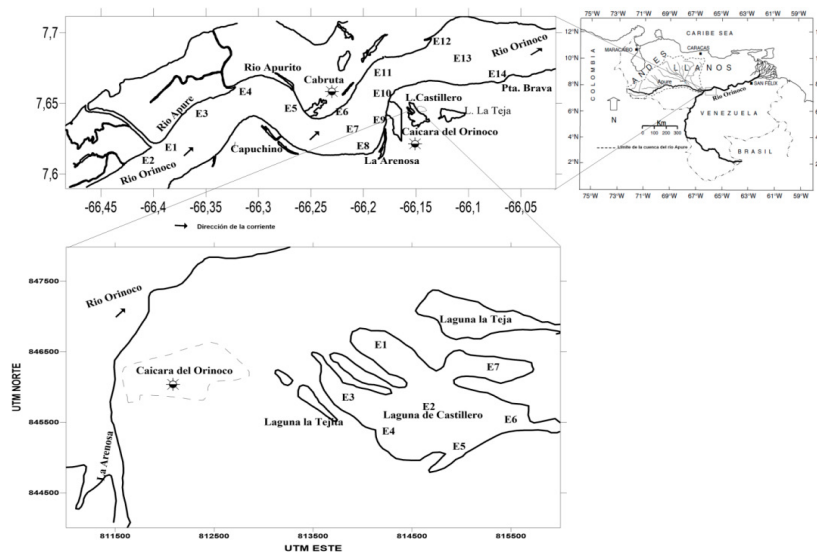


Figura 1.- Área de estudio mostrando el río Orinoco y la laguna de Castellero. Se incluye la ubicación relativa de las estaciones de muestreo (E)

Figure 1. Study area showing the Orinoco River and Castellero Lagoon. The relative location of the sampling stations (S) is included

Análisis fisicoquímico del agua

Las muestras de agua superficiales fueron transferidas a botellas de policarbonato de 1 L para las determinaciones de sólidos suspendidos (SS), nitrito, nitrato, amonio y fosfato. En el laboratorio fueron filtradas con membranas nucleopore de 0,80 μm , luego se congelaron a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ hasta los análisis. Los filtros fueron utilizados para determinar los SS. En campo se midieron el pH y oxígeno disuelto (O_2) con una sonda multiparamétrica Hidrolab modelo DataSonde 4, confirmándose después la concentración de O_2 por el método de Winkler (AMINOT & CHAUSSEPIED, 1983). Los SS se determinaron por método gravimétrico, el nitrito (NO_2^-) por BENDSCHNEIDER y ROBINSON (1952) a 543 nm de longitud de onda, nitrato (NO_3^-) por TREGUER y LE CORRE (1975) bajo los fundamentos de MULLIN y RILEY (1955), $\text{NO}_x = \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, y amonio (NH_4^+) por KOROLEFF (1976) a una longitud de onda de 640 nm. La concentración de fosfato (PO_4^{3-}) se determinó por el método colorimétrico de MURPHY y RILEY (1962) a 882 nm. Estas técnicas se detallan en STRICKLAND y PARSONS (1972) y EATON *et al.* (1995). La determinación de nitrógeno total (NT) y PT se realizó de manera simultánea siguiendo a VALDERRAMA (1981). El equipo utilizado para el análisis de los nutrientes fue un autoanalizador Technicon II AC-100 (Scientific Instruments, USA). Los límites de detección ana-

Physicochemical Analysis of Water

Surface water samples were transferred into 1 L polycarbonate bottles for the determination of suspended solids (SS), nitrite, nitrate, ammonium, and phosphate. In the laboratory, samples were filtered through 0.80 μm Nucleopore membranes and frozen at $-20\text{ }^\circ\text{C}$ until analysis. The filters were used to determine SS. Field measurements of pH and dissolved oxygen (O_2) were obtained with a Hydrolab DataSonde 4 multiparameter probe, and oxygen concentrations were verified using the Winkler titration method (AMINOT & CHAUSSEPIED, 1983). Suspended solids were measured gravimetrically; nitrite (NO_2^-) was determined according to BENDSCHNEIDER and ROBINSON (1952) at 543 nm, nitrate (NO_3^-) following TREGUER and LE CORRE (1975) based on MULLIN and RILEY (1955), and total oxidized nitrogen ($\text{NO}_x = \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$). Ammonium (NH_4^+) was determined following KOROLEFF (1976) at 640 nm. Phosphate (PO_4^{3-}) concentrations were measured colorimetrically using the MURPHY and RILEY (1962) method at 882 nm. These techniques are detailed in STRICKLAND and PARSONS (1972) and EATON *et al.* (1995). Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were determined simultaneously following VALDERRAMA (1981). All nutrient analyses were performed with a Technicon II AC-100 autoanalyzer (Scientific Instruments, USA). Analytical detection limits

líticos para las determinaciones fueron: amonio 0,10 $\mu\text{mol/L}$, nitrito 0,01 $\mu\text{mol/L}$, nitrato 0,04 $\mu\text{mol/L}$, fosfato 0,02 $\mu\text{mol/L}$. Para fósforo total por el método de Valderrama los límites fueron, 0,20% y para el nitrógeno total 4,00%.

Análisis fisicoquímico del sedimento

Se determinaron las siguientes variables: granulometría arena fina (AF), arena media (AM) y Lodos, por tamizado e hidrometría (PRIMO & CARRASCO, 1973; FOLK, 1974; ROA & BERTHOIS, 1975), materia orgánica total (MOT) por ignición a 550 °C (GONZÁLEZ & RAMÍREZ, 1995), carbono orgánico total (COT) por el método de WALKLEY y BLACK (1934), carbonatos por titulación ácido-base (VOGEL, 1989), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) por VALDERRAMA (1981) y MURPHY y RILEY (1962). El equipo utilizado para las determinaciones fue el autoanalizador Technicon II. El hierro (Fe) se hizo por extracción con ácido acético al 25 % y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica con llama de aire acetileno y corrector de fondo de deuterio en un equipo Perkin Elmer 3110 (LEWIS & LANDING, 1992). La especiación del fósforo se realizó mediante el método SEDEX (RUTTENBERG, 1992) modificado por ANDERSON y DELANEY (2000), extrayendo las fracciones: fósforo adsorbido a Fe (P-Ad+Fe), fósforo autigénico o ligado Ca (P-Ca), fósforo detrítico (P-D) y fósforo orgánico (P-O). El fósforo inorgánico (PI) fue expresado por la sumatoria de las fracciones inorgánicas y el biodisponible, como P-Ad+Fe + P-O.

Evaluación del riesgo de liberación del fósforo (IEP)

Se calculó para estimar la liberación y grado de contaminación por fósforo en determinadas zonas de los dos ecosistemas; concretamente para clasificar el nivel de contaminación en comparación entre el nivel real y el valor estándar del contaminante. Se computó a través de la Ec.1 (WANG *et al.*, 2013; BARIK *et al.*, 2019):

$$IEP = \frac{C_i}{C_s} \quad (1)$$

Donde, C_i representa la concentración de PT de la muestra i ($\mu\text{g/g}$), y C_s es la concentración estándar de PT ($\mu\text{g/g}$) que potencialmente podría causar un riesgo ecológico, establecido en 600 $\mu\text{g/g}$ (ZHANG *et al.*, 2016; BARIK *et al.*, 2019), considerando los criterios de evaluación de calidad de sedimentos

were 0.10 $\mu\text{mol/L}$ for ammonium, 0.01 $\mu\text{mol/L}$ for nitrite, 0.04 $\mu\text{mol/L}$ for nitrate, and 0.02 $\mu\text{mol/L}$ for phosphate. For the Valderrama method, detection limits were 0.20% for TP and 4.00% for TN.

Physicochemical Analysis of Sediments

Sediment parameters included fine sand (FS), medium sand (MS), and mud fractions, determined through sieving and hydrometry (PRIMO & CARRASCO, 1973; FOLK, 1974; ROA & BERTHOIS, 1975). Total organic matter (TOM) was determined by ignition at 550 °C (GONZÁLEZ & RAMÍREZ, 1995); total organic carbon (TOC) by the WALKLEY and BLACK (1934) method; carbonates by acid-base titration (VOGEL, 1989); and total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) following VALDERRAMA (1981) and MURPHY and RILEY (1962). Analyses were performed using a Technicon II autoanalyzer. Iron (Fe) was extracted with 25% acetic acid and quantified by atomic absorption spectrophotometry using a Perkin Elmer 3110 instrument (LEWIS & LANDING, 1992). Phosphorus speciation was conducted using the SEDEX method (RUTTENBERG, 1992), modified by ANDERSON and DELANEY (2000), extracting the following fractions: Fe-bound phosphorus (P-Ad + Fe), Ca-bound (authigenic) phosphorus (P-Ca), detrital phosphorus (P-D), and organic phosphorus (P-O). Inorganic phosphorus (PI) was calculated as the sum of inorganic fractions, while bioavailable phosphorus was defined as P-Ad + Fe + P-O.

Phosphorus Release Risk Index (IEP)

The phosphorus release risk index (IEP) was calculated to estimate phosphorus release potential and contamination levels within the two ecosystems, comparing measured values to established thresholds. It was computed using Equation (1) (WANG *et al.*, 2013; BARIK *et al.*, 2019):

$$IEP = \frac{C_i}{C_s} \quad (1)$$

where C_i represents the TP concentration of sample i ($\mu\text{g/g}$) and C_s is the standard TP concentration (600 $\mu\text{g/g}$) considered to pose ecological risk (ZHANG *et al.*, 2016; BARIK *et al.*, 2019), following the sediment quality criteria of

del Departamento de Medio Ambiente y Energía (DOEE), Canadá (MUDROCH & AZCUE, 1995). El criterio utilizado fue: cuando IEP > 1 hay riesgo de liberación de P desde los sedimentos.

También se utilizó el índice W (PENG *et al.*, 2019), el cual considera las condiciones ácidas o alcalinas de las aguas, y se calculó utilizando la Ec. (2):

$$W = \frac{P-Ad+P-Fe}{P-Ca+P-D_s} \quad (2)$$

El criterio de interpretación de este índice es, cuando W > 0,50 el sedimento tiene una gran cantidad de fósforo liberable y poca capacidad de retención estable a largo plazo. Cuando W < 0,50 el sedimento actúa como un sumidero estable de fósforo y hay bajo riesgo de liberación de P.

Índice de vulnerabilidad trófica ecológica (IVT-Ecológica)

En este trabajo se desarrolló el índice de vulnerabilidad trófica ecológica (IVT-Ecológica) como un indicador adimensional y semicuantitativo que combina fracciones estabilizadoras (denominador) y móviles de fósforo en los sedimentos, con variables de la columna de agua (numerador), lo que facilita el análisis del potencial para acumular o exportar nutrientes, especialmente el fósforo. Se creó de acuerdo con los lineamientos propuestos por HUPFER y LEWANDOWSKI (2008), y se clasificó al emplear criterios funcionales y calibración empírica en el Orinoco y la laguna de Castillero, en cuatro niveles: < 0,1 (exportador de fósforo), entre 0,1-1,0 (transicional), entre 1,0-5,0 (retentivo con capacidad de reciclaje interno) y >5,0 (sumidero vulnerable a eventos de eutrofización). Los rangos fueron creados con el objetivo de distinguir entre sistemas estables, transicionales y muy vulnerables, siguiendo la lógica de índices semejantes en calidad de agua y limnología. Esta propuesta, que puede ser comparada con los índices tróficos tradicionales (CARLSON, 1977; REDDY *et al.*, 1999; SØNDERGAARD *et al.*, 2003), es una herramienta integradora de los parámetros fisicoquímicos y geoquímicos del sedimento, para la evaluación de los peligros de eutrofización interna en ecosistemas acuáticos. El índice se determinó a través de Ec. 3:

the Canadian Department of Environment and Energy (DOEE) (MUDROCH & AZCUE, 1995). An IEP > 1 indicates a potential risk of phosphorus release from sediments.

The W index (PENG *et al.*, 2019) was also applied to account for acidic or alkaline conditions, calculated as follows in Eq. (2):

$$W = \frac{P-Ad+P-Fe}{P-Ca+P-D_s} \quad (2)$$

Values of W > 0.50 indicate sediments with a high proportion of labile phosphorus and low long-term retention capacity, whereas W < 0.50 indicates stable phosphorus sinks with low release risk.

Ecological Trophic Vulnerability Index (IVT-Ecological)

The Ecological Trophic Vulnerability Index (IVT-Ecological) was developed as a dimensionless, semi-quantitative indicator that integrates stabilizing (denominator) and mobile (numerator) phosphorus fractions in sediments with water-column variables, allowing evaluation of nutrient accumulation or export potential, particularly for phosphorus. Based on HUPFER and LEWANDOWSKI (2008), the index was empirically calibrated using data from the Orinoco River and Castillero Lagoon and classified into four functional levels: < 0.1 (phosphorus-exporting system), 0.1–1.0 (transitional system), 1.0–5.0 (retentive system with internal recycling capacity), and > 5.0 (phosphorus sink vulnerable to eutrophication events). The classification ranges were established to distinguish between stable, transitional, and highly vulnerable systems, following the rationale of similar indices used in water quality and limnological assessments. This approach, which can be compared with traditional trophic indices (CARLSON, 1977; REDDY *et al.*, 1999; SØNDERGAARD *et al.*, 2003), represents an integrative tool that combines physicochemical and geochemical parameters of sediments for the evaluation of internal eutrophication risks in aquatic ecosystems. The index was calculated according to Eq. 3:

$$IVT = \frac{(PBD+PO+P-Ad+Fe)}{(Fe\ total+CaCO_3)} * \frac{(MO+Lodos+PO_4^{3-}+NO_x+NH_4+)}{(pH \times 0.2 \times (1 + \frac{SS}{100}))} \quad (3)$$

Donde, PBD: fósforo biodisponible en el sedimento ($\mu\text{g/g}$); PO: fósforo orgánico en los sedimentos; P-Ad+Fe: fósforo absorbido en óxidos de hierro; Fe: hierro en el sedimento; CaCO_3 : porcentaje de carbonatos totales hallados en el sedimento; MOT: porcentaje de materia orgánica en el sedimento; Lodos: fracción fina en el sedimento; PO_4^{3-} : fósforo reactivo presente en el agua; NO_x : NH_4^+ : especies oxidadas y reducida de nitrógeno; pH: potencial de hidrógeno del agua; O_2 : oxígeno disuelto en el agua; SS: sólidos en suspensión en el agua.

Análisis estadístico

Se normalizaron los datos (z-score) y se llevaron a cabo análisis multivariantes: análisis de componentes principales (ACP) para determinar relaciones entre las variables, a partir de la matriz de correlación múltiple y para clasificar las áreas críticas de acumulación, movilización o estabilidad del fósforo (JOLLIFFE & CADIMA, 2016); MDS (escalamiento multidimensional) y ANOSIM (análisis de similitudes) que empleó 9999 permutaciones para analizar la disimilitud entre ecosistemas y, SIMPER (análisis de porcentajes de similitud) para identificar las variables que contribuyen en mayor medida a la distinción de los dos ecosistemas (CLARKE & WARWICK, 2001). Se determinó la existencia de diferencias estadísticas los parámetros fisicoquímicos del agua y del sedimento, mediante prueba de Kruskal-Wallis a $p < 0,05$. Los análisis se hicieron con los programas STRATGRAPHICS Centurion, XLStat, acoplado con Excel, y PAST 4.7.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de los parámetros fisicoquímicos del agua

Los resultados del análisis de Kruskal-Wallis revelaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en todos los parámetros fisicoquímicos del agua del río Orinoco, excepto en el amonio (NH_4^+ ; $p = 0,18$), mientras en la laguna de Castellero solo sólidos suspendidos (SS; $p = 0,04$), oxígeno disuelto (O_2 ; $p = 0,04$), nitrógeno total (NT; $p = 0,04$), y fosforo total (PT; $p = 0,04$) tuvieron diferencias estadísticas, indicando heterogeneidad espacial y funcional entre ambos sistemas (Tabla 1)

Where PBD: bioavailable phosphorus in sediments ($\mu\text{g/g}$); PO: organic phosphorus in sediments; P-Ad+Fe: phosphorus adsorbed onto iron oxides; Fe: total iron in sediments; CaCO_3 : percentage of total carbonates in sediments; OM: percentage of organic matter in sediments; Mud: fine sediment fraction; PO_4^{3-} : reactive phosphorus in water; NO_x : NH_4^+ : oxidized and reduced nitrogen species; pH: hydrogen ion potential of water; O_2 : dissolved oxygen in water; and SS: suspended solids in water.

Statistical Analyses

All data were normalized (z-score), and multivariate analyses were performed, including Principal Component Analysis (PCA) to identify relationships among variables and classify critical zones of phosphorus accumulation, mobilization, or stability (JOLLIFFE & CADIMA, 2016). Non-metric Multidimensional Scaling (MDS) and Analysis of Similarities (ANOSIM) using 9999 permutations were conducted to assess ecosystem dissimilarity, while Similarity Percentage Analysis (SIMPER) was applied to determine the variables contributing most to the distinction between ecosystems (CLARKE & WARWICK, 2001). Differences in physicochemical parameters of water and sediments were tested using the Kruskal-Wallis test at $p < 0.05$. Statistical analyses were performed with STRATGRAPHICS Centurion, XLStat (integrated with Excel), and PAST v4.7.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Dynamics of Physicochemical Parameters in Water

The Kruskal-Wallis analysis revealed significant differences ($p < 0.05$) in all physicochemical parameters of the Orinoco River water, except for ammonium (NH_4^+ ; $p = 0.18$). In contrast, in Castellero Lagoon, significant differences were detected only in suspended solids (SS; $p = 0.04$), dissolved oxygen (O_2 ; $p = 0.04$), total nitrogen (TN; $p = 0.04$), and total phosphorus (TP; $p = 0.04$), indicating pronounced spatial and functional heterogeneity between both systems (Table 1).

Tabla 1.- Valores de p obtenidos en el K. Wallis ($p < 0,05$) aplicado a los parámetros fisicoquímicos del agua y sedimentos, en las diferentes estaciones de muestreo del río Orinoco y la laguna de Castellero

Table 1. p values obtained in K. Wallis ($p < 0.05$) applied to the physicochemical parameters of water and sediments at different sampling stations on the Orinoco River and Castellero Lagoon

Variable	R. Orinoco		L. castillero		
	F	p	F	p	
Agua	SS	26,89	0,01	12,80	0,04
	O ₂	26,56	0,01	12,43	0,05
	pH	26,34	0,02	12,61	0,04
	Nox	26,80	0,01	12,23	0,06
	NH ₄ ⁺	17,49	0,18	4,93	0,55
	NT	26,90	0,01	12,63	0,04
	PO ₄ ³⁻	26,59	0,01	12,06	0,06
	PT	26,67	0,01	12,62	0,04
	AF	27,70	0,01	11,93	0,06
	AM	26,61	0,01	9,95	0,13
Sedimento	Lodos	26,57	0,01	10,61	0,10
	MOT	15,18	0,29	11,14	0,08
	COT	15,18	0,30	10,40	0,11
	CaCO ₃	17,73	0,17	12,45	0,05
	NT	15,63	0,27	6,80	0,34
	Fe	26,90	0,01	10,74	0,10
	P-Ad+Fe	10,59	0,65	11,94	0,06
	P-Ca	13,27	0,43	11,94	0,06
	P-D	17,40	0,18	11,71	0,07
	P-O	10,43	0,66	11,14	0,08
PT	19,57	0,11	11,77	0,07	
PI	27,00	0,01	11,71	0,07	
PBD	27,00	0,01	11,14	0,08	

En el río Orinoco, la concentración media de sólidos suspendidos fue más elevada ($\bar{x} = 62,45 \pm 59,89$ mg/L) y tuvo una variabilidad extensa (entre 30,84 - 203,5 mg/L). Esto es característico de sistemas lóticos con un caudal elevado y una intensa dinámica sedimentaria, en los que la escorrentía arrastra partículas y el lecho se remueve a menudo (LEWIS *et al.*, 1990b; LEWIS *et al.*, 2020). Por el contrario, la laguna de Castellero presentó una media más baja ($34,99 \pm 1,35$ mg/L) y una gama más reducida, lo que es típico de cuerpos lénticos con menos resuspensión y más sedimentación (LEWIS *et al.*, 1990a). En ambos sistemas, las concentraciones promedio de oxígeno disuelto y de pH son apropiadas en términos de oxigenación ($7,53 \pm 0,58$ mg/L en el río y $7,06 \pm 0,10$ mg/L en la laguna) lo cual señala condiciones relativamente aeróbicas. No obstante, el río presenta un valor algo más alto, lo cual es consistente con

In the Orinoco River, the mean concentration of suspended solids ($\bar{x} = 62.45 \pm 59.89$ mg/L) was higher and exhibited broad variability (30.84–203.5 mg/L). Such variability is typical of high-energy lotic environments with substantial sediment transport and frequent bed disturbance (LEWIS *et al.*, 1990b; LEWIS *et al.*, 2020). Conversely, Castellero Lagoon exhibited lower and more stable SS concentrations (34.99 ± 1.35 mg/L), characteristic of lentic systems with minimal resuspension and greater sedimentation (LEWIS *et al.*, 1990a). In both systems, the mean dissolved oxygen and pH values indicate well-oxygenated, aerobic conditions (7.53 ± 0.58 mg/L in the Orinoco and 7.06 ± 0.10 mg/L in the lagoon). The slightly higher oxygen concentration in the river is consistent with its greater

su turbulencia superior. En los dos casos, el pH es neutro o ligeramente alcalino ($7,23 \pm 0,21$ y $7,27 \pm 0,52$, respectivamente), lo cual favorece la estabilidad de las formas fosfatadas y del nitrógeno en sus especies predominantes; sin embargo, cambios menores podrían afectar la precipitación de fósforo con hierro o calcio (LEWIS *et al.*, 1990a, b; REDDY & DELAUNE, 2008; LIU *et al.*, 2024) (Tabla 2).

turbulence. In both cases, pH values were neutral to slightly alkaline (7.23 ± 0.21 and 7.27 ± 0.52 , respectively), favoring the stability of phosphate and nitrogen species. However, small variations could alter phosphorus precipitation through interactions with iron or calcium (LEWIS *et al.*, 1990a, b; REDDY & DELAUNE, 2008; LIU *et al.*, 2024) (Table 2).

Tabla 2.- Valores de oxígeno disuelto (O_2 , mg/L), pH, sólidos suspendidos (SS, mg/L), especies oxidadas del nitrógeno (NOx, $\mu\text{mol/L}$), nitrógeno total (NT, $\mu\text{mol/L}$); fosfato (PO_4^{3-} , $\mu\text{mol/L}$), fósforo total (PT, $\mu\text{mol/L}$) y relación N/P el agua del río Orinoco y de la laguna de Castellero durante el periodo de estudio (Min= mínimo, Max= máximo, \bar{x} = media, DS= desviación estándar.

Table 2. Values of dissolved oxygen (O_2 , mg/L), pH, suspended solids (SS, mg/L), oxidized nitrogen species (NOx, $\mu\text{mol/L}$), total nitrogen (NT, $\mu\text{mol/L}$); phosphate (PO_4^{3-} , $\mu\text{mol/L}$), total phosphorus (PT, $\mu\text{mol/L}$), and N/P ratio in the water of the Orinoco River and Castellero Lagoon during the period of study (Min = minimum, Max = maximum, \bar{x} = mean, SD = standard deviation)

	E	SS	O_2	pH	Nox	NH_4^+	NT	PO_4^{3-}	PT	N/P
	1	203,50	6,46	7,46	18,69	0,04	46,69	1,75	3,18	14,68
	2	51,16	7,41	7,41	18,00	0,08	43,56	1,43	2,12	20,55
	3	202,67	7,03	7,03	19,01	0,11	45,32	1,38	1,58	28,68
	4	46,00	8,21	7,76	18,23	0,08	40,18	1,37	2,57	15,63
	5	35,50	7,32	7,39	17,21	0,07	32,26	1,32	1,91	16,89
	6	48,33	7,24	7,25	17,23	0,06	30,03	1,68	1,98	15,17
R.Orinoco	7	42,33	7,23	7,13	17,26	0,05	21,12	1,38	1,36	15,53
	8	32,17	7,34	7,15	17,26	0,05	23,62	1,18	0,99	23,86
	9	37,16	7,10	7,24	16,14	0,05	19,26	1,10	0,96	20,06
	10	33,34	7,22	7,24	17,32	0,05	26,42	0,56	1,01	26,16
	11	30,84	8,18	7,08	14,21	0,03	26,34	0,37	0,95	27,73
	12	35,33	8,34	7,01	12,36	0,05	20,03	0,56	1,55	12,92
	13	36,50	8,16	7,01	13,26	0,05	18,19	0,87	1,39	13,09
	14	39,50	8,22	7,07	14,65	0,04	23,36	0,36	1,54	15,17
Min		30,84	6,46	7,01	12,36	0,03	18,19	0,36	0,95	12,92
Max		203,50	8,34	7,76	19,01	0,11	46,69	1,75	3,18	28,68
\bar{x}		62,45	7,53	7,23	16,49	0,06	29,74	1,09	1,65	19,01
DS		59,89	0,58	0,21	2,07	0,02	10,19	0,47	0,65	5,52
	E	SS	O_2	pH	Nox	NH_4^+	NT	PO_4^{3-}	PT	N/P
	1	37,16	6,98	6,46	14,11	0,10	18,69	0,56	0,84	22,25
	2	33,26	6,93	7,41	14,26	0,11	18,00	0,55	0,80	22,50
	3	35,20	7,20	7,03	14,13	0,09	19,01	0,50	2,14	8,88
L.Castillero	4	34,13	7,10	8,21	14,38	0,09	18,23	0,48	1,24	14,70
	5	35,00	7,12	7,32	14,26	0,08	17,21	0,60	0,90	19,12
	6	36,20	7,13	7,24	14,11	0,09	17,23	0,53	0,62	27,79
	7	34,00	6,97	7,23	14,56	0,10	17,26	0,51	0,78	22,13
Min		33,26	6,93	6,46	14,11	0,08	17,21	0,48	0,62	8,88
Max		37,16	7,20	8,21	14,56	0,11	19,01	0,60	2,14	27,79
\bar{x}		34,99	7,06	7,27	14,26	0,09	17,95	0,53	1,05	19,63
DS		1,35	0,10	0,52	0,17	0,01	0,74	0,04	0,52	6,16

Respecto al nitrógeno, para el río Orinoco las concentraciones fueron más elevadas en las especies oxidadas (NOx: $16,49 \pm 2,07 \mu\text{mol/L}$) y de NT= ($29,74 \pm 10,19 \mu\text{mol/L}$), lo que indicó un mayor suministro de nitrógeno que proviene de fuentes difusas como la escorrentía urbana o agrícola, y una oxigenación más adecuada que favorece la nitrificación (NEILL *et al.*, 2001; BUSTAMANTE *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2025). Por el contrario, la laguna tiene concentraciones más altas de amonio (NH_4^+ : $0,09 \pm 0,01 \mu\text{mol/L}$), aunque presenta niveles inferiores de NT y NOx. Esto señala las condiciones locales de mineralización de materia orgánica y descomposición anaerobia (LEWIS *et al.*, 1990a). Los valores medios de fosfato (PO_4^{3-}) y fósforo total (PT) (PT: $1,65 \pm 0,65 \mu\text{mol/L}$; PO_4^{3-} : $1,09 \pm 0,47 \mu\text{mol/L}$) fueron mayor en comparación con la laguna (PT: $1,05 \pm 0,52 \mu\text{mol/L}$; PO_4^{3-} : $0,53 \pm 0,04 \mu\text{mol/L}$), lo que sugiere una menor eficacia en la retención sedimentaria o una carga exterior más alta.

El fósforo total (PT) tuvo correlación positiva ($r > 0,90$; $p < 0,05$) con los sólidos suspendidos, lo que demuestra que se transporta, sobre todo, adherido a partículas pequeñas; este es un patrón típico en ríos con influencia alóctona significativa (SAVENKO & SAVENKO, 2022). Se calcula que aproximadamente el 90% del fósforo transportado por los ríos a las zonas costeras y estuarios se desplaza adherido con minerales, como Fe, Mn, Al, Ca y C; también con sedimentos y fuentes terrígenas, como la apatita y las fosforitas (SUTULA *et al.*, 2004; LI *et al.*, 2023b). Los resultados muestran que los compuestos reactivos inorgánicos solubles de nitrógeno y fósforo han aumentado en las aguas del Orinoco desde la década de los años 90 hasta el presente, sobre todo la concentración de fosfato, la cual se ha quintuplicado en comparación con los valores reportado por LEWIS *et al.* (1990a, b). La correlación entre PO_4^{3-} y PT indicó que una parte importante del fósforo en el sistema fluvial del Orinoco se encuentra en formas lábiles o biodisponibles.

Respecto a la relación molar N: P, en los dos sistemas se acerca a 19, que es un número más alto que el límite estándar de Redfield (16:1), lo cual indica una posible restricción por fósforo para el fitoplancton (REDFIELD *et al.*, 1963; GUILDFORD & HECKY, 2000; ZHANG *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2025). No obstante, la semejanza de este vínculo entre el río y la laguna indica que las fuentes externas de N y P podrían estar en un equilibrio relativo (Tabla 2).

Regarding nitrogen, the Orinoco River exhibited higher concentrations of oxidized nitrogen species (NOx: $16.49 \pm 2.07 \mu\text{mol/L}$; TN: $29.74 \pm 10.19 \mu\text{mol/L}$), suggesting stronger nitrogen inputs from diffuse sources such as urban or agricultural runoff, as well as higher oxygen availability conducive to nitrification (NEILL *et al.*, 2001; BUSTAMANTE *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2025). Conversely, Castillero Lagoon contained higher ammonium concentrations (NH_4^+ : $0.09 \pm 0.01 \mu\text{mol/L}$) but lower TN and NOx values, reflecting local mineralization and anaerobic decomposition processes (LEWIS *et al.*, 1990a). Mean phosphate (PO_4^{3-}) and total phosphorus (TP) concentrations were greater in the Orinoco River (TP: $1.65 \pm 0.65 \mu\text{mol/L}$; PO_4^{3-} : $1.09 \pm 0.47 \mu\text{mol/L}$) than in the lagoon (TP: $1.05 \pm 0.52 \mu\text{mol/L}$; PO_4^{3-} : $0.53 \pm 0.04 \mu\text{mol/L}$), implying reduced sediment retention efficiency or higher external nutrient loading.

Total phosphorus was strongly and positively correlated ($r > 0.90$; $p < 0.05$) with suspended solids, indicating that phosphorus is primarily transported bound to fine particulate matter—a common pattern in rivers with substantial allochthonous inputs (SAVENKO & SAVENKO, 2022). Approximately 90% of riverine phosphorus transport to coastal and estuarine zones occurs in association with minerals (Fe, Mn, Al, Ca, C) or terrigenous particles such as apatite and phosphorite (SUTULA *et al.*, 2004; LI *et al.*, 2023b). The data show that concentrations of reactive inorganic nitrogen and phosphorus have increased in the Orinoco since the 1990s, particularly phosphate, whose current levels are nearly five times higher than those reported by LEWIS *et al.* (1990a, b). The correlation between PO_4^{3-} and TP suggests that a significant portion of phosphorus in the Orinoco occurs in bioavailable or labile forms. The N:P molar ratio in both systems is approximately 19, exceeding the Redfield ratio (16:1), suggesting potential phosphorus limitation for phytoplankton (REDFIELD *et al.*, 1963; GUILDFORD & HECKY, 2000; ZHANG *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2025). Nevertheless, the similarity of this ratio between the river and the lagoon indicates that external nitrogen and phosphorus sources may be relatively balanced (Table 2).

Los resultados fisicoquímicos del agua del Orinoco y la laguna de Castellero concuerdan en gran medida con patrones descritos para ríos y lagunas tropicales. En el Orinoco, el predominio de fósforo total y sólidos suspendidos coincide con lo indicado por SAVENKO y SAVENKO (2022) y LI *et al.* (2023b), quienes señalan que el fósforo en los ríos del mundo se transporta principalmente en forma particulada, superando ampliamente la fracción disuelta. Esta similitud refleja la naturaleza lótica de alta energía, donde la resuspensión controla el flujo de fósforo y nitrógeno. De igual forma, WALCH *et al.* (2022) destacaron que las partículas en suspensión actúan como biorreactores microbianos móviles, modulando la retención y liberación de nutrientes, especialmente de P; lo cual explica el acoplamiento observado entre los sólidos suspendidos y el PT en el Orinoco.

Sin embargo, se detectan diferencias notables respecto a sistemas fuertemente impactados antropogénicamente de Asia o Europa, donde el fósforo disuelto representa una fracción mayor por aporte agrícola o urbano (SAVENKO & SAVENKO, 2022). En el presente estudio, la baja concentración de P soluble indica un sistema menos perturbado y con predominio de fuentes naturales, lo que refuerza su carácter exportador estable. En cambio, la laguna de Castellero muestra un perfil semejante al de lagunas tropicales de Indonesia o Brasil, donde el confinamiento y la alta concentración de MOT incrementan el reciclaje endógeno (LIANG *et al.*, 2024; MOGANE *et al.*, 2023).

Variabilidad de los parámetros fisicoquímicos del sedimento

El análisis de Kruskal–Wallis mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las estaciones en granulometría (AF, AM, y lodos), hierro (Fe), fósforo inorgánico total (PI) y fósforo biodisponible (PBD), mientras que la laguna de Castellero solo en arena fina (AF), lo cual reverá una mayor homogeneidad en los sedimentos de la laguna, causado por el mayor tiempo de retención de las aguas y menor turbulencia, en comparación con el Orinoco. En el río Orinoco, los sedimentos más gruesos (AF: $45,43 \pm 30,54\%$ y AM: $23,93 \pm 16,83\%$) fueron predominantes, mientras que en la laguna se observó una proporción más alta de lodos ($47 \pm 15\%$). Esto muestra que el río tiene una energía hidrodinámica más alta y que la función de decantación es propia del ecosistema léntico. Es importante señalar que los se-

Overall, the physicochemical characteristics of the Orinoco River and Castellero Lagoon align with general patterns for tropical aquatic systems. In the Orinoco, the predominance of particulate phosphorus and suspended solids agrees with observations by SAVENKO and SAVENKO (2022) and LI *et al.* (2023b), who reported that particulate phosphorus dominates riverine transport globally. This reflects the high-energy, lotic dynamics of the Orinoco, where resuspension governs nutrient fluxes. WALCH *et al.* (2022) further highlighted that suspended particles act as mobile microbial bioreactors, mediating nutrient retention and release—particularly of phosphorus—which explains the strong coupling between SS and TP observed in the river.

In contrast, the Orinoco differs from heavily impacted systems in Asia and Europe, where dissolved phosphorus constitutes a larger fraction due to agricultural and urban inputs (SAVENKO & SAVENKO, 2022). Here, the low concentrations of soluble phosphorus indicate a less disturbed system dominated by natural sources, reinforcing its classification as a stable, phosphorus-exporting environment. Castellero Lagoon, on the other hand, resembles tropical lagoons in Indonesia and Brazil, where confinement and high organic matter content enhance internal phosphorus recycling (LIANG *et al.*, 2024; MOGANE *et al.*, 2023).

Variability of Physicochemical Parameters in Sediments

The Kruskal–Wallis analysis showed significant spatial differences ($p < 0.05$) in granulometry (fine and medium sand, mud), iron (Fe), total inorganic phosphorus (IP), and bioavailable phosphorus (BAP) in the Orinoco River. In contrast, Castellero Lagoon showed significant variation only in fine sand, suggesting greater sediment homogeneity resulting from longer water residence time and lower hydrodynamic activity. In the Orinoco River, coarser sediments predominated (fine sand: $45.43 \pm 30.54\%$; medium sand: $23.93 \pm 16.83\%$), whereas the lagoon contained higher proportions of mud ($47 \pm 15\%$), consistent with its lentic characteristics and sedimentation-dominated processes. Fine sediments, such

dimentos finos, por ejemplo, los lodos, tienen una capacidad más alta para adsorber fósforo debido a su gran superficie específica y también a su mayor cantidad de óxidos de Al y Fe y de materia orgánica (CORMAN, 2025). Los valores de carbono orgánico total (COT) y materia orgánica total (MOT) fueron superiores en la laguna con respecto al río (MOT: $4,36 \pm 1,42$ %; COT: $1,29 \pm 0,25$ %); esto se debe a que las condiciones más reductoras y la velocidad de flujo más baja propician la acumulación de detritos (LIANG *et al.*, 2024; WU *et al.*, 2025) (Tablas 3 y 4). No se detectó contaminación por materia orgánica, debido a que las cifras fueron inferiores al 20 % (PÁEZ-OSUNA *et al.*, 1984).

Los carbonatos (CaCO_3^{2-}) mostraron una concentración más alta en la laguna ($4,04 \pm 3,01$ %), lo cual podría hacer que el fósforo precipite como fosfato de calcio, sobre todo cuando el pH es neutro o ligeramente alcalino (TONELLO *et al.*, 2020; ZHENG *et al.*, 2022) (Tablas 3 y 4).

El río y la laguna tienen concentraciones parecidas de NT ($506 \pm 230,75 \mu\text{g/g}$ y $535 \pm 96,32 \mu\text{g/g}$, respectivamente) y una relación C/N alta ($27,47 \pm 22,71$ y $28,59 \pm 5,06$, respectivamente). Esto señala que la materia orgánica proviene, en su mayoría, de fuentes externas y tiene un alto contenido de carbono (MEYERS, 1994; RAMASWAMY *et al.*, 2008; MORA *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2021). El contenido de hierro (Fe) en el Orinoco ($811 \mu\text{g/g}$) es significativamente más elevado, lo que indica alta habilidad de retener fósforo en forma de complejos Fe-P (PAd+Fe). No obstante, en los dos sistemas la concentración de PAd+Fe es casi equivalente (cerca de $4,8 \mu\text{g/g}$). De acuerdo con WANG *et al.* (2019), esta singularidad aparente podría explicarse por el hecho de que las formas férricas no reactivas sean predominantes o por la saturación de los sitios de adsorción, lo cual restringiría la habilidad para retener fósforo, a pesar de que Fe sea abundante.

Comparativamente con otros estudios; respecto al sedimento, la mayor proporción de lodos, MOT y carbonatos en la laguna coincide con lo señalado por TU *et al.* (2022), quienes afirman que los sedimentos finos con alto contenido orgánico acumulan fósforo reactivo susceptible de liberación bajo condiciones reductoras. En sistemas comparables del sudeste asiático, se ha observado que la combinación de textura fina, materia orgánica y baja oxigenación aumenta la fracción de fósforo orgánico y detrítico (FAN *et al.*, 2021; ZHUO *et al.*, 2023).

as mud, have greater phosphorus adsorption capacity due to their large surface area and higher contents of Al and Fe oxides, as well as organic matter (CORMAN, 2025). Total organic matter (TOM) and total organic carbon (TOC) were higher in the lagoon (TOM: $4.36 \pm 1.42\%$; TOC: $1.29 \pm 0.25\%$) than in the river, reflecting more reducing conditions and slower flow that favor detritus accumulation (LIANG *et al.*, 2024; WU *et al.*, 2025) (Tables 3 and 4). Organic contamination was not detected, as values remained below 20% (PÁEZ-OSUNA *et al.*, 1984).

Carbonate (CaCO_3^{2-}) concentrations were higher in the lagoon ($4.04 \pm 3.01\%$), favoring phosphorus precipitation as calcium phosphate, particularly under neutral to slightly alkaline conditions (TONELLO *et al.*, 2020; ZHENG *et al.*, 2022) (Tables 3 and 4).

Both systems displayed similar total nitrogen concentrations ($506 \pm 230.75 \mu\text{g/g}$ in the Orinoco and $535 \pm 96.32 \mu\text{g/g}$ in the lagoon) and high C/N ratios (27.47 ± 22.71 and 28.59 ± 5.06 , respectively), indicating predominantly allochthonous, carbon-rich organic matter (MEYERS, 1994; RAMASWAMY *et al.*, 2008; MORA *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2021). Iron (Fe) concentrations were markedly higher in the Orinoco ($811 \mu\text{g/g}$), suggesting a strong potential for phosphorus retention via Fe-P complexes (P-Ad+Fe). However, P-Ad+Fe concentrations were similar in both systems ($\sim 4.8 \mu\text{g/g}$). According to WANG *et al.* (2019), this apparent inconsistency may result from a predominance of non-reactive ferric forms or the saturation of adsorption sites, limiting phosphorus retention despite high Fe availability.

The higher proportions of mud, organic matter, and carbonates in the lagoon agree with TU *et al.* (2022), who noted that fine, organic-rich sediments tend to accumulate reactive phosphorus, which can be released under reducing conditions. Similar trends have been observed in tropical and subtropical systems in Southeast Asia, where fine texture, high organic content, and low oxygen enhance the organic and detrital phosphorus fractions (FAN *et al.*, 2021; ZHUO *et al.*, 2023). This functional similarity suggests that Castillero Lagoon behaves like other tropical lentic systems, acting as a phosphorus reservoir

Esta coincidencia confirma la similitud funcional entre la laguna de Castellero y otros cuerpos lénticos tropicales: ambos actúan como reservorios de fósforo y liberan parte de él durante períodos de anoxia o sobrecarga orgánica.

Por el contrario, los sedimentos del Orinoco, ricos en Fe y con textura gruesa, se asemejan a los descritos en ríos tropicales de África y la India, donde la fracción Fe-P domina la retención geoquímica (WANG *et al.*, 2019). No obstante, la diferencia observada de concentraciones de Fe altas, pero P-Ad+Fe moderado, concuerda con KRAAL *et al.* (2015), quienes sostienen que la saturación de los sitios de adsorción o la cristalización de óxidos reduce la reactividad del fósforo férrico, y que los sedimentos reductores presentan una débil adsorción de P, y que el P asociado al Fe es una fase importante de enterramiento de P bajo todos los regímenes redox. En estas condiciones el fósforo es retenido de forma irregular en la profundidad del sedimento debido a la supresión de la precipitación de minerales de fosfato cálcico. En consecuencia, el Orinoco exhibe una capacidad de retención limitada, pese a su alto contenido férrico total, lo que explica su rol como sistema exportador.

Especiación de fósforo en el sedimento

El análisis de Kruskal–Wallis para el río Orinoco mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en las distintas fracciones de fósforo entre las estaciones, solo para el fósforo inorgánico total (PI) y para el biodisponible (PBD), mientras que en la laguna no se apreciaron en ninguna de las formas del P (Tabla 1). La concentración fósforo detrítico (P-D) se encontró en la laguna ($154,25 \pm 61,75 \mu\text{g/g}$) en niveles más altos que en el río ($79,11 \pm 65,56 \mu\text{g/g}$) y está asociado con fracciones mineralizadas o unidas a estructuras poco lábiles (WANG *et al.*, 2019; FAN *et al.*, 2021). Igualmente, se observó mayor contenido de fósforo orgánico (P-O) en la laguna ($70,82 \pm 16,22 \mu\text{g/g}$) frente a $17,27 \pm 7,76 \mu\text{g/g}$ en el río, lo que indica acumulación de residuos orgánicos y mineralización reducida (LIANG *et al.*, 2024). En la laguna, por su parte, el fósforo autigénico (P-Ca) mostró cifras algo más elevadas debido a mayor presencia de carbonatos (DAN *et al.*, 2020; WAN *et al.*, 2020). En cuanto a los niveles de PT, en el río se observaron niveles de fósforo total (PT: $104,35 \pm 72,77 \mu\text{g/g}$) e inorgánico (PI: $87,08 \pm 67,47 \mu\text{g/g}$) más bajos, lo que señala una carga global menos elevada, con menos fósforo biodisponible ($22,05$

that releases part of its load during anoxic or organic enrichment events.

Conversely, the Fe-rich, coarse sediments of the Orinoco resemble those described in tropical rivers of Africa and India, where Fe–P fractions dominate phosphorus retention (WANG *et al.*, 2019). However, the observed pattern of high Fe content but moderate P-Ad+Fe concentrations is consistent with KRAAL *et al.* (2015), who noted that adsorption-site saturation or oxide crystallization reduces ferric phosphorus reactivity. Under reducing conditions, P adsorption weakens, and Fe-bound phosphorus becomes an important burial phase across redox regimes. In such cases, phosphorus retention is irregular within sediment depths due to suppressed calcium phosphate mineral formation. Consequently, despite its high total Fe content, the Orinoco exhibits limited phosphorus retention capacity, reinforcing its role as a phosphorus-exporting system.

Phosphorus Speciation in Sediments

The Kruskal–Wallis analysis for the Orinoco River revealed significant differences ($p < 0.05$) among stations for total inorganic phosphorus (PI) and bioavailable phosphorus (PBD), whereas no significant variation was detected for any phosphorus fractions in the lagoon (Table 1). The concentration of detrital phosphorus (P–D) was higher in the lagoon ($154.25 \pm 61.75 \mu\text{g/g}$) than in the river ($79.11 \pm 65.56 \mu\text{g/g}$), associated with mineralized or poorly labile fractions (WANG *et al.*, 2019; FAN *et al.*, 2021). Similarly, organic phosphorus (P–O) was more abundant in the lagoon ($70.82 \pm 16.22 \mu\text{g/g}$) compared to the river ($17.27 \pm 7.76 \mu\text{g/g}$), indicating greater accumulation of organic residues and limited mineralization (LIANG *et al.*, 2024). Authigenic phosphorus (P–Ca) in the lagoon was also slightly higher, consistent with increased carbonate presence (DAN *et al.*, 2020; WAN *et al.*, 2020). Total phosphorus (PT) and inorganic phosphorus (PI) levels were lower in the river (PT: $104.35 \pm 72.77 \mu\text{g/g}$; PI: $87.08 \pm 67.47 \mu\text{g/g}$), reflecting a smaller overall phosphorus load and lower bioavailable fraction ($22.05 \pm 8.50 \mu\text{g/g}$). In contrast, bioavailable phosphorus in the lagoon reached $75.63 \pm 17.29 \mu\text{g/g}$, suggesting a higher

Tabla 3.- Valores de granulometría (%), MOT (%), COT (%), CaCO₃ (%), NT (µg/g); fracciones (µg/g) de fósforo (P-Ad+Fe, P-Ca, P-D, P-O, PI, PBD), relaciones C/N, COT/P-O, N/P, índices W e IEP en sedimentos del río Orinoco

Table 3. Particle size values (%), MOT (%), TOC (%), CaCO₃ (%), NT (µg/g); phosphorus fractions (µg/g) (P-Ad+Fe, P-Ca, P-D, P-O, PI, PBD), C/N ratios, TOC/P-O ratios, N/P ratios, W and IEP indices in sediments from the Orinoco River

E	AF	AM	Lodos	MOT	COT	CaCO ₃ ²⁻	NT	Fe	PA-D-Fe	P-Ca	P-D	P-O	PI ^e	PI	PBD	W	C/N	COT/P-O	N/P	IEP
1	0	1	99	1,05	0,61	2,09	275,30	1074	4,87	3,51	69,60	8,94	86,91	77,98	13,81	0,07	25,85	1762,58	7,01	0,14
2	51	46	3	1,24	0,72	2,13	457,20	1078	3,95	1,96	50,10	10,10	66,10	56,01	14,05	0,08	18,37	1842,32	15,32	0,11
3	4	0	96	0,33	0,19	2,58	545,90	731	4,17	2,90	27,72	6,87	41,67	34,79	11,04	0,14	4,06	713,98	29,01	0,07
4	0	0	100	3,97	2,3	6,16	683,40	472	6,27	4,39	228,73	27,66	267,05	239,39	33,93	0,03	39,26	2147,85	5,67	0,45
5	72	26	2	3,84	2,23	7,14	592,90	751	9,02	5,41	152,89	16,58	183,90	167,32	25,60	0,06	43,88	3474,62	7,14	0,31
6	70	24	4	2,28	1,32	5,69	237,40	1159	7,49	3,75	115,77	26,48	153,48	127,00	33,97	0,06	64,87	1287,74	3,42	0,26
7	82	16	2	0,555	0,32	1,85	289,00	865	3,95	2,79	53,72	19,11	79,58	60,46	23,06	0,07	12,92	432,55	8,04	0,13
8	24	58	18	0,575	0,34	1,45	558,80	701	2,43	1,77	12,82	23,30	40,32	17,02	25,73	0,17	7,10	376,99	30,69	0,07
9	48	30	22	4,05	2,35	5,45	572,70	1055	5,55	3,31	132,81	28,30	169,98	141,67	33,85	0,04	47,87	2144,83	7,46	0,28
10	27	36	37	2,57	1,49	5,77	1154,40	1212	4,50	2,95	78,85	19,05	105,35	86,29	23,55	0,06	15,06	2020,31	24,26	0,18
11	34	24	42	5,205	3,02	8,11	474,60	604	3,81	2,88	136,38	23,05	166,11	143,07	26,86	0,03	74,24	3385,25	6,33	0,28
12	82	17	1	0,69	0,4	1,58	488,10	677	3,91	2,76	16,26	6,64	29,58	22,93	10,55	0,21	9,56	1555,11	36,54	0,05
13	68	32	1	0,68	0,39	1,28	455,30	860	3,88	2,50	16,84	15,08	38,30	23,22	18,96	0,20	9,99	668,18	26,32	0,06
14	74	25	1	0,51	0,29	1,38	293,40	111	3,08	3,86	15,02	10,63	32,59	21,96	13,71	0,16	11,53	704,97	19,93	0,05
Min	0	0	1	0,33	0,19	1,28	237,40	111	2,43	1,77	12,82	6,64	29,58	17,02	10,55	0,03	4,06	704,97	3,42	0,05
Max	82	58	100	5,205	3,02	8,11	1154,40	1212	9,02	5,41	228,73	28,30	267,05	239,39	33,97	0,21	74,24	376,99	36,54	0,45
\bar{x}	45,43	23,93	30,57	1,97	1,14	3,76	505,60	811	4,78	3,19	79,11	17,27	104,35	87,08	22,05	0,10	27,47	3474,62	16,22	0,17
DS	30,54	16,83	39,13	1,67	0,97	2,47	230,75	301	1,77	0,95	65,56	7,76	72,77	67,47	8,50	0,06	22,71	1608,38	11,27	0,12

E= estaciones, Min= mínimo, Max= máximo, Prm= promedio, DS= desviación

Tabla 4.- Valores de granulometría (%), MOT (%), COT (%), CaCO₃ (%), NT (µg/g); fracciones (µg/g) de fósforo (P-Ad+Fe, P-Ca, P-D, P-O, P-I, PBD), relaciones C/N, COT/P-O, N/P, P, índices W e IEP en sedimentos de la laguna de Castellero

Table 4. Particle size values (%), MOT (%), CaCO₃ (%), NT (µg/g); phosphorus fractions (µg/g) (P-Ad+Fe, P-Ca, P-D, P-O, P-I, PBD), C/N ratios, TOC/P-O, N/P, P, W and IEP indices in sediments from the Castellero lagoon

E	AF	AM	Lodos	MOT	COT	CaCO ₃ -NT	Fe	P-AdFe	P-Ca	P-D	P-O	PT	PI	PBD	C/N	COT/P-O	N/P	W	PEI
1	25	40	35	6,23	1,48	7,37	608,80	35	6,68	2,51	107,20	46,66	163,05	116,39	53,34	28,40	820,47	8,27	0,06 0,27
2	16	22	62	3,29	1,33	3,79	622,70	37	9,91	3,74	253,24	86,24	353,12	266,88	96,14	24,84	397,22	3,90	0,04 0,59
3	10	25	65	5,99	1,61	8,05	604,40	38	6,33	5,67	211,61	86,49	310,10	223,61	92,82	31,06	480,57	4,32	0,03 0,52
4	12	32	56	5,20	1,50	5,49	524,60	38	2,75	7,60	169,98	86,75	267,07	180,33	89,50	33,40	447,29	4,35	0,02 0,45
5	11	37	52	2,69	1,02	0,84	538,10	35	1,74	8,94	76,49	55,99	143,16	87,18	57,73	22,18	472,03	8,32	0,02 0,24
6	25	43	32	3,63	1,06	1,79	505,30	35	3,26	4,45	139,68	65,25	212,65	147,39	68,51	24,43	418,87	5,26	0,02 0,35
7	34	36	30	3,50	1,05	0,93	343,40	18	3,02	7,52	121,56	68,37	200,47	132,10	71,39	35,81	398,25	3,79	0,02 0,33
Min	10	22	30	2,69	1,02	0,84	343,40	18	1,74	2,51	76,49	46,66	143,16	87,18	53,34	22,18	397,22	3,79	0,02 0,05
Max	34	43	65	6,23	1,61	8,05	622,70	38	9,91	8,94	253,24	86,75	353,12	266,88	96,14	35,81	820,47	8,32	0,06 0,59
x	19	34	47	4,36	1,29	4,04	535,33	34	4,81	5,78	154,25	70,82	235,66	164,84	75,63	28,59	490,67	5,46	0,03 0,32
DS	9	8	15	1,42	0,25	3,01	96,32	7	2,92	2,35	61,75	16,22	77,37	63,06	17,29	5,06	149,18	1,99	0,02 0,17

$\pm 8,50 \mu\text{g/g}$). En la laguna el valor del fósforo biodisponible fue de $75,63 \pm 17,29 \mu\text{g/g}$, lo que indica mayor capacidad de reciclaje interno (ZHUO *et al.*, 2023; TU *et al.*, 2022) (Tablas 3, 4).

Se evidenciaron cambios significativos en las relaciones estequiométricas. La relación COT/P-O fue superior en el río ($3474,62 \pm 1608,38$ comparado con $490,67 \pm 149,18$), lo cual muestra que la transformación de carbono a fósforo orgánico es menos eficiente y apoya su origen mayormente terrestre (FABRE *et al.*, 2023; PENG *et al.*, 2019). La relación N/P en sedimentos, en lo que respecta al río ($16,22 \pm 11,27$), también fue más alta, lo cual indica limitación de fósforo. Además, la laguna mostró una relación baja ($5,46 \pm 1,99$), lo que indica que el fósforo está más disponible para el reciclaje biogeoquímico (LIANG *et al.*, 2024; LIU *et al.*, 2024). Este bajo índice sugiere que hay alto nivel de fósforo o, en sentido contrario, insuficiencia relativa de nitrógeno. De acuerdo con los estándares tradicionales (N/P < 10 significa que el nitrógeno limita; N/P > 17 significa que el fósforo limita) (GUILDFORD & HECKY, 2000; REDFIELD *et al.*, 1963), una relación <10 es propia de sistemas eutróficos o en vías de eutrofización (ZHANG *et al.*, 2018; SHOU *et al.*, 2024).

La diferencia entre la relación N/P en el agua (elevada) y en el sedimento (baja) de la laguna de Castillero se debe a diferentes procesos redox, transformaciones microbianas, retención geoquímica específica y contribuciones asincrónicas de nutrientes (LI *et al.*, 2023b; ZHANG *et al.*, 2025). Esta discrepancia señala que, a pesar de que la columna de agua parece estar restringida por fósforo, el sedimento funciona como un reservorio esencial de este nutriente, regulando la productividad primaria del ecosistema durante períodos más largos (WETZEL, 2001; TAMMEORG *et al.*, 2020). El nitrógeno, en sus formas solubles de NO_3^- y NH_4^+ , tiene gran movilidad en comparación con los compuestos de P, ya que este suele quedar inmovilizado en los sedimentos a través de la precipitación con Ca^{2+} o Fe^{3+} o mediante complejos orgánicos (WETZEL, 2001; REDDY & DELAUNE, 2008; TAMMEORG *et al.*, 2020).

El acúmulo de materia orgánica en el sedimento de la laguna de Castillero favorece las condiciones reductoras en la interfase entre agua y sedimento; lo cual permite que se reduzcan los óxidos férricos ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) y que el fósforo previamente absorbido sea liberado. XU *et al.* (2023) y ZHUO *et al.* (2023) sostienen que este método eleva la cantidad de fós-

potential for internal recycling (ZHUO *et al.*, 2023; TU *et al.*, 2022) (Tables 3, 4).

Significant differences were observed in stoichiometric ratios. The TOC/P-O ratio was markedly higher in the river (3474.62 ± 1608.38 vs. 490.67 ± 149.18), indicating less efficient transformation of carbon into organic phosphorus and supporting its primarily terrestrial origin (FABRE *et al.*, 2023; PENG *et al.*, 2019). The N/P ratio in river sediments (16.22 ± 11.27) was also higher, suggesting phosphorus limitation, while the lagoon exhibited a lower ratio (5.46 ± 1.99), indicating greater phosphorus availability for biogeochemical recycling (LIANG *et al.*, 2024; LIU *et al.*, 2024). According to conventional standards (N/P < 10 indicates nitrogen limitation; N/P > 17 indicates phosphorus limitation) (GUILDFORD & HECKY, 2000; REDFIELD *et al.*, 1963), the lagoon's N/P < 10 points to a eutrophic or eutrophying system (ZHANG *et al.*, 2018; SHOU *et al.*, 2024).

The contrasting N/P ratios in the water column (high) and sediments (low) of the Castillero Lagoon result from differences in redox conditions, microbial transformations, specific geochemical retention, and asynchronous nutrient inputs (LI *et al.*, 2023b; ZHANG *et al.*, 2025). This discrepancy indicates that, although the water column appears phosphorus-limited, sediments serve as a critical phosphorus reservoir regulating long-term primary productivity (WETZEL, 2001; TAMMEORG *et al.*, 2020). In contrast, soluble nitrogen (NO_3^- , NH_4^+) is more mobile than phosphorus, which tends to become immobilized through precipitation with Ca^{2+} or Fe^{3+} , or by forming organic complexes (WETZEL, 2001; REDDY & DELAUNE, 2008; TAMMEORG *et al.*, 2020).

The accumulation of organic matter in Castillero Lagoon sediments promotes reducing conditions at the water-sediment interface, leading to ferric iron reduction ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) and the release of previously adsorbed phosphorus. XU *et al.* (2023) and ZHUO *et al.* (2023) note that this process increases the pool of bioavailable phosphorus without significantly altering

foro biodisponible, sin embargo, no altera el nivel de nitrógeno de manera importante. La pérdida de nitrógeno hacia la atmósfera mediante procesos microbianos de desnitrificación es la causa de que en los sedimentos haya menos retención de este elemento, ya que, en estos procesos, el amonio (NH_4^+) liberado por mineralización es convertido en NO_3^- y después se reduce a N_2 en condiciones anóxicas (YANG *et al.*, 2021; WEI *et al.*, 2022).

El acoplamiento entre agua y sedimento, que controla los reservorios y las amenazas de liberación de nutrientes, demuestra que en ambos sistemas los sedimentos son el almacén primordial de fósforo, aunque con propiedades diferentes. En el Orinoco, las fracciones P-BD (Fe-P + P-O) son más bajas que en la laguna, lo cual significa que hay un potencial de liberación menor en condiciones anóxicas en comparación con la laguna, donde el fósforo se encuentra mayormente vinculado a P-Ca y materia orgánica, lo que sugiere una estabilidad geoquímica más alta (PENG *et al.*, 2019).

La evaluación del riesgo de liberación del fósforo (IEP < 1), que osciló entre 0,05 y 0,45 (promedio: $0,17 \pm 0,12$) en Orinoco y entre 0,24 y 0,59 (promedio: $0,32 \pm 0,17$) en Castellero, no evidencia procesos intensos de liberación, ni contaminación antropogénica (WANG *et al.*, 2013). En el mejor de los casos, se nota un ligero enriquecimiento relativo, lo que sugiere que las fuentes más importantes de fósforo provienen de la naturaleza, asociadas a la geología y al material alóctono que aporta el río y la llanura (YU *et al.*, 2022) (Tablas 3, 4).

El valor del IVT-Ecológico (Fig. 2). fue muy bajo en el río Orinoco ($0,04 \pm 0,02$), indicando la prevalencia de un sistema homogéneo, con patrones geoquímicos estables, y procesos controlados principalmente por la entrada de materiales desde cuencas adyacentes (VÁSQUEZ & WILBERT, 1992; MORA *et al.*, 2017; MANNING *et al.*, 2020). Esto permite clasificarlo como un sistema exportador-transportador. En cambio, en la laguna fue mayor ($3,77 \pm 1,30$), lo que señala una gran variabilidad interna, consistente con un sistema autorregulado, con alta influencia de procesos bentónicos, como la regeneración y liberación de nutrientes (NEUMANN *et al.*, 2025). Se recalca en la laguna la estación 2 en el centro de la laguna con un valor de 5,23 de IVT-E que es superior a la media, lo cual clasifica a esa estación como un sumidero vulnerable a eutrofización. La coincidencia entre los resultados multivariados y el IVT demuestra su

nitrogen levels. Nitrogen loss through microbial denitrification explains the lower retention of this element in sediments, as ammonium (NH_4^+) released during mineralization is transformed into NO_3^- and subsequently reduced to N_2 under anoxic conditions (YANG *et al.*, 2021; WEI *et al.*, 2022).

The coupling between water and sediment, which governs nutrient storage and release potential, indicates that sediments act as the primary phosphorus reservoir in both systems but with differing characteristics. In the Orinoco, P-BD fractions (Fe-P + P-O) were lower than in the lagoon, suggesting a reduced potential for phosphorus release under anoxic conditions. In contrast, phosphorus in the lagoon is mainly bound to P-Ca and organic matter, indicating greater geochemical stability (PENG *et al.*, 2019).

The phosphorus release risk index (IEP < 1) ranged from 0.05 to 0.45 (mean: 0.17 ± 0.12) in the Orinoco and from 0.24 to 0.59 (mean: 0.32 ± 0.17) in the lagoon, indicating no strong evidence of release or anthropogenic contamination (WANG *et al.*, 2013). At most, a mild enrichment was detected, suggesting that phosphorus inputs are primarily natural, derived from geological sources and allochthonous materials transported by the river and floodplain (YU *et al.*, 2022) (Tables 3, 4).

The ecological trophic assessment index (IVT-Ecological) (Fig. 2) was very low in the Orinoco River (0.04 ± 0.02), reflecting a homogeneous, geochemically stable system primarily controlled by material inputs from adjacent basins (VÁSQUEZ & WILBERT, 1992; MORA *et al.*, 2017; MANNING *et al.*, 2020). This characterizes it as an exporter-transporter system. In contrast, the lagoon displayed a higher index (3.77 ± 1.30), indicating high internal variability and a self-regulated system influenced by benthic processes such as nutrient regeneration and release (NEUMANN *et al.*, 2025). Station 2, located at the lagoon's center, showed an above-average IVT-E value (5.23), classifying it as a phosphorus sink vulnerable to eutrophication. The alignment between multivariate results and IVT values confirms the robustness of this index

robustez como herramienta integradora, capaz de reflejar tanto los gradientes fisicoquímicos como las dinámicas sedimentarias y tróficas.

A pesar de que la laguna de Castillero se comporta como un sistema acumulativo, según el ACP y el IVT ($3,77 \pm 1,30$), el IEP < 1 ratifica que este enriquecimiento no es consecuencia de impactos antropogénicos, sino de procesos naturales de sedimentación y detritos (XIAO *et al.*, 2025). El índice $W < 0,5$ indica que, a pesar de que hay posibilidades de reciclaje interno, la mayoría del fósforo está atrapado en fracciones estables (P-Ca), lo cual reduce el riesgo de liberación rápida bajo las circunstancias actuales, excepto en situaciones de hipoxia o alteraciones drásticas en el redox (PENG *et al.*, 2019). En esta dirección, los tres índices se complementan entre sí, de modo que el IVT destaca la función acumulativa y retentiva.

En comparación con otros estudios, la especiación de fósforo en el sedimento en el sistema Orinoco-Castillero, se comportó de manera análoga a la descrita para lagos eutróficos de Asia oriental. En la laguna de Castillero, las fracciones P-D y P-O fueron dominantes, similar a lo documentado en el lago Taihu, donde las fracciones orgánicas del fósforo predominan en sedimentos ricos en carbono y sujetos a reducción microbiana (FAN *et al.*, 2021). A su vez, XU *et al.* (2023) confirmaron que las bacterias filamentosas regulan la liberación del fósforo sedimentario mediante la reducción de Fe y la oxidación microbiana, proceso congruente con la liberación potencial observada en la laguna.

En contraste, el Orinoco mostró una composición dominada por PI y P-Ca, semejante a la descrita por TONELLO *et al.* (2020) en sedimentos de lagos oli-

as an integrative diagnostic tool that captures both physicochemical gradients and trophic-sedimentary dynamics.

Although the Castillero Lagoon behaves as an accumulative system, as shown by PCA and IVT (3.77 ± 1.30), the IEP < 1 confirms that this enrichment results from natural sedimentation and detrital processes rather than anthropogenic impacts (XIAO *et al.*, 2025). The W index (< 0.5) further suggests that, despite some internal recycling potential, most phosphorus is bound in stable forms (P-Ca), reducing the risk of rapid release under current conditions, except during hypoxia or drastic redox shifts (PENG *et al.*, 2019). Collectively, these indices complement each other, with IVT highlighting the lagoon’s cumulative and retentive role.

Comparatively, phosphorus speciation in the Orinoco-Castillero system resembles patterns reported for eutrophic lakes in East Asia. In Castillero Lagoon, P-D and P-O fractions dominated, similar to Lake Taihu, where organic phosphorus prevails in carbon-rich sediments under microbial reduction (FAN *et al.*, 2021). XU *et al.* (2023) further demonstrated that filamentous bacteria mediate sedimentary phosphorus release via iron reduction and microbial oxidation, consistent with the potential release observed in the lagoon.

Conversely, the Orinoco was dominated by PI and P-Ca, akin to oligotrophic lakes in North America (TONELLO *et al.*, 2020), where calcium-bound phosphate stability limits immediate bioavailability. The contrast between organic

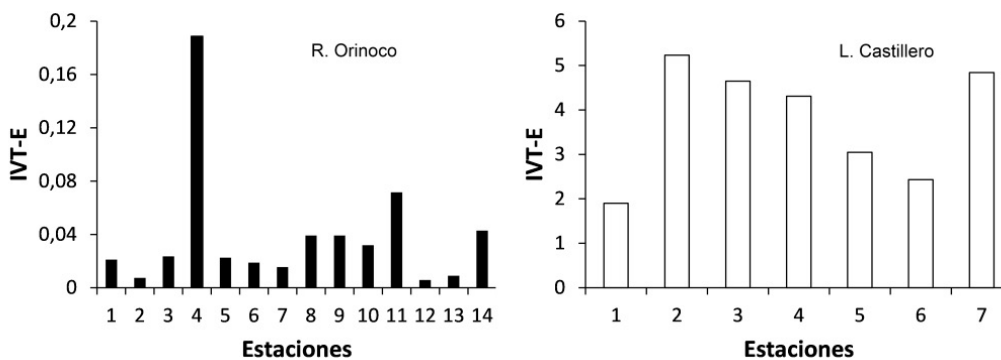


Figura 2.- Valores de IVT en el río Orinoco y la laguna de Castillero

Figure 2. IVT values in the Orinoco River and Castillero Lagoon

gotróficos de América del Norte, donde la estabilidad del fosfato cálcico limita la biodisponibilidad inmediata. Las diferencias entre ambos sistemas; retención orgánica en la laguna frente a retención mineral en el río, responden principalmente a la energía hidrodinámica, al pH ligeramente alcalino y a la mineralogía de los sedimentos.

En síntesis, los resultados de esta investigación son semejantes a los de otras regiones tropicales y subtropicales en cuanto a los mecanismos de transporte, adsorción y liberación de fósforo, pero difieren en magnitud por la menor presión antrópica y la naturaleza geogénica del sistema Orinoco–Castillero. Estos contrastes respaldan la validez del IVT–Ecológico como descriptor funcional adaptable a diferentes contextos bioclimáticos, y refuerzan la hipótesis de que la interacción agua-sedimento es el principal regulador del estado trófico en ecosistemas tropicales (LIANG *et al.*, 2024; TU *et al.*, 2022).

Integración multivariada de los compartimentos y validación del IVT–Ecológico

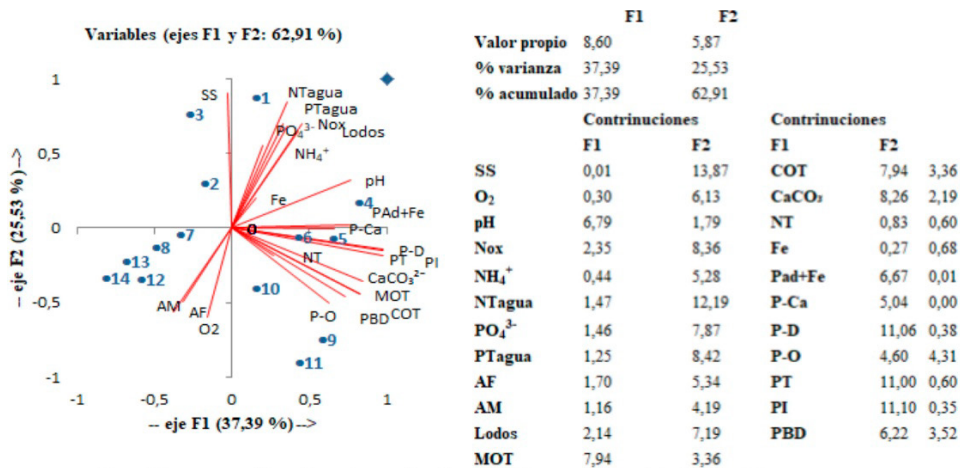
La integración de los análisis multivariados (ACP, MDS, ANOSIM y SIMPER) permitió validar estadística y funcionalmente el índice de valoración trófica-Ecológica (IVT–Ecológica). El ACP explicó el 62,91 % de la varianza total para el Orinoco (Fig. 3) y 65,42 % para la laguna de Castellero (Fig. 4), diferenciando en el Orinoco una estructura dominada por fracciones inorgánicas estables (PT, PI, P–D) asociadas a Fe y CaCO₃, que promueve la fijación del fósforo en formas con escasa biodisponibilidad (RUTTENBERG, 1992; KOZYREV *et al.*, 2023), mientras que en la laguna predominó la coocurrencia de PBD, P–O, MOT y NO_x, indicadores de reciclaje endógeno (TIANG *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2025). Estos patrones coinciden con los hallazgos de WETZEL (2001) y TAMMEORG *et al.* (2020) que describen el acoplamiento agua-sedimento como el principal modulador de la vulnerabilidad trófica. El análisis MDS (Fig. 5) confirmó una clara separación entre los ecosistemas (estrés = 0,037), reforzada por ANOSIM (R = 0,72; p = 0,0001). Según el SIMPER, el Fe (84,88 %), junto con el PT y NT (≈ 10 %), fueron los principales contribuyentes a la disimilitud funcional (Tabla 5). Esta diferenciación se asocia directamente con la capacidad de retención geoquímica del fósforo, evidenciando la fiabilidad del IVT–Ecológica como descriptor de estados funcionales.

retention in the lagoon and mineral retention in the river primarily reflects hydrodynamic energy, slightly alkaline pH, and sediment mineralogy.

Overall, these results align with findings from other tropical and subtropical systems regarding phosphorus transport, adsorption, and release mechanisms but differ in magnitude due to lower anthropogenic pressure and the geogenic nature of the Orinoco–Castillero system. These differences reinforce the validity of the IVT–Ecological Index as a functional descriptor adaptable to diverse bioclimatic contexts and support the hypothesis that water–sediment interactions are the main regulators of trophic state in tropical ecosystems (LIANG *et al.*, 2024; TU *et al.*, 2022).

Multivariate Integration of Compartments and Validation of IVT–Ecological

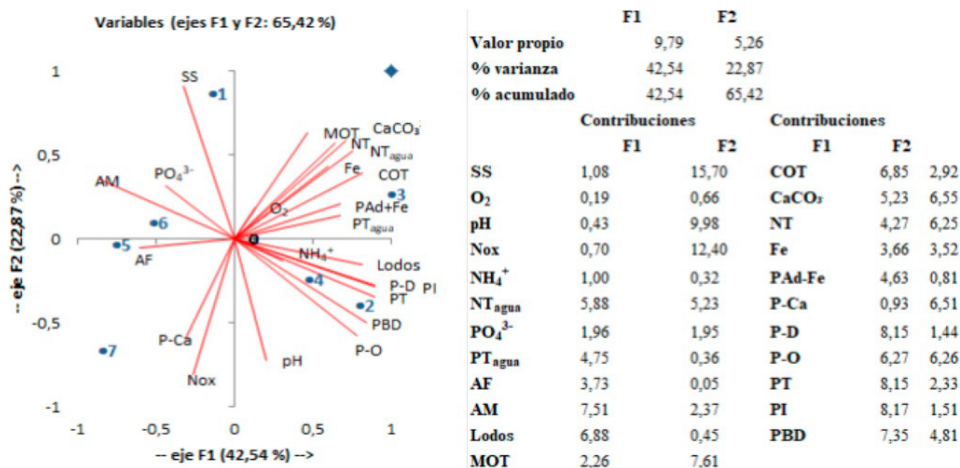
The integration of multivariate analyses (PCA, MDS, ANOSIM, and SIMPER) provided both statistical and functional validation of the Ecological Trophic Assessment Index (IVT–Ecological). The PCA explained 62.91% of the total variance for the Orinoco River (Fig. 3) and 65.42% for the Castellero Lagoon (Fig. 4). In the Orinoco, the structure was dominated by stable inorganic fractions (PT, PI, P–D) associated with Fe and CaCO₃, which promote phosphorus fixation in poorly bioavailable forms (RUTTENBERG, 1992; KOZYREV *et al.*, 2023). In contrast, the lagoon was characterized by the co-occurrence of PBD, P–O, TOM, and NO_x, indicative of strong endogenous recycling (TIANG *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2025). These patterns align with the findings of WETZEL (2001) and TAMMEORG *et al.* (2020), who describe the water–sediment coupling as the principal modulator of trophic vulnerability. The MDS analysis (Fig. 5) confirmed a clear separation between both ecosystems (stress = 0.037), further supported by ANOSIM (R = 0.72; p = 0.0001). According to the SIMPER results, Fe (84.88%), together with PT and NT (≈10%), were the primary contributors to functional dissimilarity (Table 5). This differentiation directly reflects the systems' varying geochemical phosphorus retention capacities, underscoring the reliability of the IVT–Ecological as an indicator of functional states.



SS=sólidos suspendidos, O₂=oxígeno disuelto, pH, NOx=especies oxidadas de nitrógeno, NH₄⁺=amonio, NT_{agua}= nitrógeno total en agua, PO₄³⁻=fosfato, PT_{agua}=fósforo total en agua, AF=arena fina, AM=arena media, Lodos, MOT=materia orgánica total, COT=carbono orgánico total, CaCO₃=carbonato de calcio, NT=nitrógeno total, Fe=hierro, P-Ad+Fe= fosforo adsorbido a hierro, P-Ca= fósforo autigénico, P-D=fósforo detrítico, PO=fósforo orgánico, PT=fósforo total, PI=fósforo inorgánico total, PBD=fósforo biodisponible.

Figura 3.- Proyección ortogonal de los dos primeros componentes principales para los parámetros fisicoquímicos del agua y sedimento del río Orinoco

Figure 3. Orthogonal projection of the first two principal components for the physicochemical parameters of the water and sediment of the Orinoco River



SS=sólidos suspendidos, O₂=oxígeno disuelto, pH, NOx=especies oxidadas de nitrógeno, NH₄⁺=amonio, NT_{agua}= nitrógeno total en agua, PO₄³⁻=fosfato, PT_{agua}=fósforo total en agua, AF=arena fina, AM=arena media, Lodos, MOT=materia orgánica total, COT=carbono orgánico total, CaCO₃=carbonato de calcio, NT=nitrógeno total, Fe=hierro, P-Ad+Fe= fosforo adsorbido a hierro, P-Ca= fósforo autigénico, P-D=fósforo detrítico, PO=fósforo orgánico, PT=fósforo total, PI=fósforo inorgánico total, PBD=fósforo biodisponible.

Figura 4.- Proyección ortogonal de los dos primeros componentes principales para los parámetros fisicoquímicos del agua y sedimento de la laguna de Castillero

Figure 4. Orthogonal projection of the first two principal components for the physicochemical parameters of the water and sediment of the Castillero lagoon

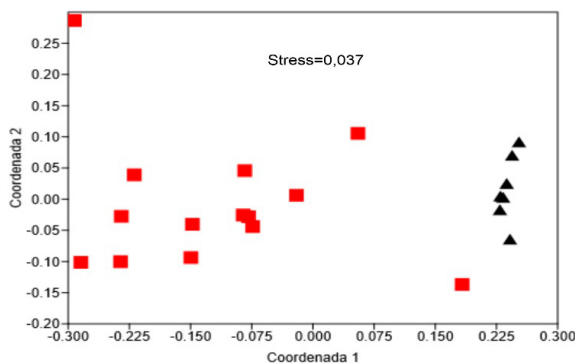


Figura 5.- Análisis de escalamiento multidimensional (MDS) (basado en una matriz de distancias euclidianas) en sedimentos del río Orinoco (□) y laguna de Castillero (Δ)

Figure 5. Multidimensional scaling (MDS) analysis (based on a Euclidean distance matrix) in sediments from the Orinoco River (□) and Castillero Lagoon (Δ)

Estos resultados integrados confirman la utilidad y confiabilidad del IVT, convirtiéndolo en un *proxy* e instrumento robusto para explicar la funcionalidad geoquímica y trófica en los ecosistemas acuáticos tropicales. Estos resultados, en concordancia con estudios recientes sobre índices funcionales en ecosistemas tropicales (DE DEUS & MATOS, 2024; SUMAN *et al.*, 2023), respaldan la aplicabilidad del IVT-Ecológico como indicador de vulnerabilidad trófica y sostenibilidad funcional en ambientes lóticos y lénticos de la región neotropical.

La Figura 6 muestra una propuesta del modelo conceptual, para los procesos que participan en el acoplamiento agua-sedimento en el IVT-Ecológica. Integra los resultados de los análisis ACP, MDS, ANOSIM y SIMPER, mostrando la diferenciación funcional entre los compartimentos agua y sedimento en ambos ecosistemas. En conjunto, la figura ilustra la aplicabilidad del IVT-Ecológica como herramienta de diagnóstico, ya que la distribución espacial de las estaciones en el plano multivariado coincide con los valores del índice: el Orinoco se ubica en el cuadrante de sistemas exportadores y estables, mientras que la laguna de Castellero se agrupa en la zona retentiva y con potencial de reciclaje interno. Por tanto, esta figura sintetiza gráficamente la validación estadística y funcional del IVT-Ecológica, demostrando su utilidad en la clasificación y monitoreo de ecosistemas tropicales lóticos y lénticos.

Collectively, these integrated results confirm the utility and robustness of the IVT as a reliable proxy for assessing geochemical and trophic functionality in tropical aquatic ecosystems. Consistent with recent studies on functional indices in tropical systems (DE DEUS & MATOS, 2024; SUMAN *et al.*, 2023), the IVT-Ecological demonstrates strong applicability as an indicator of trophic vulnerability and functional sustainability in both lotic and lentic environments of the Neotropical region.

Figure 6 presents a conceptual model summarizing the processes involved in water-sediment coupling within the framework of the IVT-Ecological. It integrates the outcomes of PCA, MDS, ANOSIM, and SIMPER analyses, illustrating the functional differentiation between water and sediment compartments across both ecosystems. Overall, the figure highlights the diagnostic power of the IVT-Ecological: the spatial distribution of sampling stations in the multivariate plane mirrors their index values, positioning the Orinoco in the quadrant of stable, exporter-type systems, while the Castellero Lagoon clusters in the retentive zone, characterized by strong internal recycling potential. Thus, the figure provides a graphical synthesis of both the statistical and functional validation of the IVT-Ecological, demonstrating its effectiveness as a diagnostic and monitoring tool for tropical lotic and lentic ecosystems.

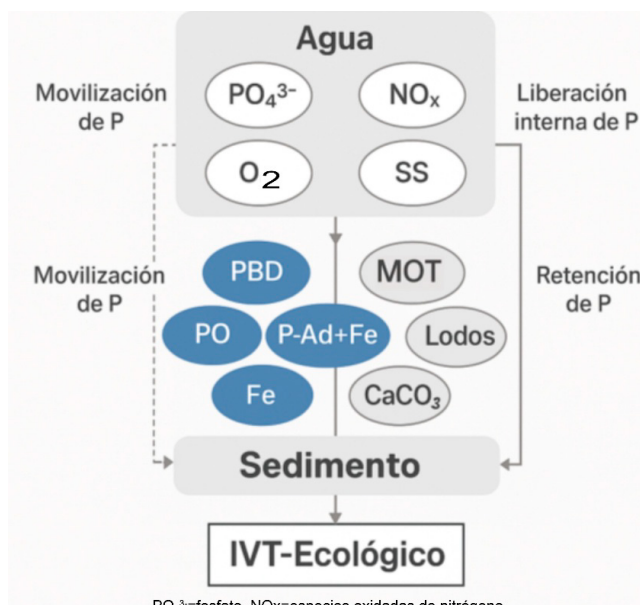
Tabla 5.- Parámetros estadísticos ASOSIM y SIMPER aplicados al río Orinoco y la laguna de Castellero (Fe= hierro, NT= nitrógeno total, PT= fósforo total. PI= fósforo inorgánico total, PD= fósforo detrítico, PBD= fósforo biodisponible, PO= fósforo orgánico)

Table 5. ASOSIM and SIMPER statistical parameters applied to the Orinoco River and Castellero Lagoon (Fe = iron, TN = total nitrogen, TP = total phosphorus, IP = total inorganic phosphorus, DP = detrital phosphorus, BAP = bioavailable phosphorus, OP = organic phosphorus)

		ANOSIM			
Permutaciones		R	P		
9999		0,72	0,0001		
		SIMPER			
Taxon	Disimilitud	Contrib.%	Acumulv.%	x. R. Orinoco	x. L.Castillero
Fe	6,88	84,88	84,88	811,00	33,70
NT	5,83	7,19	92,07	506,00	535,00
PT	2,73	3,37	95,44	104,00	236,00
PI	1,37	1,69	97,13	87,10	165,00
PD	1,29	1,59	98,73	79,10	154,00
PBD	3195,00	0,39	99,12	22,00	75,60
PO	3149,00	0,39	99,51	17,30	70,80

\bar{x} = promedio de cada grupo; G1= R. Orinoco; G2= L. Castellero;

Contrib= contribución; Acumulv= acumulativo



PO₄³⁻=fosfato, NO_x=especies oxidadas de nitrógeno, O₂=oxígeno disuelto, SS=sólidos suspendidos, MOT=materia orgánica total, PBD=fósforo biodisponible, PO=fósforo orgánico, P-Ad+Fe= fósforo adsorbido a hierro, Fe=hierro, CaCO₃=carbonato de calcio.

Figura 6.- Modelo conceptual del acoplamiento agua-sedimento propuesto en el IVT-ecológica (imagen generada con IA, ChatGPT 4.0, OPENAI, 2025)

Figure 6. Conceptual model of the water-sediment coupling proposed in IVT-ecological (image generated with AI, ChatGPT 4.0, OPENAI, 2025)

En la Tabla 6 se muestra una síntesis de las semejanzas y diferencias en la dinámica del fósforo y los procesos asociados entre el sistema Orinoco–Castillero (este estudio) y varios grandes ríos del mundo. Se destacan la forma dominante del fósforo, los mecanismos de retención o liberación, y los factores dominantes que explican los patrones observados.

Table 6 summarizes the main similarities and differences in phosphorus dynamics and associated processes between the Orinoco–Castillero system (this study) and several large river systems worldwide. Highlighted are the dominant phosphorus forms, the prevailing retention or release mechanisms, and the key environmental factors explaining the observed patterns.

Tabla 6.- Síntesis de las semejanzas y diferencias en la dinámica del fósforo y los procesos asociados entre el sistema Orinoco–Castillero (este estudio) y varios grandes ríos del mundo

Table 6. Summary of similarities and differences in phosphorus dynamics and associated processes between the Orinoco–Castillero system (this study) and several large rivers around the world

Sistema (referencia representativa)	Forma dominante de P	Mecanismo principal de retención/liberación	Factor dominante que explica patrón
Orinoco–Castillero (este estudio)	Predominio particulado en el río; P biodisponible (P-O, P-D) acumulado en la laguna.	Transporte particulado en río; sedimentación + mineralización microbiana y reducción Fe→Fe ²⁺ en laguna.	Hidrodinámica (río vs. laguna), granulometría y actividad microbiana.
Madeira / Amazonas (A LMEIDA <i>et al.</i> , 2015)	Mayormente particulado (dominado por fósforo total particulado (PTP) en estaciones de crecida).	Transporte durante crecidas; retención en planicies de inundación; efecto de presas sobre cargas.	Eventos hidrológicos (crecidas) y regulación por represas.
Paraná (OSÓRIO & RODRIGUES, 2021; CAMPODONICO <i>et al.</i> , 2016)	En tramos lóticos mayor P particulado (PP); en lagunas mayor P orgánico/lábil.	Sedimentación y acumulación de MOT en lagunas de inundación; reciclaje interno en sistemas lagunares.	Conectividad río–planicie, uso del suelo agrícola, granulometría fina.
Mississippi–Atchafalaya (WELCH <i>et al.</i> , 2014)	Gran parte del P transportado como fracción particulada.	Transporte dominado por eventos de alta descarga; deposición y re-resuspensión.	Hidrodinámica (picos de caudal); influencia agrícola en P disuelto.
São Francisco (MARQUES <i>et al.</i> , 2019)	Predominio particulado retenido en embalses; aumento local de P lábil en reservorios.	Retención en embalses, acumulación de MOT; liberación bajo condiciones anóxicas.	Regulación por presas y eutrofización local.
Río de la Plata (NOGUEIRA <i>et al.</i> , 2021)	Mezcla compleja: entradas continentales particuladas; fraccionamiento variable en estuario.	Retención en bancos de sedimentación; variabilidad por salinidad y transporte lateral.	Conectividad estuarina, dinámica de marea y carga continental.

4. CONCLUSIONES

El análisis integrado de los compartimentos agua y sedimento evidenció diferencias significativas en la estructura y funcionalidad trófica de ambos sistemas. El río Orinoco se caracteriza por un comportamiento exportador, dominado por fósforo en formas inorgánicas estables y una alta oxigenación que limita la retroalimentación interna. En cambio, la laguna de Castellero actúa como un sistema retentivo, con mayor acumulación de materia orgánica, fósforo biodisponible y condiciones reductoras que favorecen el reciclaje endógeno.

Los resultados del Kruskal–Wallis junto con los análisis ACP, ANOSIM y SIMPER, confirmaron diferencias significativas en variables claves del agua y sedimento y demostraron alta correspondencia entre la estructura fisicoquímica y los valores del IVT–Ecológico; validándolo como una herramienta eficaz para diagnosticar la funcionalidad trófica en relación con el fósforo en ecosistemas tropicales, integrando procesos fisicoquímicos y sedimentarios. Su aplicación en programas de monitoreo permitiría anticipar estados de eutrofización y apoyar estrategias de gestión adaptativa en cuerpos de agua lóticos y lénticos.

4. CONCLUSIONS

The integrated assessment of the water and sediment compartments revealed clear contrasts in trophic structure and functionality between the two systems. The Orinoco River operates primarily as an exporting system, dominated by stable inorganic phosphorus fractions and elevated oxygenation that restricts internal nutrient recycling. In contrast, the Castellero Lagoon behaves as a retentive system, characterized by greater accumulation of organic matter, higher concentrations of bioavailable phosphorus, and reducing conditions that enhance internal biogeochemical regeneration.

The combined results of the Kruskal–Wallis test and multivariate analyses (PCA, ANOSIM, and SIMPER) identified significant differences in key physicochemical and sedimentary variables and demonstrated strong coherence between system structure and IVT–Ecological index values. These findings confirm the IVT–Ecological as a reliable and integrative indicator of trophic functionality in tropical aquatic ecosystems, effectively linking phosphorus dynamics with sediment–water interactions. Its application in environmental monitoring programs would enable the early detection of eutrophication risks and strengthen adaptive management strategies for both lotic and lentic systems.

5. REFERENCIAS

- AMINOT, A. & CHAUSSEPIED, M. (1983). Dosage del' Oxygène dissous. En *Manuel des Analyses Chimiques en milieu Marin* (Cap. XI, pp. 125-134). Centre National Pour L'Exploitation des Océans (CNEXO).
- ANDERSON, L. D. & DELANEY, M. L. (2000). Sequential extraction and analysis of phosphorus in marine sediments: Streamlining of the SEDEX procedure. *Limnology and Oceanography*, 45(2), 509–515. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.2.0509>
- BARIK, S. K., BRAMHA, S., BASTIA, T. K., BEHERA, D., KUMAR, M., MOHANTY, P. K. & RATH, P. (2019). Characteristics of geochemical fractions of phosphorus and its bioavailability in sediments of a largest brackish water lake, South Asia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19, 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.02.002>
- BENDSCHNEIDER, K. & ROBINSON, R. J. (1952). A new spectrophotometric determination of nitrite in sea water. *Journal of Marine Research*, 11(1), 87-96. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/761
- BUSTAMANTE, M. M. C., MARTINELLI, L. A., PÉREZ, T., RASSE, R., OMETTO, J. P. H., SIQUEIRA PACHECO, F., MACHADO LINS, S. R. & MARQUINA, S. (2015). Nitrogen management challenges in major watersheds of South America. *Environmental Research Letters*, 10, 065007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/6/065007>
- CARLSON, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- CHEN, Y., HU, C., YANG, G. P., GAO, X-C. & ZHOU, L-M. (2021). Variation and reactivity of organic matter in the surface sediments of the Changjiang Estuary and its adjacent East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, e2020JG005765. <https://doi.org/10.1029/2020JG005765>
- CLARKE, K. R. & WARWICK, R. M. (2001). *Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation* (2^a ed.). PRIMER-E Ltd.
- CORMAN, J. R. (2025). Calcium carbonate and phosphorus interactions in inland waters. *Limnology and Oceanography Letters*, 10, 158-178. <https://doi.org/10.1002/lo12.10452>

- CRESSA, C., VÁSQUEZ, E., ZOPPI, E., RINCÓN, J. E. & LÓPEZ, C. (1993). Aspectos generales de la Limnología en Venezuela. *Interciencia*, 18(5), 237-248. <https://acortar.link/rSuf0E>
- DAN, S. F., LIU, S.-M. & YANG, B. (2020). Geochemical fractionation, potential bioavailability and ecological risk of phosphorus in surface sediments of the Cross River estuary system and adjacent shelf, South East Nigeria (West Africa). *Journal of Marine Systems*, 201, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103244>
- DA SILVA, T. T., SARAIVA, M. A. & BECKER, H. (2024). Proposal for a trophic status index for Brazilian semi-arid reservoirs. *Revista Caatinga*, 37, e12405. <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v37i12405rc>
- DE DEUS, A. C. & MATOS, D. M. (2024). Monitoring subtropical aquatic ecosystems: evaluating the use of Trophic State Indices (TSI) and Aquatic Life Protection (API) as baseline indices by monitoring an urban reservoir in southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e283148. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.283148>
- EATON, A. D., CLESCERI, L. S. & GREENBERG, A. E. (Eds.). (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19^a ed.). American Public Health Association (APHA).
- ESCOBER, E. J. & PYTHIAS ESPINO, M. (2023). A new trophic state index for assessing eutrophication of Laguna de Bay, Philippines. *Environmental Advances*, 13, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100410>
- FABRE, C., WEI, X., SAUVAGE, S., QUYNH LE, T. P., OUILLO, S., ORANGE, D., HERRMANN, M. & SÁNCHEZ-PÉREZ, J.-M. (2023). Assessing fluvial organic carbon flux and its response to short climate variability and damming on a large-scale tropical Asian river basin. *Science of The Total Environment*, 903, 166589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166589>
- FAN, X., XING, X. & DING, S. (2021). Enhancing the retention of phosphorus through bacterial oxidation of iron or sulfide in the eutrophic sediments of Lake Taihu. *Science of the Total Environment*, 791, 148039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148039>
- FOLK, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company.
- GONZÁLEZ, H. & RAMÍREZ, M. (1995). The effect of nickel mining and metallurgical activities on the distribution of heavy metals in Levisa Bay, Cuba. *Journal of Geochemical Exploration*, 52(1-2), 183-192. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00054-F](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00054-F)
- GUILDFORD, S. J. & HECKY, R. E. (2000). Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? *Limnology and Oceanography*, 45(6), 1213-1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>
- HUPFER, M. & LEWANDOWSKI, J. (2008). Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long-lasting paradigm in limnology. *International Review of Hydrobiology*, 93(4-5), 415-432. <https://doi.org/10.1002/iroh.200711054>
- JOLLIFFE, I. T. & CADIMA, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374, 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- KOROLEFF, F. (1976). Determination of nutrients. En K. Grasshoff (Ed.), *Methods of Sea-water Analysis*. Verlag Chemie.
- KOZYREV, R., UMEZAWA, Y. & YOH, M. (2023). Total phosphorus and phosphorus forms change in sediments along the Tone River. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1060312. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1060312>
- KRAAL, P., BURTON, E. D., ROSE, A. L., KOCAR, B. D., LOCKHART, R. S., GRICE, K., BUSH, R. T., TAN, E. & WEBB, S. M. (2015). Sedimentary iron-phosphorus cycling under contrasting redox conditions in a eutrophic estuary. *Chemical Geology*, 392, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.11.006>
- LEWIS, A. S., KIM, B. S., EDWARDS, H. L., WANDER, H. L., GARFIELD, C. M., MURPHY, H. E., POULIN, N. D., PRINCIOTTA, S. D., ROSE, K. C., TAYLOR, A. E., WEATHERS, K. C., WIGDAHL-PERRY, C. R., YOKOTA, K., RICHARDSON, D. C. & BRUESEWITZ, D. A. (2020). Prevalence of phytoplankton limitation by both nitrogen and phosphorus related to nutrient stoichiometry, land use, and primary producer biomass across the northeastern United States. *Inland Waters*, 10, 42-50. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1664233>
- LEWIS, B. L. & LANDING, W. M. (1992). The investigation of dissolved and suspended particulate trace metal fractionation in the Black Sea. *Marine Chemistry*, 40(1-2), 105-141. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(92\)90050-K](https://doi.org/10.1016/0304-4203(92)90050-K)
- LEWIS, W. M., SAUNDERS, J. F. & DUFFORD, R. (1990a). Suspended organisms and biological carbon flux along the lower Orinoco river. En F. H. Weibezahn, H. Alvarez & W. M. Lewis Jr. (Eds.), *El Río Orinoco como Ecosistema* (pp. 269-300). Editorial Galac SA. <https://acortar.link/h7WKbb>
- LEWIS, W. M., WEIBEZAHN, F. M., SAUNDERS, J. F. & HAMILTON, S. K. (1990b). The Orinoco River as an ecological system. *Interciencia*, 75(6), 346-357. <https://acortar.link/iLkI9L>
- LI, S., XU, S., SONG, K., KUTSER, T., WEN, Z., LIU, G., SHANG, Y., LYU, L., TAO, H., WANG, X., ZHANG, L. & CHEN, F. (2023a). Remote quantification of the trophic status of Chinese lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 3581-3599. <https://doi.org/10.5194/hess-27-3581-2023>
- LI, H., ZHOU, J. & ZHANG, M. (2023b). Regime of fluvial phosphorus constituted by sediment. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1093413. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1093413>
- LIANG, J., YAN, M., ZHU, Z., LU, L., DING, J., ZHOU, Q., GAO, X., TANG, N., LI, S., LI, X. & ZENG, G. (2024). The role of microorganisms in phosphorus cycling at river-lake confluences: Insights from a study on microbial community dynamics. *Water research*, 268, 122556. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122556>
- LIU, D., LI, X., QIAO, Q., BAI, L., LU, Z., ZHANG, Y. & LU, C. (2024). Assessment of phosphorus pollution and phosphorus release mechanisms of sediment in the Tuojiang River, Southwest China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101635. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101635>

- LIU, J., YU, Y., LIU, M. & LIU, X. (2025). A review of phosphorus in river floodplains: Source or sink? *Hydroecology and Engineering*, 2, 10001. <https://doi.org/10.70322/hee.2025.10001>
- MANNING, D. W., ROSEMOND, A. D., BENSTEAD, J. P., BUMPERS, P. M. & KOMINOSKI, J. S. (2020). Transport of N and P in U.S. streams and rivers differs with land use and between dissolved and particulate forms. *Ecological Applications*, 30(6), e02130. <https://doi.org/10.1002/eap.2130>
- MÁRQUEZ, A., SENIOR, W., MARTÍNEZ, G., CASTAÑEDA, J. & GONZÁLEZ, Á. (2008). Concentraciones de metales en sedimentos y tejidos musculares de algunos peces de la Laguna de Castellero, Venezuela. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia*, 18(2), 121–133. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/cientifica/article/view/15348>
- MÁRQUEZ, A. & LEMUS, A. (2020). Riesgos ambientales por metales pesados en los sedimentos del río Orinoco. En D. Rodríguez Olarte (Ed.), *Ríos en Riesgo de Venezuela* (Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela, Vol. III., pp. 57-76). Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). <https://acortar.link/kOTcFk>
- MEYERS, P. A. (1994). Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289–302. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)
- MILLIMAN, J. D. & MEADE, R. H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1086/628741>
- MOGANE, L. K., MASEBE, T., MSAGATI, T. A. & NCUBE, E. (2023). A comprehensive review of water quality indices for lotic and lentic ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 926. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11512-2>
- MORA, A., LARAQUE, A. & LÓPEZ, J. L. (2017). El Bajo Orinoco: aspectos hidrosedimentológicos, geoquímicos e influencia antrópica. En D. Rodríguez Olarte (Ed.), *Ríos en riesgo de Venezuela* (Vol. 1, pp. 109-126). Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). <https://acortar.link/dVKJTM>
- MUDROCH, A. & AZCUE, J. M. (1995). *Manual of aquatic sediment sampling*. Lewis Publishers.
- MULLIN, J. & RILEY, J. (1955). The spectrophotometric determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Analytica Chimica Acta*, 12, 162-170.
- MURPHY, J. & RILEY, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- NEILL, C., DEEGAN, L. A., THOMAS, S. M. & CERRI, C. C. (2001). Deforestation for pasture alters nitrogen and phosphorus in small amazonian streams. *Ecological Applications*, 11(6), 1817–1828. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1817:DFPANA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1817:DFPANA]2.0.CO;2)
- NEUMANN, K., JOHN, C., ATGER, T., PUNU, T., HOLLARSMITH, J. A. & BURKEPILE, D. E. (2025). Land use shapes riverine nutrient and sediment concentrations on Moorea, French Polynesia. *Scientific Reports*, 15, 27948. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13425-1>
- OPENAI. (2025, 15 de junio). *ChatGPT* (Versión 4.0) [Modelo grande de lenguaje]. <https://Chat.openai.com>
- PÁEZ-OSUNA, F., FONG-LEE, M. L. & FERNÁNDEZ-PÉREZ, H. (1984). Comparación de tres técnicas para analizar materia orgánica en sedimentos. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 11, 257–264.
- PENG, Y., TIAN, C., CHI, M. & YANG, H. (2019). Distribution of phosphorus species and their release risks in the surface sediments from different reaches along Yellow River. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 28202–28209. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06026-9>
- PRIMO, E. & CARRASCO, J. M. (1973). *Química agrícola I. Suelos y fertilizantes*. Alhambra S.A
- RAMASWAMY, V., GAYE, B., SHIRODKAR, P. V., RAO, P. S., CHIVAS, A. R., WHEELER, D. & THWIN, S. (2008). Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic signatures in sediments from the Ayeyarwady (Irrawaddy) continental shelf, northern Andaman Sea. *Marine Chemistry*, 111, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.04.006>
- REDDY, K. R. & DELAUNE, R. D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: Science and applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203491454>
- REDDY, K. R., KADLEC, R. H., FLAIG, E. & GALE, P. M. (1999). Phosphorus retention in streams and wetlands: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1), 83-146. <https://doi.org/10.1080/1064338991259182>
- REDFIELD, A. C., KETCHUM, B. H. & RICHARDS, F. A. (1963). The Influence of Organisms on the Composition of Sea-water. En M. N. Hill (Ed.), *The sea* (Vol. 2, pp. 26–77.). Harvard University Press.
- ROA, P. & BERTHOIS, L. (1975). *Manual de sedimentología: métodos para el estudio de los sedimentos y no consolidados*. Universidad Central de Venezuela.
- RUTTENBERG, K. C. (1992). Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography*, 37(7), 1460-1482. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.7.1460>
- SAVENKO, V. S. & SAVENKO, A. V. (2022). The Main Features of Phosphorus Transport in World Rivers. *Water*, 14, 16. <https://doi.org/10.3390/w14010016>
- SHOU, C-Y., YUE, F-J., ZHOU, B., FU, X., MA, Z-N., GONG, Y-Q. & CHEN, S-N. (2024). Chronic increasing nitrogen and endogenous phosphorus release from sediment threaten to the water quality in a semi-humid region reservoir. *Science of the Total Environment*, 931, 172924. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172924>
- SINGH, P. & YADAV, B. (2025). Seasonal eutrophication in lentic small waterbodies: Understanding nutrients-chlorophyll-a relationships and implications. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100563>
- SØNDERGAARD, M., JENSEN, J. P. & JEPPESEN, E. (2003). Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiology*, 506, 135–145. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008611.12704.dd>
- STRICKLAND, J. D. H. & PARSONS, T. R. (1972). *A practical Handbook of seawaters Analysis* (Bulletin 167, 2ª ed.). Fisheries Research Board of Canada. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791>

- SUMAN, A., ANUJA P. K. & ADARSH, S. (2023). Development and prediction of a robust multivariate trophic state index for the classification of lentic water bodies. *Results in Engineering*, 20, 101586. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101586>
- SUTULA, M., BIANCHI, T. S. & MCKEE, B. A. (2004). Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography*, 49(6), 2223–2235. <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.4319/lo.2004.49.6.2223>
- TAMMEORG, O., NÜREMBERG, G., HORPPILA, J., HALDNA, M. & NIEMISTÖ, J. (2020). Redox-related release of phosphorus from sediments in large and shallow Lake Peipsi: Evidence from sediment studies and long-term monitoring data. *Journal of Great Lakes Research*, 46, 1595–1603. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.08.023>
- TIAN, J., DONG, G., KARTHIKEYAN, R., LI, L. & HARMEL, R. D. (2017). Phosphorus dynamics in long-term flooded, drained, and reflooded soils. *Water*, 9, 531. <https://doi.org/10.3390/w9070531>
- TOLEDO JÚNIOR, A. P., TALARICO, M., CHINEZ, S. J. & AGUDO, E. G. (1983). The application of simplified models for the evaluation of the process of eutrophication in tropical lakes and reservoirs. En *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- TONELLO, M. S., HEBNER, T. S., STERNER, R. W., BROVOLD, S., TIECHER, T., BORTOLUZZI, E. C. & MERTEN, G. H. (2020). Geochemistry and mineralogy of southwestern Lake Superior sediments with an emphasis on phosphorus lability. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 1060–1073. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02420-5>
- TREGUER, P. & LE CORRE, P. (1975). *Manual d'analyses des sels nutritifs dans l'eau demer. Utilization de l'Auto-Analyser II. Technicon R* (2ª ed.). LOC-UBO.
- TU, C., JIN, Z., CHE, F., CAO, X., SONG, X., LU, C. & HUANG, W. (2022). Characterization of phosphorus sorption and microbial community in lake sediments during overwinter and recruitment periods of cyanobacteria. *Chemosphere*, 307, 135777. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135777>
- VALDERRAMA, J. C. (1981). The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry*, 10, 109–122. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(81\)90027-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-X)
- VÁSQUEZ, E. & WILBERT, W. (1992). The Orinoco: Physical, biological and cultural diversity of major tropical alluvial river. En P. Calow & G. E. Petts (Eds.), *The Rivers Handbook* (Vol. 1, pp. 448–471). Blackwell Scientific Publications.
- VOGEL, A. I. (1989). *Textbook of Practical Organic Chemistry* (5ª ed.). Longman Scientific & Technical. <https://acortar.link/5FYIyY>
- WALCH, H., VON DER KAMMER, F. & HOFMANN, T. (2022). Freshwater suspended particulate matter - Key components and processes in floc formation and dynamics. *Water Research*, 220, 118655. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118655>
- WALKLEY, A. & BLACK, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- WAN, J., YUAN., X., HAN, L., YE, H. & YANG, X. (2020). Characteristics and distribution of organic phosphorus fractions in the surface sediments of the inflow rivers around Hongze Lake, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 648. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020648>
- WANG, L., LI, Q., ZOU, H. & ZHOU, Y. (2013). Phosphorus speciation in wetland sediments of Zhujiang (Pearl) River Estuary, China. *Chinese Geographical Science*, 23(5), 574–583. <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0627-4>
- WANG, Z., HUANG, S. & LI, D. (2019). Decomposition of cyanobacterial bloom contributes to the formation and distribution of iron-bound phosphorus (Fe-P): Insight for cycling mechanism of internal phosphorus loading. *Science of the Total Environment*, 652, 696–708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.260>
- WEI, M-Z., LIU, J-W., YANG, Q-Z., XUE, A., WU, H., NI, J-R., WINTER, L. R., ELIMELECH, M. & ZHAO, H-Z. (2022). Denitrification mechanism in oxygen-rich aquatic environments through long-distance electron transfer. *Clean Water*, 5, 61. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00205-x>
- WEIBEZAHN, F. H., ALVAREZ, H. & LEWIS, W. M. (Eds.). (1990). *El Río Orinoco como Ecosistema*. Editorial Galac SA. <https://acortar.link/h7WKbb>
- WETZEL, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3ª ed.). Academic Press. <https://acortar.link/AOjeNt>
- WU, X., WANG, Y., JIAO, L., HE, J., ZHOU, H. & HAO, Z. (2025). Influencing factors of phosphorus mobility and retention in the sediment of three typical plateau lakes. *Toxics*, 13, 120. <https://doi.org/10.3390/toxics13020120>
- XIAO, J., CHEN, X., ZHOU, L., ZHANG, H., HANG, X. & CHEN, Y. (2025). Nutrient distribution characteristics and eutrophication evaluation of coastal water near the Yellow river estuary, China. *Water*, 17, 2469. <https://doi.org/10.3390/w17162469>
- XU, X., WENG, N., ZHANG, H., VAN DE VELDE, S., HERMANS, M., WU, F. & HUO, S. (2023). Cable bacteria regulate sedimentary phosphorus release in freshwater sediments. *Water Research*, 242, 120218. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120218>
- YANG, D., WANG, D., CHEN, S., DING, Y., GAO, Y., TIAN, H., CAI, R., YU, L., DENG, H. & CHEN, Z. (2021). Denitrification in urban river sediment and the contribution to total nitrogen reduction. *Ecological Indicators*, 120, 106960. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106960>
- YU, W., YANG H., CHEN, J., LIAO, P., CHEN, Q., YANG. Y. & LIU, Y. (2022). Organic phosphorus mineralization dominates the release of internal phosphorus in a macrophyte-dominated eutrophication lake. *Frontiers in Environmental Sciences*, 9, 812834. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.812834>
- ZHANG, F., XUE, B., CAI, Y., XU, H. & ZOU, W. (2023). Utility of trophic state index in lakes and reservoirs in the Chinese Eastern Plains ecoregion: The key role of water depth. *Ecological Indicators*, 148, 110029. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110029>
- ZHANG, G. W., JIN, X., ZHU, X. & SHAN, B. (2016). Characteristics and distribution of phosphorus in surface sediments of

- limnetic ecosystem in Eastern China. *PLoS ONE*, 11(6), e0156488. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156488>
- ZHANG, Y., SONG, C., JI, L., LIU, Y., XIAO, J., CAO, X. & ZHOU, Y. (2018). Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 627, 1294-1302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.327>
- ZHANG, Y., ZHANG, D., LI, Y., HAN, X., WANG, X., ZHANG, J., GU, K., SUN, S., LIU, Q. & Lv, J. (2025). Spatiotemporal dynamics of nitrogen and phosphorus in the water and sediment from the source reservoir of the Mid-Route of China's South-to-North Water Diversion Project. *Water*, 17, 1824. <https://doi.org/10.3390/w17121824>
- ZHENG, Z., WANG, X., JIN, J., HAO, J., NIE, Y., CHEN, X., MOU, J., EMSLIE, S. D. & LIU, X. (2022). Fraction distribution and dynamic cycling of phosphorus in lacustrine sediment at Inexpressible Island, Antarctica. *Environment international*, 164, 107228. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107228>
- ZHUO, T., HE, L., CHAI, B., ZHOU, S., WAN, Q., LEI, X., ZHOU, Z. & CHEN, B. (2023). Micro-pressure promotes endogenous phosphorus release in a deep reservoir by favouring microbial phosphate mineralization and solubilisation coupled with sulphate reduction. *Water Research*, 245, 120647. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120647>

Declaración de uso de Inteligencia Artificial

Durante la preparación de esta investigación, se utilizó ChatGPT para efectuar la figura 6. Después de utilizar esta herramienta, como autores, editamos, revisamos y aprobamos el resultado final, asumiendo la total responsabilidad por el contenido de la publicación.