

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**  
**Departamento de Ambiente y Desarrollo**  
**Ingeniería en Ambiente y Desarrollo**



**Proyecto Especial de Graduación**  
**Análisis de flujos de nutrientes entre agua y sedimento en la laguna**  
**Monte Redondo de la Estación de Acuicultura “Daniel E. Mayer” en**  
**Zamorano**

Estudiante

Sara Stephannie Sandoval Morán

Asesores

Erika Alejandra Tenorio Moncada, M.Sc.

Patricio Enrique Paz Castillo, Ph.D.

Lourdes Susana Espinal Cabrera, Ing.

Honduras, agosto 2024

**Autoridades**

**SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO**

Rector

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**VICTORIA CORTÉS MATAMOROS**

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

**HUGO ZAVALA MEMBREÑO**

Secretario General

**Contenido**

Índice de Cuadros.....	4
Índice de Figuras .....	5
Índice de Anexos.....	7
Resumen .....	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Metodología.....	13
Área de Estudio.....	13
Diseño del Estudio .....	14
Etapla 1. Selección de los Puntos de Muestreo.....	15
Etapla 2. Recolección de Datos In Situ y Muestras para Determinar Calidad del Agua .....	16
Etapla 3. Recolección De Muestras De Sedimento.....	17
Etapla 4. Desarrollo Experimental Ex Situ de las Muestras Recolectadas.....	18
Resultados y Discusión.....	23
Parámetros Iniciales del Perfil de Calidad de Agua.....	23
Comparación de Nutrientes de la Laguna entre Sitios en el Experimento <i>ex situ</i> .....	27
Fósforo Total (PT).....	27
Nitrógeno Total (NT) .....	33
Flujos de Nutrientes entre Sedimento y Columna de Agua.....	36
Fósforo .....	36
Nitrógeno .....	40
Conclusiones .....	46
Recomendaciones.....	47
Referencias.....	48
Anexos.....	53

### Índice de Cuadros

Cuadro 1 Resumen de los parámetros de calidad de agua en acuicultura.....	17
Cuadro 2 Nomenclatura para la identificación de muestras de sedimentos .....	18
Cuadro 3 Resumen de parámetros y métodos de análisis .....	19
Cuadro 4 Parámetros de Calidad de Agua en los Tres Puntos de Muestro .....	23
Cuadro 5 Promedio y desviación estándar para cada nutriente medido en los tres puntos de la laguna .....	25
Cuadro 6 Resumen de los flujos puntuales y acumulados ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) de fósforo total (NT) y fosfatos en los tres puntos de muestreo .....	37
Cuadro 7 Resumen de los flujos puntuales y acumulados ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) de nitrógeno total (NT) y nitratos en los tres puntos de muestreo. ....	41

## Índice de Figuras

Figura 1 Mapa del área de estudio en la laguna de Monte Redondo, en la Estación de Acuicultura “Daniel E. Meyer” .....	13
Figura 2 Metodología empleada para determinar la calidad de agua y los flujos de nutrientes en la laguna.....	15
Figura 3 Esquema de los factores que aportan nutrientes y puntos de muestreo en la laguna Monte Redondo.....	16
Figura 4 Representación experimental de la nomenclatura para el ensayo ex situ de flujo de nutrientes .....	19
Figura 5 Evolución de las concentraciones de Fósforo Total en la columna de agua de laguna sobre el sedimento .....	28
Figura 6 Evolución de las concentraciones de fósforo total con agua destilada sobre el sedimento de muestras A con agua de laguna .....	30
Figura 7 Evolución de la concentración de fosfatos en la columna de agua de la laguna sobre el sedimento de muestra A con agua de laguna .....	30
Figura 8 Evolución de la concentración de fosfatos en la columna de agua destilada sobre el sedimento de muestra B con agua destilada .....	31
Figura 9 Evolución del ensayo experimental durante las 5 semanas en el punto 2 (producción de tilapia) .....	32
Figura 10 Evolución de la concentración de nitrógeno total en la columna de agua entre el sedimento de muestras A con agua de laguna .....	33
Figura 11 Evolución de las concentraciones de nitrógeno total en la columna de agua entre sedimento de muestras B con agua destilada .....	34
Figura 12 Evolución de la concentración de nitratos en la columna de agua entre el sedimento de muestras A con agua de la laguna .....	35

Figura 13 Evolución de la concentración de nitratos en la columna de agua entre el sedimento de muestras B con agua destilada .....	36
Figura 14 Resultados de los flujos puntuales de fósforo (izquierda) y flujos acumulados (derecha) $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ en el punto 2 a lo largo del estudio.....	38
Figura 15 Resultados de los flujos puntuales de fósforo (izquierda) y flujos acumulados (derecha) $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ en el punto 1 a lo largo del estudio.....	39
Figura 16 Resultados de los flujos puntuales de fósforo (izquierda) y flujos acumulados (derecha) $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ en el punto 3 a lo largo del estudio.....	40
Figura 17 Resultados de los flujos puntuales de nitrógeno (izquierda) y flujos acumulados (derecha) $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ en el punto 2 a lo largo del estudio.....	42
Figura 18 Resultados de los flujos puntuales de nitrógeno (izquierda) y flujos acumulados (derecha) $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ en el punto 1 a lo largo del estudio.....	43
Figura 19 Resultados de los flujos puntuales de nitrógeno (izquierda) y flujos acumulados (derecha) $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ en el punto 3 a lo largo del estudio.....	44

### Índice de Anexos

Anexo A Datos de la semana de muestreo para evaluar las condiciones ambientales de temperatura .....	53
Anexo B Gráfica de T (°C) del ensayo experimental .....	54
Anexo C Resumen de las concentraciones de nutrientes del sedimento.....	55
Anexo D Comparación del punto 2 con los factores asociados a los cambios en el tiempo .....	56

## Resumen

Las lagunas desempeñan un papel clave en la acuicultura, y la calidad de su agua es fundamental para asegurar su producción óptima. Esta calidad está influenciada por diversos factores, como el aporte de nutrientes de tributarios, las condiciones climáticas, los niveles de escorrentía, la cantidad de alimento suministrado y la densidad de los organismos presentes. Entre los principales factores que afectan la calidad del agua se encuentran la carga de nutrientes, en particular el nitrógeno y el fósforo, cuyas variaciones pueden estar relacionadas con la gestión de la laguna. Esta investigación se centró en analizar los flujos de nitrógeno y fósforo, tanto en el agua como en los sedimentos, mediante un enfoque experimental *ex situ*. Se establecieron tres puntos de muestreo en la laguna de producción acuícola en el campus Zamorano: aguas arriba de la producción, bajo las jaulas de tilapia y aguas abajo de la producción. Los parámetros fisicoquímicos medidos incluyeron temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, fósforo total, fosfatos, nitrógeno total y nitratos. Los resultados mostraron que la producción acuícola influye en la calidad del agua, particularmente en la concentración de nutrientes y en la dinámica de flujos entre sedimentos y columna de agua. Se identificó una mayor concentración de nutrientes en las áreas de producción de tilapia, lo cual sugiere un impacto directo de la acuicultura en el estado trófico de la laguna.

*Palabras clave:* Acuicultura, calidad ecosistémica, contaminación, parámetros ambientales

### **Abstract**

Ponds play a critical role in aquaculture, and water quality is essential for ensuring optimal production. This quality is influenced by several factors, such as nutrient input from tributaries, climatic conditions, runoff levels, the amount of feed supplied, and the density of organisms present. One of the most important factors affecting water quality is nutrient loading, particularly nitrogen and phosphorus, whose variations may be related to lagoon management. For this reason, the research focused on analyzing nitrogen and phosphorus fluxes, both in water and sediments, through an *ex-situ* experimental approach. Three sampling points were established in the aquaculture production lagoon at the Zamorano campus: upstream of the production, under the tilapia cages, and downstream of the production. The physicochemical parameters measured included temperature, pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, total phosphorus, phosphates, total nitrogen, and nitrates. The results showed that aquaculture production affects water quality, particularly in the concentration of nutrients and the dynamics of flows between sediments and the water column. A higher nutrient concentration was found in the tilapia production areas, suggesting a direct impact of aquaculture on the trophic state of the lagoon.

*Keywords:* Aquaculture, ecosystem quality, environmental parameters, pollution

## Introducción

Las lagunas son cuerpos de agua que se originan a partir de ríos o arroyos y desempeñan un papel importante en la acuicultura (Moreno-Otero, 1948). La calidad de agua de estas asegura la eficacia de la producción (Yossa et al., 2012). Esta calidad también está directamente influenciada por su fuente de abastecimiento, la cual a su vez, está sujeta a diversos factores como el flujo del agua, las condiciones climáticas, la profundidad, el volumen y la escorrentía superficial. En lagunas utilizadas para producción acuícola, la calidad de agua se ve afectada por las cantidades de alimento suministradas y la densidad de organismos presentes generando interacciones complejas en el agua. Estas dinámicas se evalúan mediante una serie de parámetros, incluyendo el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, la temperatura y las cargas de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Guerra-Silveira et al., 2013).

La carga de nutrientes en las lagunas de acuicultura varía ampliamente debido a factores como el manejo y tratamiento. Mantener un equilibrio entre la autotrofia y la heterotrofia es fundamental para garantizar la calidad del agua (Valenzuela-Siu et al., 2007). La temperatura y la intensidad de la luz también influyen en la productividad natural de los organismos acuáticos (Ruiz-Velazco et al., 2007). La carga de nitrógeno y fósforo en estas lagunas, derivada de la producción de peces, puede parecer diluida, pero contribuye a la contaminación. Además, sólidos, materia orgánica (MO) en forma de partícula y disuelta, junto con materia inorgánica disuelta, tienden a depositarse gradualmente en el sedimento y a ser contaminantes potenciales (Chaux-F. et al., 2013; Navas et al., 2003).

En lagunas tropicales costeras, el nitrógeno y fósforo se encuentran mayormente como iones nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ , dependiendo del pH) (Navas et al., 2003). Estos compuestos, al aumentar por las actividades humanas, comprometen el sistema, ya que se desequilibra y pierde la capacidad de asimilación, contribuyendo a una carga interna desde los sedimentos hacia la columna de agua. Esto ocasiona condiciones de eutrofización, las cuales comprometen significativamente la calidad de las aguas en lagos, embalses y lagunas, provocando la

proliferación de cianobacterias sobre otras especies acuáticas (Barbosa et al., 2019; Guerrini-Montemurro, 2017).

La eutrofización se refiere al proceso por el cual los ecosistemas acuáticos, como lagos y lagunas, se enriquecen excesivamente con nutrientes debido a actividades humanas. Esto estimula un crecimiento de algas y otros productores primarios, aumentando la biomasa más allá de los niveles naturales. Como resultado, se reduce la transparencia del agua, se generan olores y sabores desagradables, y pueden aparecer potenciales toxinas (Guerrini-Montemurro, 2017). A pesar que este fenómeno ocurre de manera natural sin la intervención humana, es necesario implementar medidas para que estos procesos no representen una amenaza a la calidad de agua, ecosistemas acuáticos y la salud humana (Ribes-Bargues, 2022).

Una mejor comprensión de las fuentes, la estacionalidad y la interacción entre los nutrientes en los sedimentos y la columna de agua se logra mediante el análisis de flujos, con el fin de asegurar la sostenibilidad ambiental y la producción acuícola (Jiménez-Sales, 2008; Ribes-Bargues, 2022; Tovilla-Hernández y Lanza-Espino, 2001). El flujo de nutrientes es el intercambio activo de compuestos como nitrógeno y fósforo entre sedimentos y la columna de agua en cuerpos acuáticos eutróficos o hipertrofiados, donde los sedimentos no solo almacenan nutrientes, sino que los pueden liberar o absorber dependiendo de los procesos naturales o influencias humanas (Ribes-Bargues, 2022).

El estudio pretende evaluar la calidad del agua de la estación de Acuicultura en Zamorano y describir la interacción de nutrientes entre los sedimentos y la columna de agua entre puntos relacionados con la producción de tilapia. Este análisis se realizó en diferentes sitios de la laguna, incluyendo el área bajo las jaulas de producción y áreas aguas-arriba y aguas-abajo de la producción, para comprender mejor el impacto potencial de estas prácticas en la dinámica de nutrientes en la laguna.

Para lograr este propósito, el estudio tuvo los siguientes objetivos específicos: Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y las concentraciones de nutrientes en la laguna durante la época seca,

comparar nutrientes de la laguna entre sitios con y sin producción precedentes de tilapia y determinar los flujos de nutrientes *ex situ* entre el sedimento y la columna de agua en laboratorio.

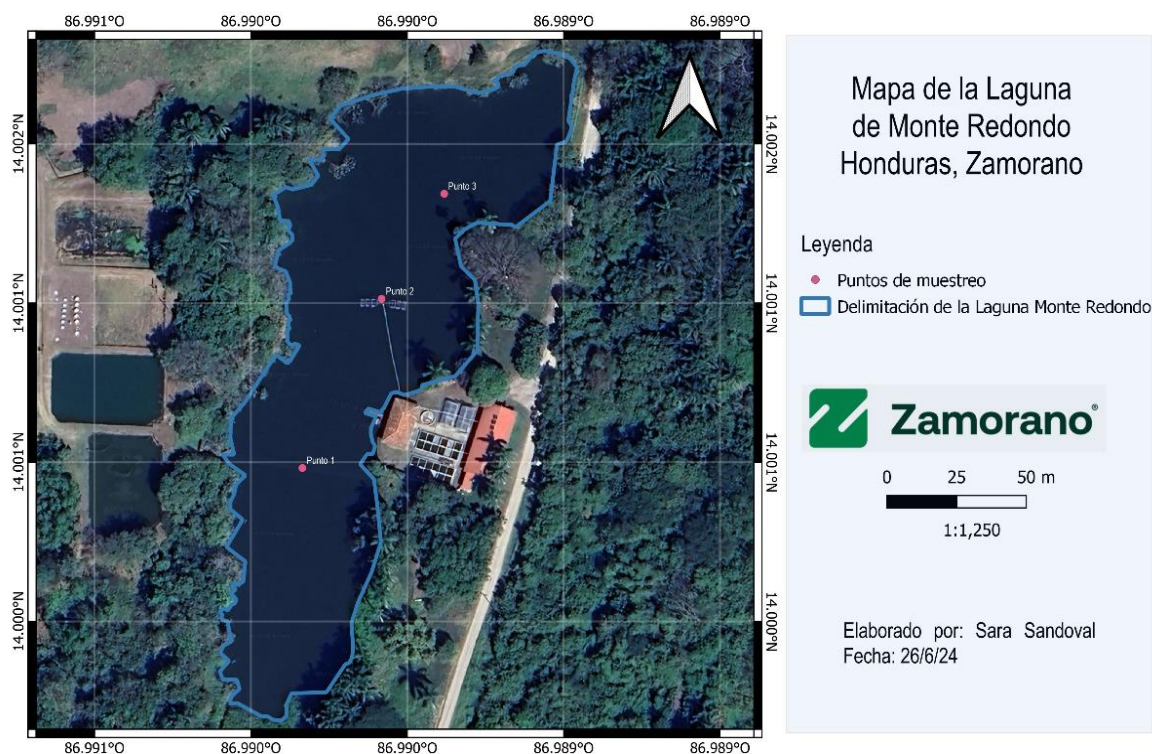
## Metodología

### Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la Laguna de Monte Redondo de la Estación de Acuacultura “Daniel E. Meyer” de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (Figura 1), en el municipio de San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras. La laguna se ubica a una altitud de 800 msnm y presenta un clima tropical seco con una temperatura promedio de 24 °C y una precipitación anual media de 1,100 mm principalmente distribuidos entre los meses de mayo a noviembre y un periodo seco de diciembre hasta abril. La Laguna tiene un área de 12,000 m<sup>2</sup> y una profundidad que varía, manteniéndose a una profundidad de menos de 2 m en toda su extensión. Las muestras de agua y sedimento obtenidas fueron procesadas y analizadas en el laboratorio del departamento de Ambiente y Desarrollo, Zamorano.

### Figura 1

*Mapa del área de estudio en la laguna de Monte Redondo, en la Estación de Acuacultura “Daniel E. Meyer”*



## Diseño del Estudio

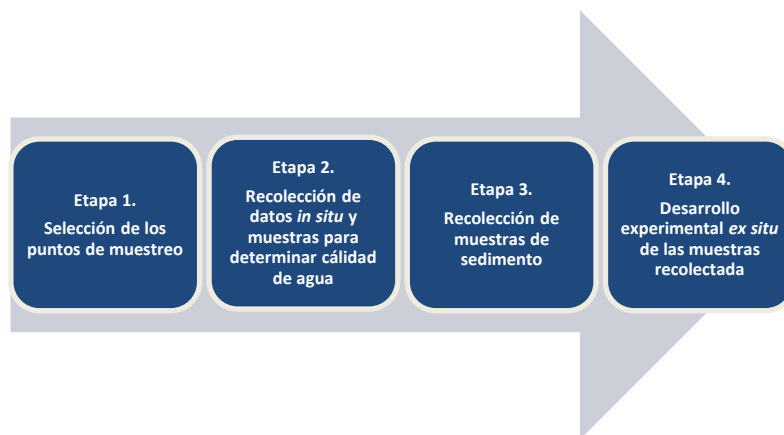
El estudio adoptó un enfoque explicativo que integró disciplinas como limnología, ecología acuática, química del agua y estadística para evaluar las características de los nutrientes en la laguna. En primer lugar, se realizó un análisis de los factores fisicoquímicos internos de la laguna con el objetivo de determinar la calidad del agua y cuantificar la cantidad de nutrientes presentes, así como su contribución al estado trófico de la laguna.

En conjunto, se llevó a cabo un ensayo *ex situ* en el laboratorio para calcular las concentraciones y el flujo de nutrientes (nitrógeno y fósforo), evaluando la interacción entre el sedimento y la columna de agua en condiciones naturales en laboratorio. Este ensayo se realizó siguiendo la metodología descrita por Ribes-Bargues (2022).

El diseño experimental dio pauta para la interpretación de los resultados obtenidos y la comprensión de cómo ciertos factores pueden afectar los valores observados en este tipo de laguna. Esta investigación es de gran relevancia debido a la importancia crítica de la Estación de Acuicultura “Daniel E. Meyer” en Zamorano. Por lo tanto, es crucial comprender y mantener la calidad del agua para la producción, identificando la variabilidad en los flujos de nutrientes. Además, el interés es comprender las dinámicas para obtener información que permita la regulación de este tipo de sistemas productivos. El estudio se realizó a través de una secuencia de etapas, las cuales se listan en la Figura 2.

**Figura 2**

*Metodología empleada para determinar la calidad de agua y los flujos de nutrientes en la laguna*



### ***Etapa 1. Selección de los Puntos de Muestreo***

Durante un período de dos semanas y a intervalos de dos días, se realizaron mediciones y observaciones en el sitio de estudio y mediciones de parámetros fisicoquímicos en la laguna con el fin de determinar las condiciones de laboratorio durante el ensayo. Entre estos parámetros se incluyeron la temperatura del agua, la temperatura del sedimento y la temperatura ambiente.

Se establecieron tres puntos diferentes en la laguna para el estudio de agua y sedimentos: zona alta antes de la producción, zona de producción (jaulas de tilapia) y zona baja después de producción y previo a la descarga de la laguna al Río Yeguar (Figura 3). Este enfoque permitió comprender la variabilidad de los parámetros en la laguna y, a su vez, determinar que tipos de factores podrían influir en los niveles de nutrientes, tanto internos (alimento y excretas de tilapia) como externos (desechos de los recambios de agua de producción acuícola, desechos de ganado, condiciones climáticas, entre otros).

Figura 3

Esquema de los factores que aportan nutrientes y puntos de muestreo en la laguna Monte Redondo



### **Etapa 2. Recolección de Datos In Situ y Muestras para Determinar Calidad del Agua**

En cada sitio seleccionado se utilizó un medidor multiparámetro PCTSTestr™ 50 de Oakton y un oxímetro Pro20 de YSI™ para medir el pH, la concentración de oxígeno disuelto (OD) en mg/L y como saturación de oxígeno (SO) en %, conductividad eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), salinidad (ppt), temperatura del agua y temperatura ambiental ( $^{\circ}\text{C}$ ). Se registró la profundidad de la laguna en cada sitio en metros. Asimismo, se tomaron muestras de agua durante el ensayo *ex situ* para ser medidos y comparados con las normativas y recomendaciones para la producción acuícola (Cuadro 1).

**Cuadro 1***Resumen de los parámetros de calidad de agua en acuicultura*

Parámetro	Rango			Unidad
	Mínimo	Óptimo/Bueno	Máximo	
Calado de la Columna de Agua				m
Potencial de Hidrogeno (pH) <sup>a,b,h</sup>	6	6.5 a 8.0	9	
Oxígeno Disuelto <sup>d,e</sup>	2	>3.5		mg/L
Temperatura <sup>a,e,h</sup>	14	28 a 32	36	°C
Conductividad Eléctrica <sup>g</sup>		250		µs/cm
Salinidad <sup>f</sup>	0 a 36	5 a 12		ppt
Fósforo Total (PT) <sup>c</sup>	0.3		0.5	mg/L
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) <sup>i</sup>	0.15		0.2	mg/L
Nitrógeno Total <sup>c</sup>	0.025		0.075	mg/L
Nitratos <sup>i</sup>	1.5 a 2			mg/L

*Nota.* Tomado de Boyd (2019)<sup>a</sup>; Secretaria de salud (2001)<sup>b</sup>; Dodds et al. (1998)<sup>c</sup>; García-Ortega y Calvario-Martínez (2008)<sup>d</sup>; Guerrero. M (s.f.)<sup>e</sup>; Hsien-Tsang y Quintanilla (2008)<sup>f</sup>; Jiménez-Sales (2008)<sup>g</sup>; Organización del Sector Pesquero y Acuicola del Istmo Centroamericano (2022)<sup>h</sup> y Saavedra Martínez (2006)<sup>i</sup>.

**Etapa 3. Recolección de Muestras de Sedimento**

Se recolectaron muestras de sedimento en los tres puntos en la laguna de la Estación de Acuicultura “Daniel E. Meyer” utilizando el equipo de Draga Ekman<sup>TM</sup>. La columna de sedimento fue aproximadamente de unos 15 cm en los tres puntos con la draga. Una vez tomada la muestra, se desechó el agua sobrenadante para almacenar la muestra en botellas de 1 L oscuras de polietileno asegurando que el sedimento no se derramara ni se mezclara. Se tomaron dos muestras en cada punto obteniendo así un total de seis muestras (Ribes-Bargues, 2022). En cada punto designado, se hicieron mediciones adicionales de agua *in situ* y la extracción de muestras de sedimento. Estas mediciones incluyeron los parámetros de la etapa 2. Simultáneamente se recolectaron muestras de agua en los puntos establecidos, tomando un aproximado de 1 L en cada muestra. Estas muestras, se utilizaron para la reposición de agua en el ensayo, se etiquetaron con la fecha y el lugar de muestro, y se almacenaron en botellas oscuras de polietileno. Todas las muestras se transportaron en una hielera al Laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de Ambiente y Desarrollo, donde se hicieron los análisis correspondientes.

#### ***Etapa 4. Desarrollo Experimental Ex Situ de las Muestras Recolectadas***

##### **Metodología para el Análisis del Flujo de Nutrientes.**

Para la evaluación de nutrientes *ex situ* entre el sedimento y la columna de agua el análisis se dividió en tres fases: *Fase 1*, correspondiente al montaje del experimento; *Fase 2*, que consistió en la extracción de muestras y medición de parámetros; y *Fase 3*, consistió en analizar las muestras y realizar los cálculos para conocer el flujo de nutrientes. Para cada punto de muestreo se establecieron dos ensayos: uno con muestras de sedimento con agua de laguna y otro con muestras de sedimento con agua destilada, con el fin de separar la influencia de los nutrientes de la columna de agua de los aportados por los sedimentos, por lo tanto, se contó con un total de seis réplicas con la siguiente nomenclatura.

#### **Cuadro 2**

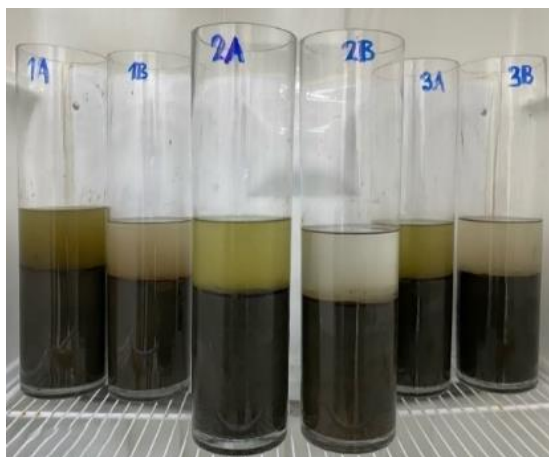
*Nomenclatura para la identificación de muestras de sedimentos*

Punto de muestro	Identificación	Descripción
1	1 A	Sedimento más agua de laguna
	1 B	Sedimento más agua destilada
2	2 A	Sedimento más agua de laguna
	2 B	Sedimento más agua destilada
3	3 A	Sedimento más agua de laguna
	3 B	Sedimento más agua destilada

***Fase 1. Montaje del experimento.*** Las muestras se sacaron de los botes, se extrajo el agua sobrenadante de todas las muestras de sedimento, y se colocaron en cilindros de vidrio. A estas muestras se les agregó agua de acuerdo con la nomenclatura mencionada anteriormente. Se rotularon de acuerdo con el sitio y recambio: las réplicas "A" de cada punto de muestreo se rellenaron cuidadosamente con 500 ml de agua de la laguna, y las réplicas "B" con 500 ml de agua destilada (Figura 4), y se guardaron en una incubadora donde la temperatura se tomó durante las 5 semanas con un sensor RC-51H™ (Anexo B).

**Figura 4**

*Representación experimental de la nomenclatura para el ensayo ex situ de flujo de nutrientes*



**Fase 2. Extracción de Muestra y Medición.** A partir del día de montaje, se comenzó a extraer muestra de 100 ml cada tres días del intermedio de la columna de agua y sedimento, utilizando jeringas de 50 ml, para realizar análisis químicos de fósforo total, fosfatos, nitrógeno total y nitratos (Cuadro 3) durante 5 semanas, siguiendo la metodología de (Ribes-Bargues, 2022). Además, se extrajeron 30 ml para medir los parámetros fisicoquímicos justo al obtener la muestra, con el propósito de verificar las concentraciones de nutrientes de la simulación del ecosistema acuático (Cuadro 3). El volumen extraído para los análisis se repuso con la misma cantidad de agua de laguna y destilada.

### **Cuadro 3**

*Resumen de parámetros y métodos de análisis*

Parámetro	Método	Unidad
Fósforo total	Método de Persulfato - LR	mg/L
Nitrógeno total	Método de Persulfato - LR	mg/L
Nitratos	Espectrofotometría Ultravioleta	mg/L
Fosfatos	Azul de Fósforo Molibdeno	mg/L

*Nota.* Tomado de Baird y Eaton (2017).

**Fase 3. Cálculos de Flujo de Nutrientes.** Los flujos de nutrientes, medidos en términos de masa por unidad de superficie y tiempo ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ), se determinaron a través de un balance de materia

aplicado a la columna de agua (Ribes-Bargues, 2022). Este balance consideró las fluctuaciones en la concentración y volumen entre cada medición sucesiva, así como los volúmenes que fueron extraídos y repuestos junto con sus respectivas concentraciones.

El primer cálculo se centró en determinar la masa (mg) del compuesto liberado (S) desde el sedimento hacia la columna de agua. El resultado obtenido por los métodos previamente mencionados proporcionaron la concentración instantánea en la columna de agua para un momento específico. Sin embargo, este dato no se utilizó como resultado final, dado que el volumen de la columna no se mantuvo constante por diversas razones, como: evaporación, filtraciones o la extracción misma de la muestra. La concentración (mg/L) de un soluto o compuesto en la columna de agua en un instante determinado, multiplicada por el volumen (L) que ocupaba dicha columna de agua en ese momento, permitió calcular la masa del soluto ( $M_s$ ) (Ecuación 1).

$$M_s(mg) = [S](mg/L) * V_a(L) \quad [1]$$

Donde:

$M_s$  = masa del soluto (nutriente) instantánea en mg

[S] = concentración del soluto (nutriente) en mg/L

$V_a$  = volumen de agua presente en la columna sobre el sedimento, ya sea proveniente de la muestra, extraída de esta, o añadida como reposición, expresada en litros.

Posteriormente se procedió a calcular la masa del compuesto que fue extraída para análisis. Esta masa se obtuvo una vez conocida la  $M_s$  (mg/L) y el volumen de muestra extraída (L), multiplicando ambos valores (volumen por concentración). El tercer cálculo tuvo como objetivo determinar la masa del compuesto introducida en el agua de reposición de la muestra. Para ello, se analizó el agua de reposición por los métodos mencionados y, una vez conocida la masa del compuesto o soluto que contenía (mg/L), este valor se multiplicó por el volumen (L) de agua introducido en reposición.

Con todos estos datos calculados, se procedió a construir la ecuación del balance de masa para determinar la masa del soluto después de haber extraído la muestra y repuesto el volumen correspondiente (Ecuación 2).

$$M_f = (M_{s(i+1)} - M_{s(i)}) + M_e - M_r \quad [2]$$

Donde (todas las variables en mg):

$M_f$  = masa de soluto fluida después de extraer muestra y reponer con agua de red

$(M_{s(i+1)})$  = masa de soluto en la columna en el instante actual ( $i + 1$ ), es decir, masa del segundo muestreo

$(M_{s(i)})$  = masa de soluto en la columna en el instante anterior ( $i$ ), es decir, masa del primer muestreo

$M_e$  = masa de soluto extraída en la muestra

$M_r$  = masa de soluto introducida en el agua de reposición

Una vez realizado el balance de materia, los flujos puntuales ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ ) de los compuestos se evaluaron mediante las variaciones observadas entre una medición y la siguiente Ecuación 3:

$$F_s = \frac{M_f}{\frac{A}{\Delta t}} \quad [3]$$

Donde:

$F_s$  = flujo de nutrientes puntuales en  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$

$M_f$  = masa de soluto después de extraer muestra y reponer con agua de red en mg

$A$  = sección del tubo utilizando en el ensayo en  $\text{m}^2$

$\Delta t$  = incremento de tiempo transcurrido entre un análisis y el siguiente en este caso en días.

Estos flujos también pueden ser evaluados de manera acumulativa, sumando las masas liberadas en distintos periodos para obtener un valor neto del soluto fluido desde el sedimento hacia la columna de agua (positivo) o desde la columna de agua hacia el sedimento (negativo). Estos valores acumulados se denominan flujos acumulados.

## Resultados y Discusión

### Parámetros Iniciales del Perfil de Calidad de Agua

Se realizaron mediciones fisicoquímicas de la calidad del agua, incluyendo oxígeno disuelto (OD) en mg/L, saturación de oxígeno (SO) en %, temperatura (T) °C, conductividad eléctrica (CE) en  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , pH y salinidad (ppt), en diferentes puntos y profundidades de la laguna. En la Cuadro 4 se puede observar los datos obtenidos el día del primer muestreo en cada punto:

#### Cuadro 4

*Parámetros de calidad de agua en los tres puntos de muestro*

Parámetros	Puntos		
	1	2	3
Profundidad (m)	0.4	1.7	0.5
OD (mg/L)	5	3.9	3.5
Saturación Oxígeno (SO) (%)	62	50	44
T (°C)	26.7	27.1	28.3
CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	252	256	234
pH	8.58	8.67	8.77
Salinidad (ppt)	0.1	0.1	0.1

Al comparar estos valores con los rangos para producción óptima (mínimo siendo 2 mg/L y un óptimo > 3.5 mg/L) de García-Ortega y Calvario-Martínez (2008), se observa que todos los valores de OD (Punto 1 de 5, punto 2 de 3.9 y punto 3 de 3.5 todos mg/L) están en el rango, y constituyen un indicador favorable para el cultivo de tilapia. Sin embargo, en los puntos 1 y 2, la cantidad de OD no es adecuada, ya que al ser menor a 3.5 mg/L afecta el crecimiento para el pez (Rodríguez-Gómez y Ánzola-Escobar, 2001). Las condiciones anaeróbicas son indicadores de baja calidad de agua en ecosistemas acuáticos, ya que sugiere acumulación de amonio y el desarrollo de procesos de nitrificación (Ribes-Bargues, 2022; Yossa et al., 2012).

La expresión del oxígeno en función del porcentaje de saturación ayuda a comprender las concentraciones de oxígeno en el agua con relación a la máxima saturación restringida por la temperatura. Los valores de saturación de oxígeno (SO) están por debajo del rango óptimo. Según Makridis et al. (2015), cuando el SO es menor del 85%, la utilización del alimento comienza a

descender, haciendo que los peces sean más vulnerables a enfermedades y, eventualmente, a la mortalidad. Una saturación menor al 60% incrementa la mortalidad, lo que sugiere que el punto 2, donde se encontraba la producción de tilapia, no era el óptimo al tener una SO de 50%, al igual que el punto 1 a pesar de tener 62%. El bajo porcentaje de saturación de oxígeno indica la presencia de microorganismos que consumen oxígeno a una tasa superior a la normal para oxidar la materia orgánica. Esta actividad microbiana intensa puede crear condiciones adversas para la calidad del agua, generando así zonas anaeróbicas (Fundación Cemex España, 2007).

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), los datos obtenidos indican buena calidad de agua para la producción (Jiménez-Sales, 2011). La temperatura (T) se encuentra dentro del rango aceptable para la producción. Temperaturas fuera de los límites óptimos pueden afectar las condiciones internas de la laguna causando solubilidad de gases, aumento de las tasas de metabolismo y aceleramiento de reacciones químicas (Boyd, 2001). El pH, según varios autores, se encuentra dentro del rango adecuado, pero no en valores óptimos para el crecimiento de la tilapia. En cuanto a la laguna, al tener pH muy bajos o altos inhibe la actividad microbiana, influye en los procesos químicos y biogeoquímicos, y también aumenta la toxicidad de los metales presentes en los sedimentos, ya que un pH bajo puede liberarlos (Guerrini-Montemurro, 2017). Finalmente, la salinidad, según García-Ortega y Calvario-Martínez (2008) y Hsien-Tsang y Quintanilla (2008), está en el rango adecuado para el cultivo de tilapia, pero no en el óptimo.

Los valores críticos observados en los parámetros de calidad del agua de la laguna pueden atribuirse a diversas causas. La baja concentración de oxígeno disuelto, que también puede expresarse como baja saturación de oxígeno, puede ser resultado de una alta carga orgánica en el agua, temperaturas elevadas que reducen la capacidad de retención de oxígeno, o una circulación deficiente que limita la mezcla adecuada del agua y la aeración. Esta baja saturación de oxígeno puede deberse además a una fotosíntesis insuficiente de las plantas acuáticas, una demanda biológica elevada por la descomposición de materia orgánica, o las mismas altas temperaturas que disminuyen la capacidad del agua para retener oxígeno. La temperatura alta puede ser causada por condiciones climáticas

extremas, ubicaciones con temperaturas ambientales elevadas, o falta de sombreado. Las fluctuaciones en el pH y la salinidad pueden ser influenciadas por la descomposición de materia orgánica, la actividad biológica en el agua, o cambios en la composición química del agua que ingresa a la laguna.

En la Cuadro 5 se presenta los promedios y desviaciones estándar de los nutrientes de los muestreos realizados para cada punto de la laguna. Es importante destacar que esta agua se analizó durante 5 semanas, con un intervalo de 6 días, y también se utilizó para los recambios de agua en la parte cuatro de la metodología, con el objetivo de optimizar el tiempo y los recursos disponibles. La cantidad de nutrientes en el agua se mide mediante los niveles de nitrógeno total (NT) y fósforo total (TP), que provienen de fuentes orgánicas e inorgánicas. La descomposición de la materia orgánica en el sedimento, a través de la mineralización reduce el contenido de carbono y libera nutrientes, como nitrato y fósforo, hacia la columna de agua (Avramidis et al., 2015).

#### **Cuadro 5**

*Promedio y desviación estándar para cada nutriente medido en los tres puntos de la laguna*

Parámetros (mg/L)	Puntos		
	1	2	3
Fósforo Total (PT)	1.59 ± 0.64	2.06 ± 0.87	1.23 ± 0.61
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	1.56 ± 0.28	1.85 ± 0.22	1.59 ± 0.27
Nitrógeno Total (NT)	8.78 ± 8.94	11.80 ± 6.61	11.23 ± 5.57
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	2.50 ± 1.21	3.03 ± 0.31	2.38 ± 1.10

*Nota.* Promedio ± D.E.

El fósforo total (PT) en el punto 1 se encuentran entre 0.85 - 2.50 mg/L, mientras que el punto 2 se encuentra en concentraciones de 1 - 3 mg/L. El punto 3 alcanza una concentración de 0.5 - 2 mg/L. Según Boyd (2001), la norma establecida por la Alianza Mundial de Acuicultura para el fósforo total es de 0.5 mg/L, con un objetivo de 0.3 mg/L para evitar la eutrofización. Además, teniendo en cuenta que el rango para considerar en estado eutrófico es de 16-386 µg/L (0.016 - 0.386 mg/L) se puede concluir que la laguna presenta niveles de fósforo total que superan considerablemente los límites. Estos niveles elevados indica que está altamente enriquecido de nutrientes, lo que está contribuyendo a un proceso de eutrofización (Boyd, 2019). La variabilidad en los valores de PT es mayor en el punto

2 y menor en el punto 3. Además, las medias más altas se encuentran en el punto 2, identificando que este punto requiere gestión del nivel de PT.

En cuanto al fosfato, los niveles de concentración en el punto 1 son relativamente constantes, fluctuando entre 1.22 - 1.81 mg/L. En el punto 2, de 1.34 - 2 mg/L y en el punto 3, las concentraciones entre 1.17 - 1.85 mg/L. Según (Saavedra Martínez, 2006), los rangos recomendados para la producción de tilapia son de 0.15 a 0.2 mg/L. Por lo cual, se puede decir que en los tres puntos de la laguna los niveles de fosfato indican contaminación. Esto puede deberse a procesos naturales como la baja precipitación (que en este caso fue casi nula durante el muestreo), la carga de nutrientes proveniente de los recambios de estanques que drenan en la laguna, la sedimentación (ya que los fosfatos pueden absorberse a las partículas sedimentarias y liberarse posteriormente) y la descomposición de materia orgánica, que libera fosfatos, especialmente cuando el oxígeno es limitado (Ribes-Bargues, 2022). En cuanto a la variabilidad es mayor en el punto 1 y menor en el punto 2.

Con relación a las concentraciones de nitrógeno total (NT), el punto 1 se encuentra entre 0.24 - 21.2 mg/L. En el punto 2, entre 5.8 - 25.2 mg/L y en el punto 3 entre 4.8 - 22.4 mg/L. Según Boyd (2019), estos valores indican que la laguna se encuentra en un estado eutrófico, ya que los límites del indicador son 393 - 6,100 µg/L (0.393-6.1 mg/L). Estas condiciones pueden estar relacionadas con la descarga de aguas de recambio y la descomposición de grandes cantidades de materia orgánica, lo que reduce los niveles de oxígeno (Dodds et al., 1998). La desviación estándar determina que hay mayor variabilidad en el punto 1 y menor en el punto 3.

Los nitratos en el punto 1 se encuentran entre 0.44-3.66 mg/L, el punto 2 es de 2.46 - 3.36 mg/L, y el punto 3 entre 0.25 - 3.31 mg/L). El rango aceptable del agua para la producción de tilapia es de 1.5 - 2 mg/L (Saavedra, 2006). En vista de estos rangos, se observa que los puntos 1 y 3 tienen concentraciones de nitratos inferiores al límite inferior recomendado, lo que podría afectar la producción de tilapia. El punto 2, sin embargo, se encuentra dentro del rango aceptable la mayor parte del tiempo, aunque en ocasiones supera ligeramente el límite superior. Estas variaciones pueden atribuirse a factores naturales como la descomposición de materia orgánica y la precipitación.

Además, el constante movimiento de minerales y nutrientes en el agua, y los recambios de agua de los estanques de producción, contribuyen a las fluctuaciones en los niveles de nitratos. La presencia de tilapia y su producción también pueden influir en los niveles de nitratos, ya que los residuos y excreciones de los peces enriquecen el agua con nutrientes (Avramidis et al., 2015). La mayor variabilidad en los resultados fue en el punto 1 y la menor variabilidad fue en el punto

#### **Comparación de Nutrientes de la Laguna entre Sitios en el Experimento *ex situ***

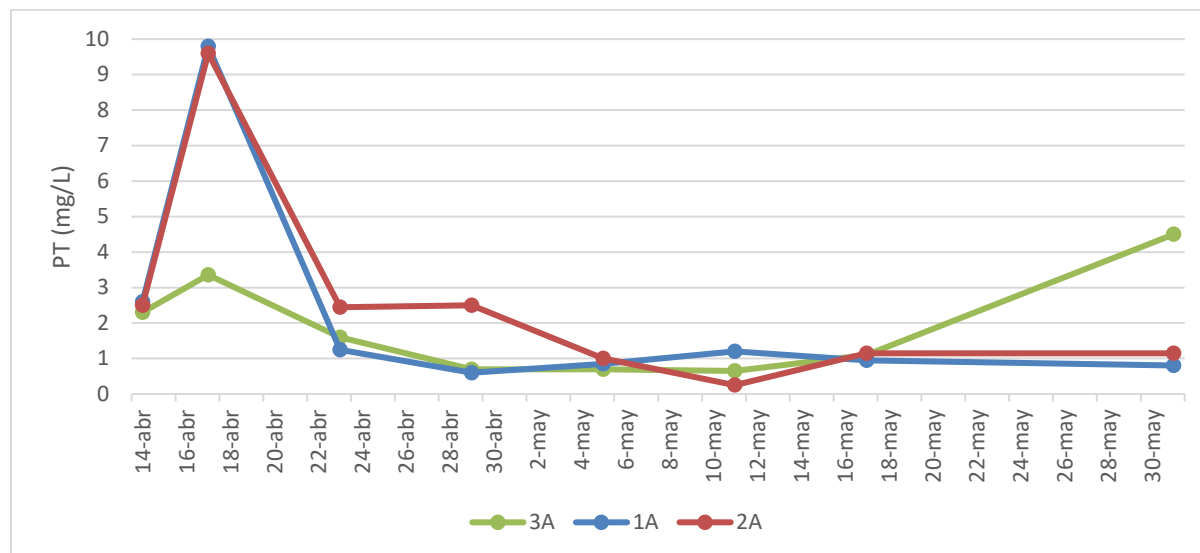
Durante el ensayo de cinco semanas se observaron temperaturas de entre 21.6 - 30.7 °C en el laboratorio con una temperatura promedio de 26.7 °C. A lo largo de este tiempo, se realizaron mediciones de nutrientes y observaciones de los cambios en el sedimento y la columna de agua. En los párrafos posteriores se describirá el comportamiento de los nutrientes en el agua sobrenadante de los sedimentos y posteriormente los resultados del balance de materia para la evaluación de los flujos de nutrientes.

#### ***Fósforo Total (PT)***

La evolución en la concentración de PT durante las 5 semanas de muestreo se representa en la Figura 5, donde se observa una diferencia en los puntos de muestreo. Se observa que el punto 3A es menor que los otros dos puntos muestreados. En los puntos 1 y 2 sus valores comienzan altos y disminuyen con el tiempo tendiendo una tendencia parecida entre ambos, pero la zona 2 tiene mayores concentraciones.

**Figura 5**

*Evolución de las concentraciones de Fósforo Total en la columna de agua de laguna sobre el sedimento*



En las primeras cuatro semanas del experimento se desarrolló una fina capa de algas sobre la superficie del agua y el sedimento, junto con la presencia de microorganismos. Además, se observó desde los primeros días que en el punto 2A, el sedimento se había desplazado desde su posición inicial (marcada durante el montaje), debido a la generación de gases en el sedimento. Según Boyd (2017), el sedimento presenta dos capas: una aeróbica (oxigenada) y una anaeróbica (sin oxígeno), donde los microorganismos descomponen la materia orgánica a través de la fermentación, produciendo gases como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . La expansión del sedimento y la presencia de algas se explica por estos procesos biológicos al interior del sedimento.

Los aportes adicionales de nutrientes derivados de la alimentación y excretas de la producción de tilapia explican los altos valores obtenidos en el punto 2A en comparación con los otros puntos, debido a la actividad microbiana que degrada la materia orgánica y libera P soluble (Wang et al., 2013). Considerando los datos de PT del sedimento, se observa un intercambio entre sedimento y agua, tomando en cuenta que el agua aporta una mayor concentración que el sedimento (Anexo C). Estas condiciones llevaron a que los valores de PT fueran más altos en la zona 2A durante las primeras

semanas, en comparación con las zonas 1A y 3A. A finales de la cuarta semana e inicio de la quinta, se observó un descenso en los valores de PT en los tres puntos, coincidiendo con un cambio en el color del sedimento a negro, indicando condiciones anóxicas como menciona Ribes-Bargues (2022).

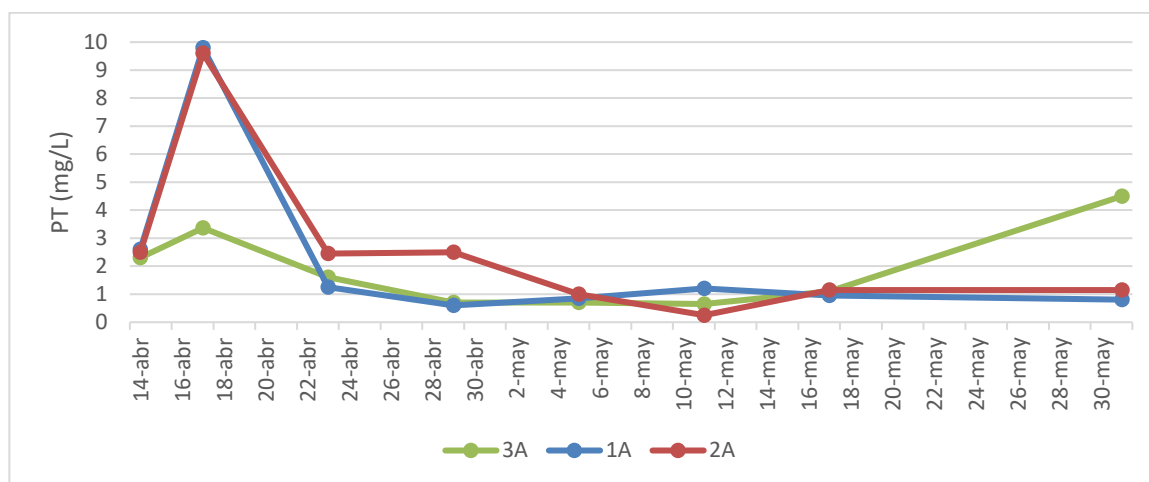
El desplazamiento del sedimento comenzó a disminuir a partir del día doce y a volver a su estado inicial, luego de la formación de una capa aeróbica en la superficie del sedimento (color gris claro), que contribuye a retener fósforo en el sedimento (Ribes-Bargues, 2022). Esta capa aeróbica, al oxidar el hierro presente en el sedimento, aumenta su afinidad por el fósforo, afectando así su movilidad y distribución en los ecosistemas acuáticos (Chowdhury y Bakri, 2006). De acuerdo con Colodro (2012), esa tendencia observada en el punto 2A puede deberse a varios factores, entre ellos el nivel de oxígeno disuelto, la actividad de organismos acuáticos, la descomposición de materia orgánica, y los cambios en el pH y la temperatura.

Se observa que la variación de los factores pH, T° y OD (Anexo D) no está relacionada con el aumento y disminución de la concentración de PT. Por lo tanto, se puede decir, que la presencia de microorganismos, estuvo contribuyendo a la retención de fósforo en el sedimento y que la descomposición de materia orgánica pudo proporcionar una fuente constante de fósforo que luego fue retenido en el sedimento debido a la actividad biológica (Reddy et al., 1999).

Las unidades experimentales cuya agua de reemplazo fue agua destilada, se tiene una tendencia parecida, con la diferencia que, en un momento el punto 1A tuvo un aumento significativo en los primeros 6 días, a comparación de los otros dos puntos que llevaron un comportamiento similar. En este caso, esto demuestra que la concentración y evolución de la concentración de nutrientes se les atribuye exclusivamente a los procesos fisicoquímicos y biológicos del sedimento (Figura 6).

**Figura 6**

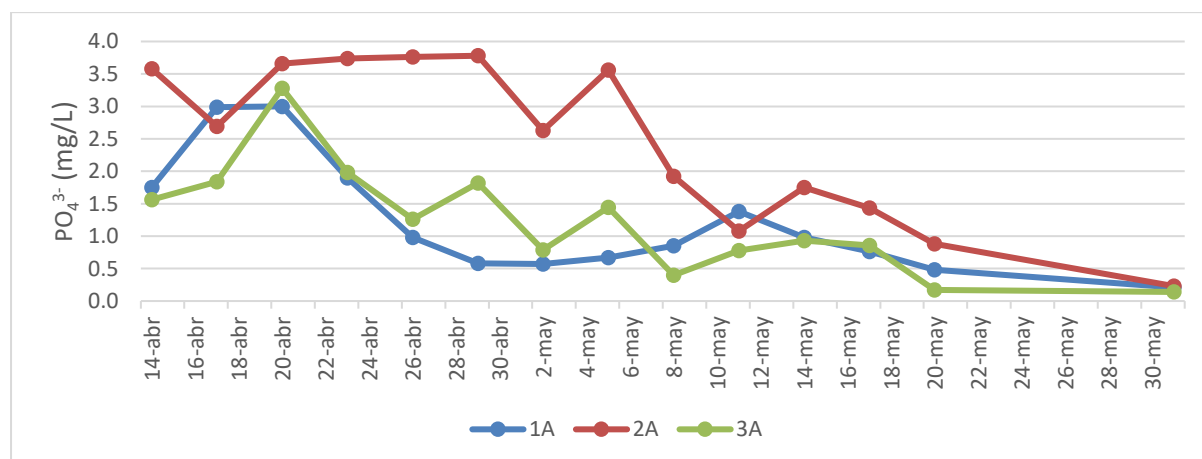
*Evolución de las concentraciones de fósforo total con agua destilada sobre el sedimento de muestras A con agua de laguna*



Respecto a la evolución de los fosfatos se observa una misma tendencia (Figura 7) en donde el punto 2A es el punto que presenta la mayor cantidad respecto a los otros dos puntos. A pesar de que hubo un descenso a los 3 días, la tendencia de poseer la mayor cantidad de concentración fue igual que en los análisis de PT.

**Figura 7**

*Evolución de la concentración de fosfatos en la columna de agua de la laguna sobre el sedimento de muestra A con agua de laguna*



Estas diferencias pueden explicarse debido a que punto 1 es el más cercano al ingreso del tributario que arrastra nutrientes de áreas productivas y ganaderas aguas arriba de la laguna. El punto 2, es la zona donde se realizaba previamente la producción de tilapia y recibe los recambios de agua de los estanques y piletas de la unidad, así como la alimentación externa para los peces, por lo cual se anticipa una mayor carga de fósforo y fosfato (Figura 8). Finalmente, la zona 3 es la zona más baja de la laguna y con menores concentraciones que el punto 2 por efecto de dilución y dispersión. En la Figura 9, se muestra imágenes de detalle de la evolución de los experimentos A y B de la zona 2.

### Figura 8

*Evolución de la concentración de fosfatos en la columna de agua destilada sobre el sedimento de muestra B con agua destilada*

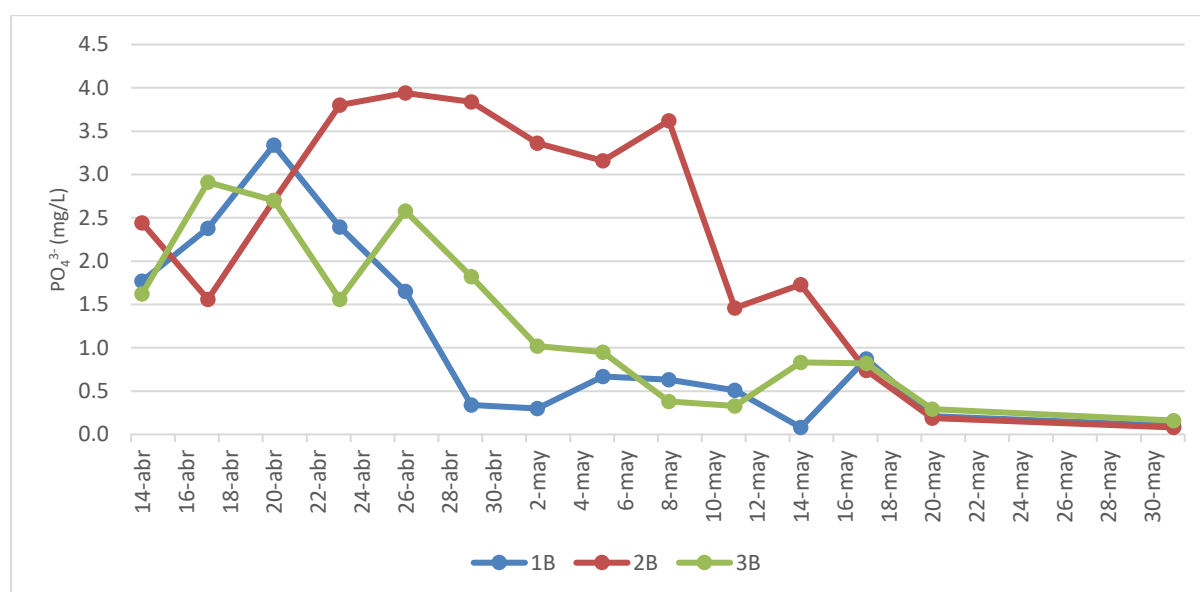
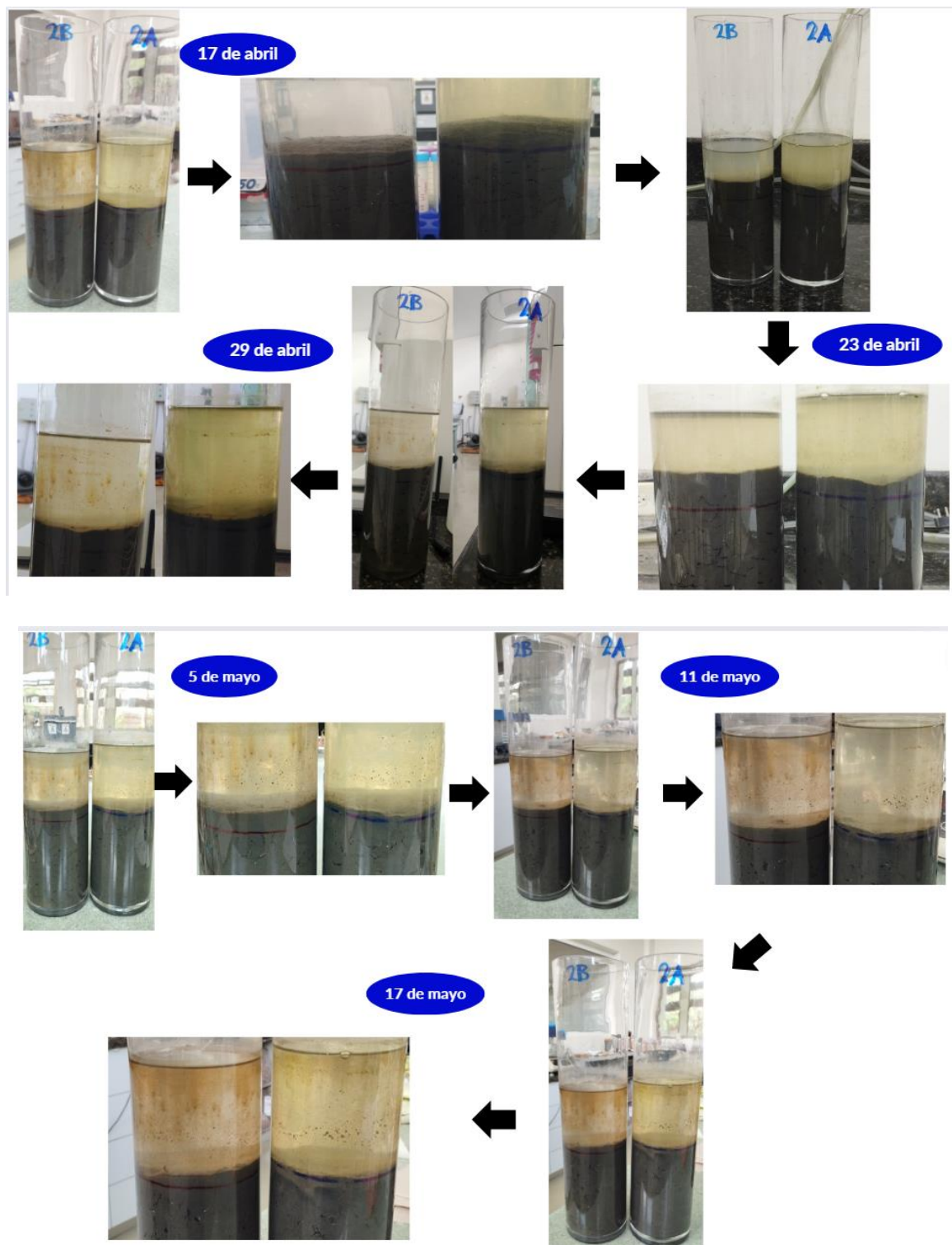


Figura 9

*Evolución del ensayo experimental durante las 5 semanas en el punto 2 (producción de tilapia)*

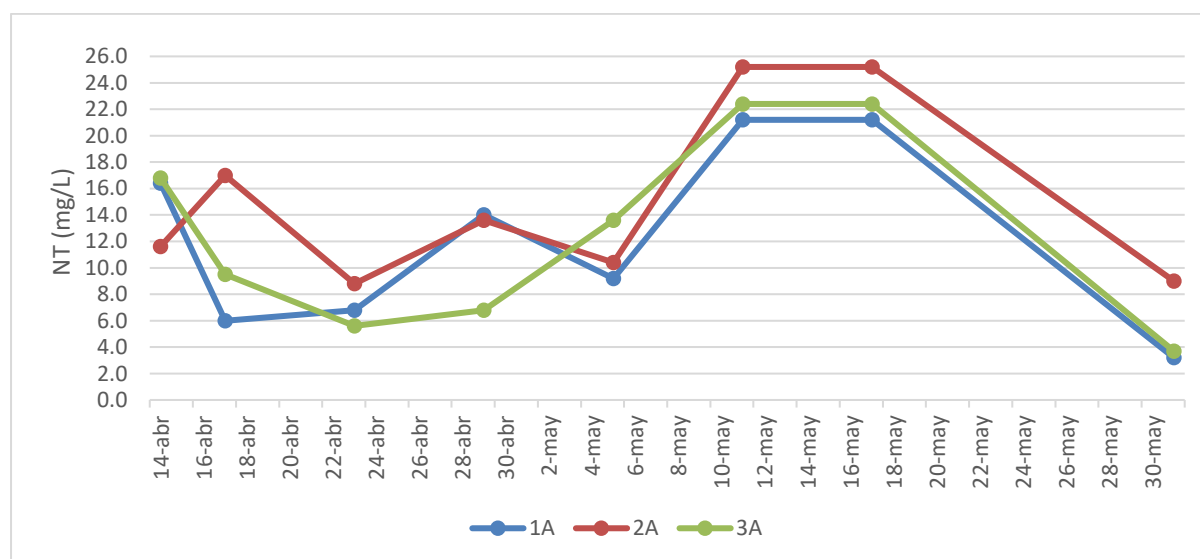


### Nitrógeno Total (NT)

En la Figura 10 se representa la evolución en la concentración de nitrógeno total (NT) entre el sedimento y la columna de agua. Al observar, se registra una mayor concentración de NT en el punto 2, seguido por el punto 3 y finalmente por el punto 1, a pesar de la ligera diferencia, que ahora contrasta con el PT. Considerando que los niveles de OD estuvieron en un rango de 2.5 a 0.3 mg/L en los tres puntos, se determina que las condiciones anaerobias pueden inhibir la nitrificación y favorecer la reducción desigual de  $\text{NO}_3^- \text{N}$ , que a su vez puede incrementar la presencia de  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  en el agua (Li et al., 2023).

**Figura 10**

*Evolución de la concentración de nitrógeno total en la columna de agua entre el sedimento de muestras A con agua de laguna*

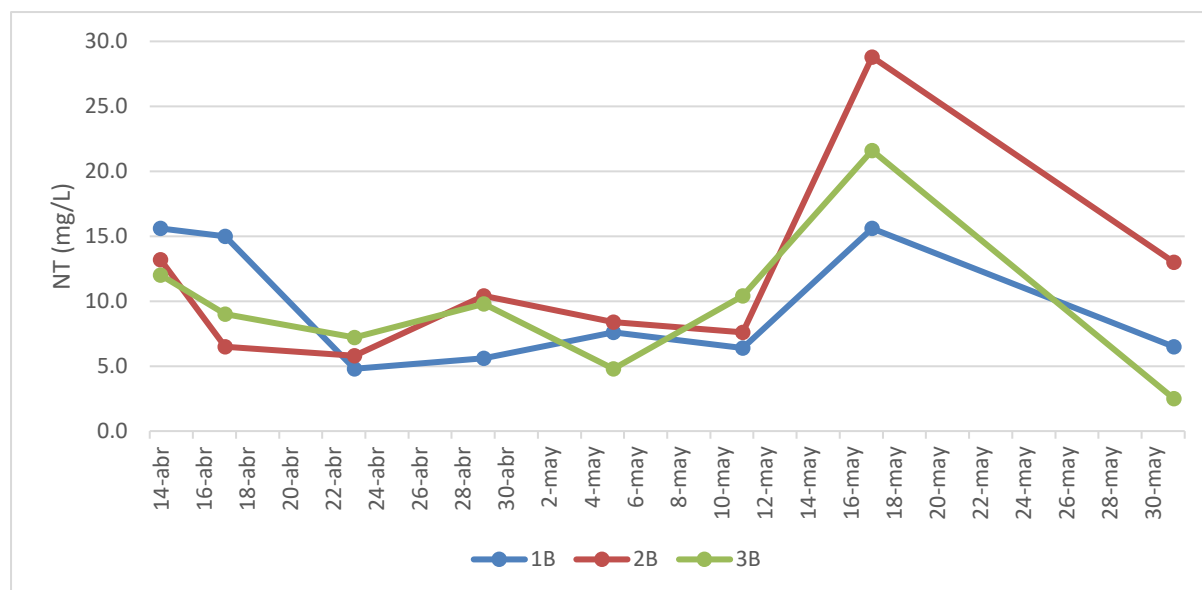


Se observa también que, durante las tres primeras semanas, las concentraciones fluctúan, mientras que al final de la tercera y principios de la cuarta semana las concentraciones aumentan de manera similar en las tres zonas. Este aumento puede atribuirse a la formación de una capa gris oscura que, como se mencionó anteriormente, sugiere que la disminución de oxígeno disuelto (OD) aumentó el proceso de desnitrificación (Avramidis et al., 2015). Se observó el mismo comportamiento de las

muestras B con agua destilada (Figura 11). En donde la tendencia de mayor concentración encontrada en el tiempo fue en el punto 2, luego punto 3 y por último punto 1.

**Figura 11**

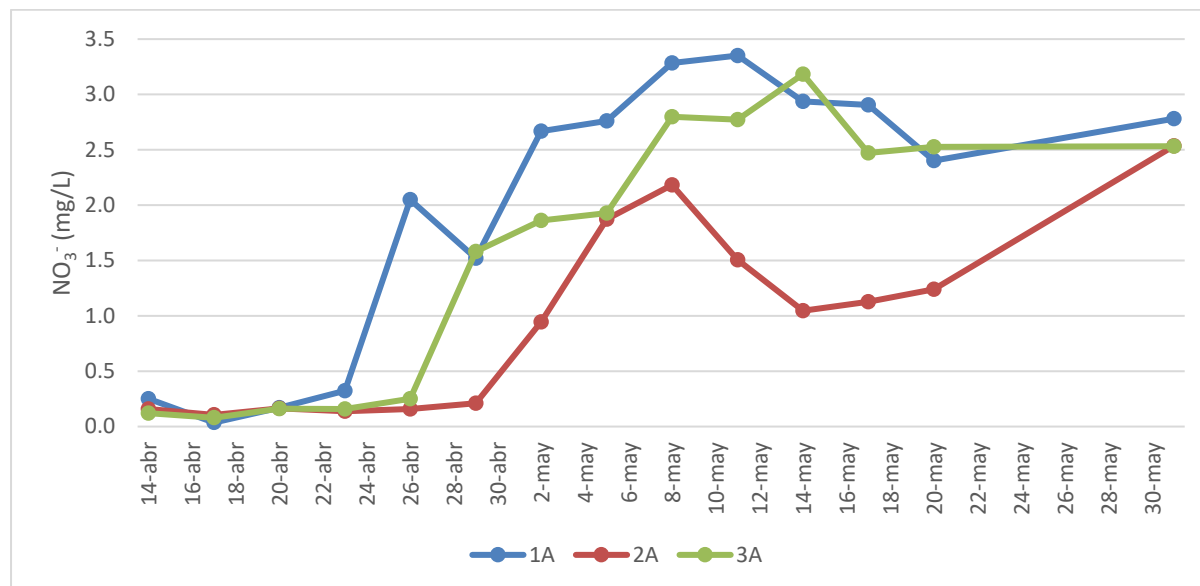
*Evolución de las concentraciones de nitrógeno total en la columna de agua entre sedimento de muestras B con agua destilada*



En la Figura 12, se muestra la concentración de nitratos, en donde la relación de los tres puntos es muy distinta a la del NT, porque el punto que tuvo mayor concentración de nitratos fue el punto 2, luego el punto 3 y finalmente el punto 1. Esta diferencia se acopla siempre con el factor de OD, ya que como menciona Avramidis et al., (2015), la producción de nitratos es un subproducto de la oxidación biológica del amoníaco, la cual representa una parte significativa del consumo total de oxígeno y es en la semana cuatro donde podemos observar la disminución del OD y el aumento de los nitratos (Li et al., 2023).

**Figura 12**

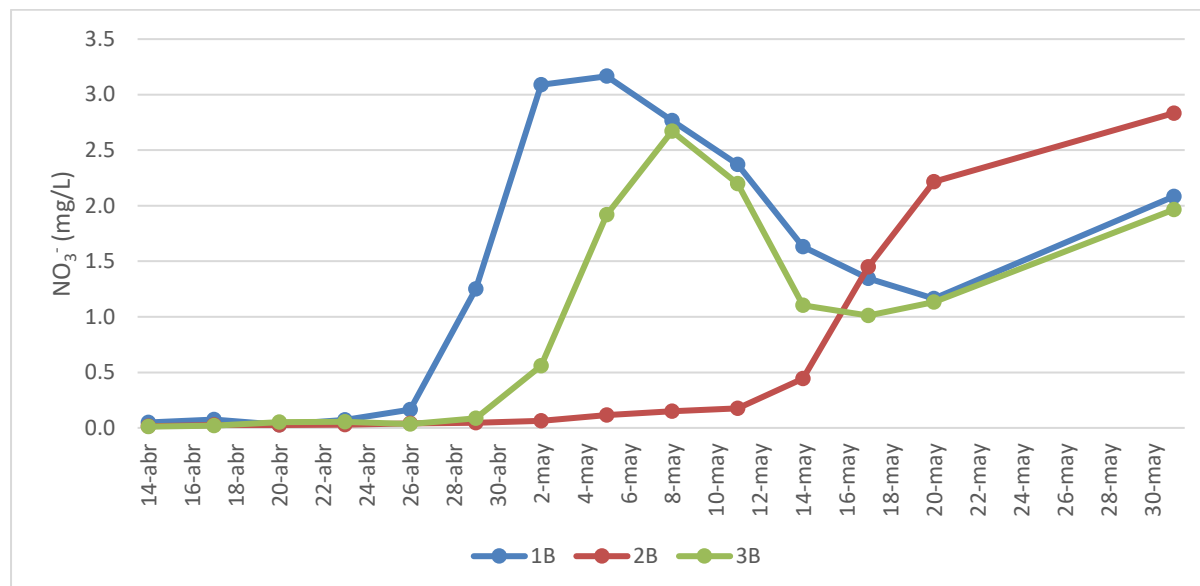
*Evolución de la concentración de nitratos en la columna de agua entre el sedimento de muestras A con agua de la laguna*



El mismo comportamiento se observó en las muestras B con agua destilada, determinando así que la mayor cantidad de nutrientes se liberan del sedimento durante el paso del tiempo, ya que el agua destilada no proporciona nutrientes (Figura 13). Este aumento en la concentración de nitratos sugiere que los sedimentos son una fuente significativa de este nutriente, liberándose gradualmente en la columna de agua.

**Figura 13**

*Evolución de la concentración de nitratos en la columna de agua entre el sedimento de muestras B con agua destilada*



### Flujos de Nutrientes entre Sedimento y Columna de Agua

#### Fósforo

Los flujos de fósforo total (en  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) se han calculado aplicando un balance de materia sobre sedimento y la columna de agua, siguiendo la metodología descrita para el cálculo de flujo de nutrientes. Este cálculo considera las variaciones en la concentración y el volumen del agua entre mediciones consecutivas, así como los volúmenes de agua extraídos y repuestos, y sus respectivas concentraciones. En el Cuadro 6, se representa un resumen de los flujos encontrados respecto al fósforo, en los cuales el valor negativo (-) de flujo representa que el nutriente es aportado del agua hacia el sedimento y un valor positivo (+) indica lo contrario.

**Cuadro 6**

*Resumen de los flujos puntuales y acumulados (mg/m<sup>2</sup>/d) de fósforo total (NT) y fosfatos en los tres puntos de muestreo*

	Flujo Puntual Fósforo Total		Flujos Acumulados Fósforo Total		Flujo Puntual Fosfato		Flujo Acumulados Fosfato	
	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo
Punto 1	12.46	-11.74	12.46	-12.91	2.01	-1.47	2.49	-2.81
Punto 2	12.06	-9.35	12.06	-9.05	1.9	-2.15	2.68	-3.45
Punto 3	17.77	-2.31	18.22	-3.74	2.4	-1.72	2.78	-2.89

En el punto 2, los flujos puntuales de PT variaron entre 12.06 y -9.35 mg/m<sup>2</sup>/d, mientras que los flujos acumulados variaron entre 12.06 y -9.05 mg/m<sup>2</sup>/d. En la Figura 14 se puede observar cómo se relacionan las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua, favoreciendo lo mencionado anteriormente. Asimismo, en las gráficas de fosfatos se puede observar que el flujo fue negativo, lo que indica que estos fluyeron desde el agua hacia el sedimento. Por otro lado, las gráficas

de PT no lo muestran, ya que la primera muestra se tomó para realizar el balance, sin embargo, el flujo comienza de manera positiva, lo que sugiere que los nutrientes fluyeron del sedimento al agua.

**Figura 14**

*Resultados de los flujos puntuales de fósforo (izquierda) y flujos acumulados (derecha)  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$  en el punto 2 a lo largo del estudio*



*Nota.* En la parte superior se muestra los flujos PT y en la inferior los de fosfatos.

En los puntos 1 y 3 se ha calculado un balance de materia sobre sedimento y columna de agua (Figuras 15 y 16). Los flujos puntuales de PT en el punto 1 variaron de 12.02 a  $-11.74 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$  mientras que los flujos acumulados variaron de 12.02 a  $-12.91 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ . En el punto 3 oscilaron entre 17.77 a  $-2.31 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$  y el de flujo acumulado de este sitio es de 18.22 y  $-3.74 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ .

Por tanto, el punto 1 tiene el valor más negativo ( $-12,91 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) en los flujos acumulados de PT indicando mayor absorción de fósforo total por sedimento seguido del punto 2 ( $-9.05 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) y por finalmente el punto 3 ( $-3.74$ ). Mientras que, en los flujos acumulados de fosfato, se tiene que el valor más negativo es en el punto 2 ( $-3.45 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ), sugiriendo una absorción de fosfato en el sedimento, seguido por punto 3 y 1.

Figura 15

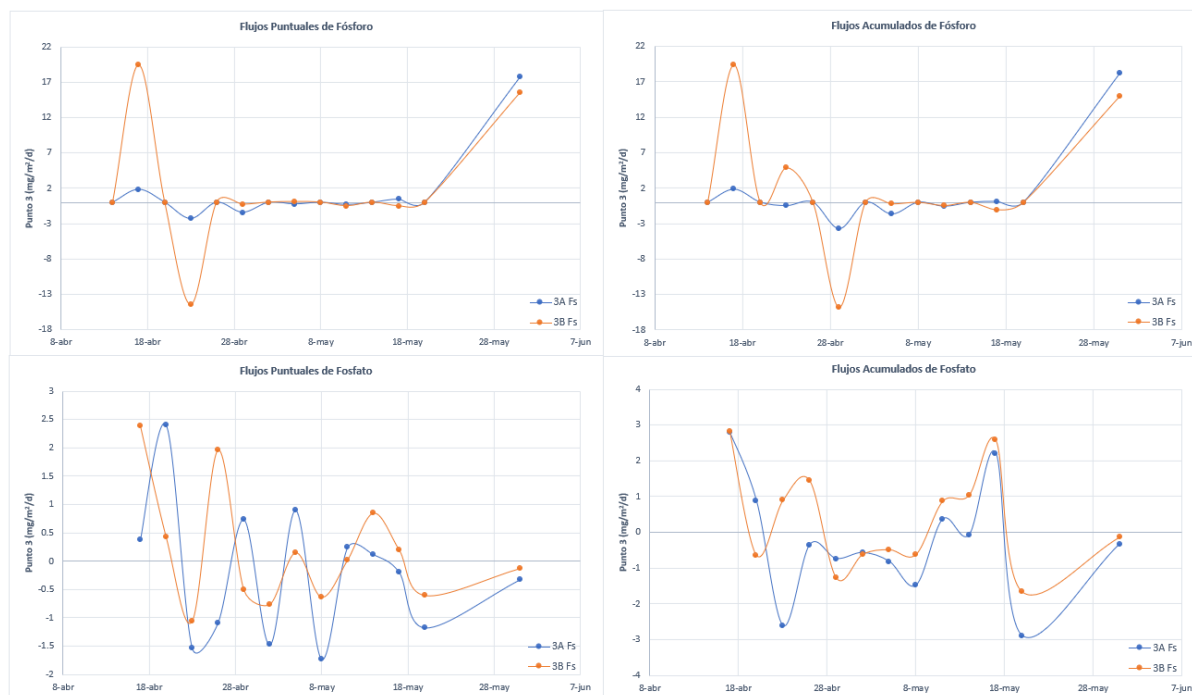
Resultados de los flujos puntuales de fósforo (izquierda) y flujos acumulados (derecha)  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$  en el punto 1 a lo largo del estudio



Nota. En la parte superior se muestra los flujos PT y en la inferior los de fosfatos

Figura 16

Resultados de los flujos puntuales de fósforo (izquierda) y flujos acumulados (derecha)  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$  en el punto 3 a lo largo del estudio



Nota. En la parte superior se muestra los flujos PT y en la inferior los de fosfatos

Respecto a los resultados obtenidos se destaca la importancia de la distribución espacial de nutrientes entre el agua y sedimento, tal cual como sugiere Chowdhury y Bakri (2006), que la interacción entre el fósforo y el hierro no residual puede influir en la movilidad y la absorción de fósforo en los diferentes puntos. La actividad microbiana en los sedimentos se ve afectada por la concentración de oxígeno de disuelto que viene influyendo en la calidad del agua (Li et al., 2023).

### Nitrógeno

En las Figura 17, 18 y 19 se representan los flujos de NT de los tres puntos en orden de las concentraciones encontradas, es decir, punto 2, 3 y 1, Asimismo en el Cuadro 7 están representados los valores máximos y mínimos de flujos puntuales y acumulativos dando una amplia visión de cómo

se comportaron. Donde, el valor negativo (-) de flujo representa que el nutriente es aportado del agua hacia el sedimento y un valor positivo (+) indica lo contrario.

### Cuadro 7

*Resumen de los flujos puntuales y acumulados ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) de nitrógeno total (NT) y nitratos en los tres puntos de muestreo*

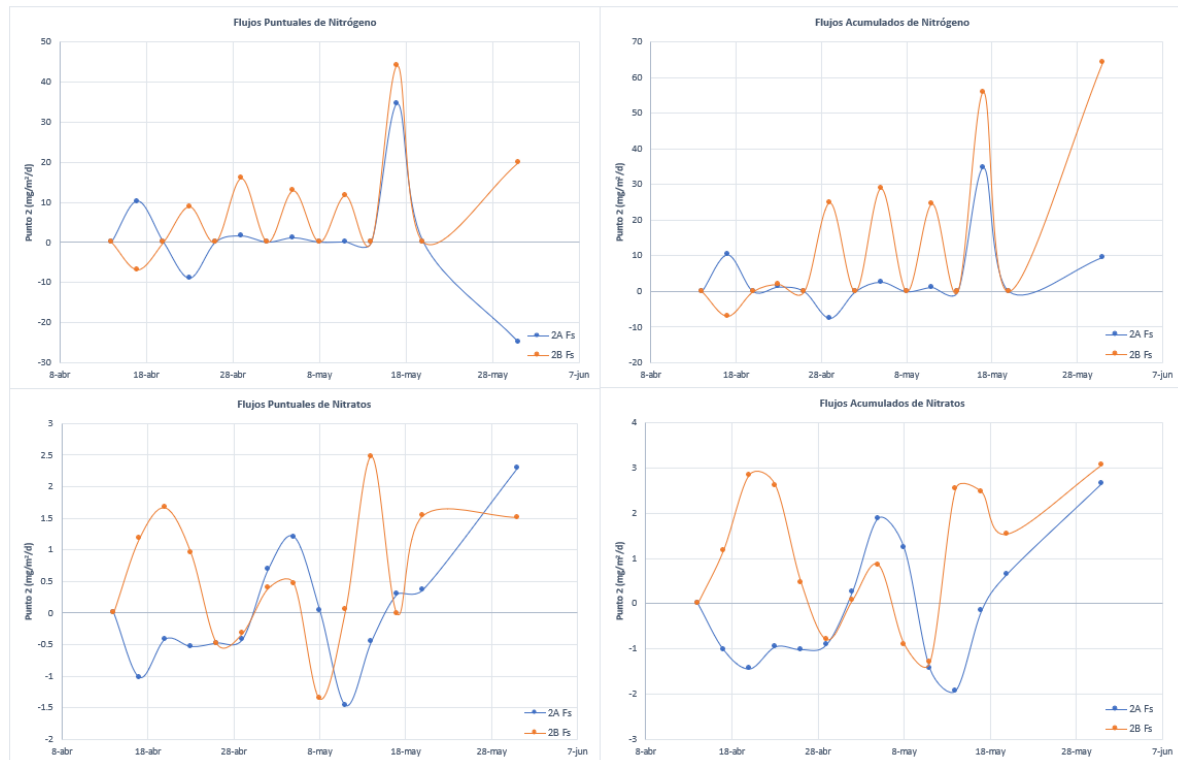
	Flujo Puntual N Total		Flujo Acumulados N Total		Flujo Puntual Nitrato		Flujo Acumulados Nitrato	
	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	Mínimo
Punto 1	27.55	-29.40	28.86	-27.22	2.43	-1.27	2.26	-1.60
Punto 2	31.51	-24.93	31.58	-7.44	2.28	-1.46	2.65	-1.92
Punto 3	18.97	-29.07	29.54	-25.83	1.62	-0.9	1.94	-1.37

El flujo acumulado de nitrógeno total es menor en el punto 1 ( $-29.40 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) seguido por el punto 3 ( $-29.07 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) y 2 ( $-24.93 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ). Respecto a los flujos acumulado de nitratos el valor más negativo es por el punto 2 ( $-1.92 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ), seguido del punto 1 ( $-1.60 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ) y por último el punto 3 ( $-1.37 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{d}$ ). Las condiciones anaerobias (bajo OD) en el punto 2 son el resultado de una alta desnitrificación y por eso el flujo de nitratos esta del agua hacia el sedimento, aunque el punto 2 fue el menos negativo en el NT, hay que recordar que el NT incluye todas las formas de nitrógeno (nitrato, nitrito, amonio y materia orgánica nitrogenada), es decir, aunque los nitratos se reducen, la acumulación de otras formas de nutrientes puede mantenerse o incluso aumentar en este caso.

Observando el comportamiento de las gráficas, vemos que la tendencia del nitrógeno total en los puntos 1 y 3 es positiva, lo que indica que el nutriente se movió del sedimento hacia la columna de agua. En contraste, en el punto 2, la tendencia es opuesta, lo cual se debe al consumo por parte de los microorganismos y al proceso de desnitrificación (Ribes-Bargues, 2022).

Figura 17

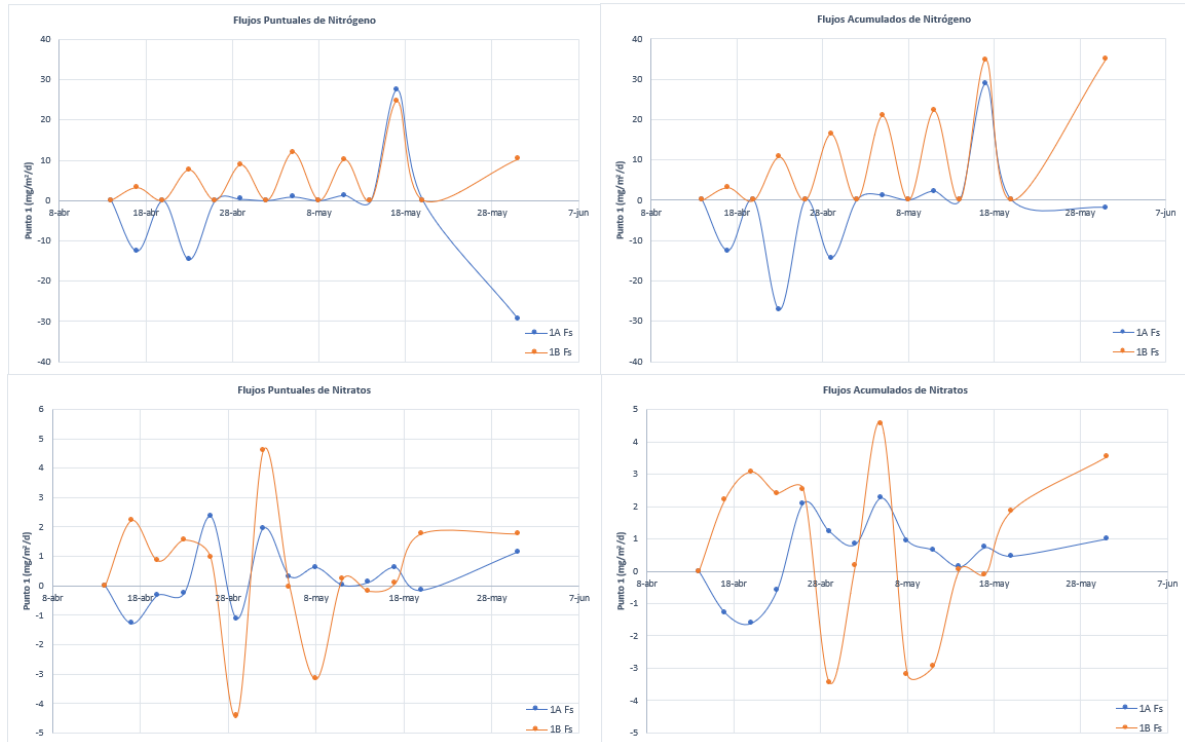
Resultados de los flujos puntuales de nitrógeno (izquierda) y flujos acumulados (derecha)  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$  en el punto 2 a lo largo del estudio



Nota. En la parte superior se muestra los flujos de Nitrógeno Total y la parte inferior los flujos de Nitratos.

Figura 18

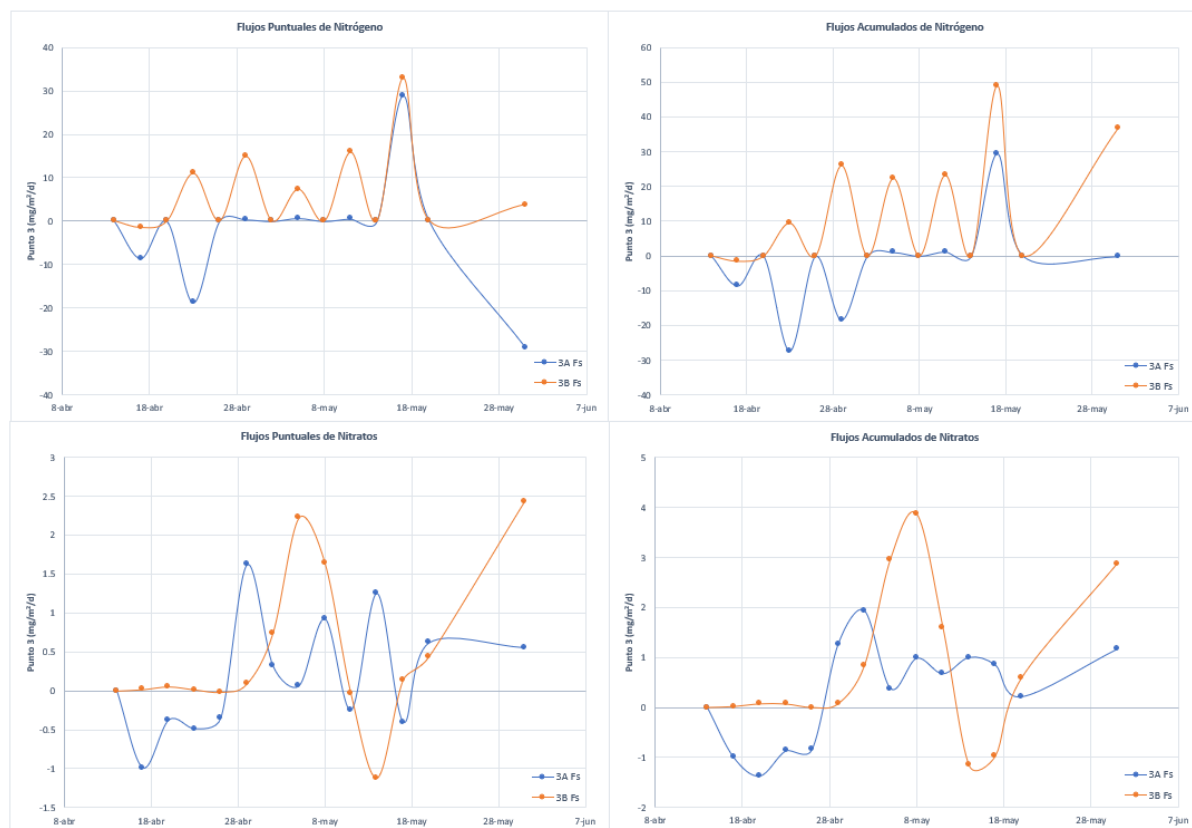
Resultados de los flujos puntuales de nitrógeno (izquierda) y flujos acumulados (derecha)  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$  en el punto 1 a lo largo del estudio



Nota. En la parte superior se muestra los flujos de NT y la parte inferior los flujos de Nitratos

Figura 19

Resultados de los flujos puntuales de nitrógeno (izquierda) y flujos acumulados (derecha)  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$  en el punto 3 a lo largo del estudio



Nota. En la parte superior se muestra los flujos de NT y la parte inferior los flujos de Nitratos

Es importante señalar, que los diferentes gráficos reflejan que las condiciones ambientales y la dinámica *in-situ* en la laguna puede verse influenciada por condiciones adicionales que no fueron consideradas en este experimento. Como la introducción de materia orgánica fresca, la exposición a condiciones ambientales cambiantes y otras corrientes de materia dentro de la laguna. Sin embargo, los hallazgos sugieren que la variabilidad en la retención de nutrientes en los diferentes puntos de la laguna puede estar relacionada por la actividad microbiana, la saturación de oxígeno y la materia orgánica.

Por lo tanto, para mejorar el exceso de carga de nutrientes, se debería considerar tomar decisiones orientadas a mejorar la calidad del agua y la eficiencia del sistema de la laguna. Esto podría

incluir la implementación de medidas como un monitoreo continuo y detallado de todos los flujos de entrada y salida, la introducción de especies vegetales más eficientes en la absorción de nutrientes, y la adopción de nuevas tecnologías para regular las aguas de recambio, todo con el fin de mitigar el exceso de cargas de nutrientes y asegurar la sostenibilidad del sistema.

## Conclusiones

Los análisis de calidad del agua en la laguna de Monte Redondo indican cargas nutricionales elevadas (particularmente de fosfatos y fósforo total) y una tendencia a la eutrofización que puede causar problemas como el crecimiento de algas y la disminución de los niveles de oxígeno. Las concentraciones de nitrógeno y fósforo total también sugieren un estado eutrófico que potencialmente podría afectar el crecimiento de los peces y deteriorar la calidad de la laguna.

A pesar del área pequeña de la laguna y la proximidad entre los sitios seleccionados, se identificaron niveles bajos de oxígeno disuelto (expresado tanto en ppm como en porcentaje de saturación) especialmente en el punto 2, el cual ha estado bajo producción de tilapia en años previos. Esto puede resultar en potenciales impactos negativos en la calidad de agua de la laguna, en la biodiversidad local y la producción de peces.

El ensayo de flujo de nutrientes revela diferencias entre los puntos de muestreo debido a los aportes diferenciados de nutrientes al sedimento por la producción de tilapia. El punto con mayor liberación de nutrientes fue el punto 3 (aguas abajo), con un valor máximo de 18.22 y una absorción de fosfatos de  $-12.91 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ . Por el contrario, el punto 2 (debajo de las jaulas de producción) es la que más absorben fosfatos con un flujo de acumulación de  $-3.45 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ . El Punto 2 (debajo de las jaulas de producción) mostró las condiciones más bajas de oxígeno, promoviendo una mayor desnitrificación, lo que explica la alta absorción de nitratos por el sedimento. En los puntos 1 y 3 el Nitrógeno Total tendió a moverse del sedimento hacia el agua.

### Recomendaciones

El monitoreo constante de la calidad del agua y el estado de los peces es fundamental para optimizar la eficiencia en la alimentación de una laguna acuícola. Esto implica medir otros parámetros que no se tomaron en cuenta como el amonio, la clorofila que son necesarios para llevar un diagnóstico completo de la laguna.

Realizar un análisis de sedimento como parte del balance de materia, dado que los sedimentos pueden actuar como reservorios temporales o permanente de los solutos. Este enfoque puede mejorar la precisión del balance de masa.

Utilizar un muestreador de columna para garantizar la representatividad de las muestras y capturar una muestra más uniforme y precisa.

Realizar comparaciones estadísticas para determinar qué zona se encuentra mayormente afectada con la carga de nutrientes.

Hacer muestreo en época lluviosa para comparar el efecto de la carga de los flujos de nutrientes en condiciones meteorológicas diferentes.

Establecer periodos de descanso en la zona de producción de tilapia para evitar el aumento de la carga de nutrientes y así poder disminuir el efecto de la eutrofización y el impacto negativo a la calidad del agua.

Realizar monitoreos periódicos de los parámetros de calidad del agua, y reducir la carga orgánica mediante la gestión adecuada de residuos y la optimización de la alimentación. Además, es importante controlar los niveles de fósforo y nitrógeno en el agua, mejorando la filtración y utilizando plantas acuáticas que absorban estos nutrientes.

## Referencias

- Avramidis, P., Bekiari, V., Christodoulou, D. y Papatheodorou, G. (2015). Sedimentology and water column stratification in a permanent anoxic Mediterranean lagoon environment, Aetoliko Lagoon, western Greece. *Environmental Earth Sciences*, 73(9), 5687–5701. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3824-2>
- Baird, R. B. y Eaton, A. D. (Eds.). (2017). *Standard methods for examination of water and wastewater* (23rd). American Public Health Association.
- Barbosa, J., Bellotto, V., Da Silva, D. y Lima, T. (2019). Nitrogen and Phosphorus Budget for a Deep Tropical Reservoir of the Brazilian Savannah. *Water*, 11(6), 1205. <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/34781?locale=en>
- Boyd, C. (2001). Water quality standards: Total Phosphorus. <https://www.globalseafood.org/advocate/water-quality-standards-total-phosphorus/>
- Boyd, C. (2017). Cómo la descomposición de la materia orgánica impacta los estanques acuícolas. <https://www.globalseafood.org/advocate/como-la-descomposicion-de-la-materia-organica-impacta-los-estanques-acuicolas/>
- Boyd, C. (2019). Nitrógeno, fósforo, eutrofización y estándares de efluentes para certificación acuícola. <https://www.globalseafood.org/advocate/nitrogeno-fosforo-eutrofizacion-y-estandares-de-efluentes-para-certificacion-acuicola/>
- Chaux-F., G., Caicedo-B., J. y Fernández-M., J. (2013). Tratamiento de efluentes piscícolas (Tilapia roja) en lagunas con *Azolla pinnata*. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 46–56. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612013000200006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000200006)
- Chowdhury, M. y Bakri, D. (2006). Diffusive nutrient flux at the sediment—water interface in Suma Park Reservoir, Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 144–156. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.1.144>

- Colodro, I. (2012). *Experimentos ex situ para la determinación de flujos de nutrientes en la interfase agua-sedimento: Experimentos ex situ para la determinación de flujos de nutrientes en la interfase agua-sedimento* [tesis de pregrado, Universitat Politecnica de Valencia].  
riunet.upv.es. <https://riunet.upv.es/handle/10251/18264>
- Dodds, W. K., Jones, J. R. y Welch, E. B. (1998). Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Research*, 32(5), 1455–1462. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00370-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00370-9)
- Fundación Cemex España. (2007). *El ciclo del agua en la Comunitat Valenciana: La calidad del agua* [Los parámetros fisicoquímicos].  
[https://agroambient.gva.es/estatico/areas/educacion/educacion\\_ambiental/educ/publicaciones/ciclo\\_del\\_agua/cicag/2/2\\_5\\_1/main.html](https://agroambient.gva.es/estatico/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_del_agua/cicag/2/2_5_1/main.html)
- García-Ortega, A. y Calvario-Martínez, O. (2008). Manual de buenas prácticas de producción acuícola de tilapia para la inocuidad alimentaria.  
[https://www.researchgate.net/publication/236159373\\_Manual\\_de\\_Buenas\\_Practicas\\_de\\_Produccion\\_Acuicola\\_de\\_Tilapia\\_para\\_la\\_Inocuidad\\_Alimentaria](https://www.researchgate.net/publication/236159373_Manual_de_Buenas_Practicas_de_Produccion_Acuicola_de_Tilapia_para_la_Inocuidad_Alimentaria)
- Guerra-Silveira, M., Eliseu-Losekann, M. y Hisano, H. (2013). Aquicultura: manejo e aproveitamiento de efluentes. *Embrapa Meio Ambiente*, 1. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/972692/aquicultura-manejo-e-aproveitamento-de-efluentes>
- Guerrero. M. (s.f.). *Cultivo de tilapia en estanques Honduras* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Honduras]. [www.academia.edu](http://www.academia.edu).  
[https://www.academia.edu/9652544/Mario\\_Fco\\_Guerrero\\_Cultivo\\_de\\_tilapia\\_en\\_estanques\\_Honduras](https://www.academia.edu/9652544/Mario_Fco_Guerrero_Cultivo_de_tilapia_en_estanques_Honduras)
- Guerrini-Montemurro, D. (2017). *Balance de nutrientes y eutrofización en ríos y embalses de la cuenca del Río Negro (Uruguay)* [tesis de pregrado, Universidad de la Republica de Uruguay, Uruguay].  
[www.colibri.udelar.edu.uy](http://www.colibri.udelar.edu.uy).  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/19136>

- Hsien-Tsang, S. y Quintanilla, M. (2008). *Manual sobre "reproducción y cultivo de tilapia"*.  
<https://alfonzopineda.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/04/2-manual-reproduccion-y-cultivo-tilapia-cendepesca.pdf>
- Jiménez-Sales, M. (2008). *Transferencia de nutrientes entre la columna de agua y el sedimento bajo condiciones anaerobias en el Embalse de Beniarrés (Alicante)* [tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Valencia, España]. [riunet.upv.es](https://riunet.upv.es). <https://riunet.upv.es/handle/10251/13044>
- Li, W., Xu, S., Chen, X., Han, D. y Mu, B. (2023). Influencing Factors and Nutrient Release from Sediments in the Water Level Fluctuation Zone of Biliuhe Reservoir, a Drinking Water Reservoir. *Water*, 15(20), 3659. <https://doi.org/10.3390/w15203659>
- Makridis, P., Hovden, N. y Gausen, M. (2015, 4 de febrero). La Oxigenación en la Acuicultura. *AquaFeed Español*. <https://aquafeed.co/entrada/la-oxigenacion-en-la-acuicultura-20546/>
- Moreno-Otero, H. (1948). Estudios sobre los términos lago y laguna. *Boletín De La Sociedad Geográfica De Colombia*, 8(2).  
[https://www.sogeocol.edu.co/documentos/008\\_02\\_estud\\_sob\\_term\\_lago\\_laguna.pdf](https://www.sogeocol.edu.co/documentos/008_02_estud_sob_term_lago_laguna.pdf)
- Navas, G., Zea, S. y Campos, N. (2003). Flux of nitrogen and phosphorus at the water - sediment boundary in a tropical coastal lagoon (Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombian Caribbean). *CICIMAR Oceanides*, 18(2), 45–65. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v18i2.5>
- Organización del Sector Pesquero y Acuicola del Istmo Centroamericano. (2022). *Elementos técnico-económicos, ambientales y buenas prácticas para el cultivo de tilapia*.  
[https://www.sica.int/documentos/elementos-tecnico-economicos-ambientales-y-buenas-practicas-para-el-cultivo-de-tilapia\\_1\\_131726.html](https://www.sica.int/documentos/elementos-tecnico-economicos-ambientales-y-buenas-practicas-para-el-cultivo-de-tilapia_1_131726.html)
- Reddy, K. R., Kadlec, R. H., Flaig, E. y 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/10.1080/10643389991259182>

- Ribes-Bargues, M. (2022). *Evaluación de los flujos de nutrientes entre el agua y los sedimentos en la laguna del humedal artificial del Tancat de Milia (Sollana, Valencia)*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/187046>
- Rodríguez-Gómez, H. y Ánzola-Escobar, E. (2001). *La calidad del agua y la productividad de un estanque en acuicultura*. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura; Bogotá (Colombia). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/34940>
- Ruiz-Velazco, J., Peña-Messina, E., Lopez, L. y Valle-Carlos, B. (2007). Potencial productivo de una laguna artificial en el desarrollo del cultivo de tilapia. *Revista Electrónica De Veterinaria*, VII. [https://www.researchgate.net/publication/26454348\\_Potencial\\_Productivo\\_de\\_una\\_Laguna\\_artificial\\_en\\_el\\_desarrollo\\_del\\_cultivo\\_de\\_tilapia\\_Potencial\\_Productive\\_of\\_artificial\\_lagoon\\_on\\_development\\_of\\_tilapia](https://www.researchgate.net/publication/26454348_Potencial_Productivo_de_una_Laguna_artificial_en_el_desarrollo_del_cultivo_de_tilapia_Potencial_Productive_of_artificial_lagoon_on_development_of_tilapia)
- Saavedra Martínez, M. A. (2006). *Manejo del cultivo de tilapia*. <https://www.crc.uri.edu/download/MANEJO-DEL-CULTIVO-DE-TILAPIA-CIDEA.pdf>
- Secretaría de salud, H. (2001). *Norma técnica nacional para agua de: uso agrícola y pecuario, uso recreativo, uso en preservación de la flora y la fauna (calidad básica del agua), uso en abastecimiento de poblaciones y uso en acuicultura*.
- Tovilla-Hernández, C. y Lanza-Espino, G. (2001). Balance hidrológico y de nutrientes en un humedal costero del Pacífico Sur de México. *Hidrobiológica*, 11. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972001000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972001000200005)
- Valenzuela-Siu, M., Arreola-Lizárraga, J., Sánchez-Carrillo, S. y Padilla-Arredondo, G. (2007). Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México. *Hidrobiológica*, 17(3). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972007000300002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972007000300002)
- Wang, H., Holden, J., Spera, K., Xu, X [X.], Wang, Z., Luan, J., Xu, X [XinHua] y Zhang, Z. (2013). Phosphorus fluxes at the sediment-water interface in subtropical wetlands subjected to experimental warming: A microcosm study. *Chemosphere*, 90(6), 1794–1804. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.08.044>

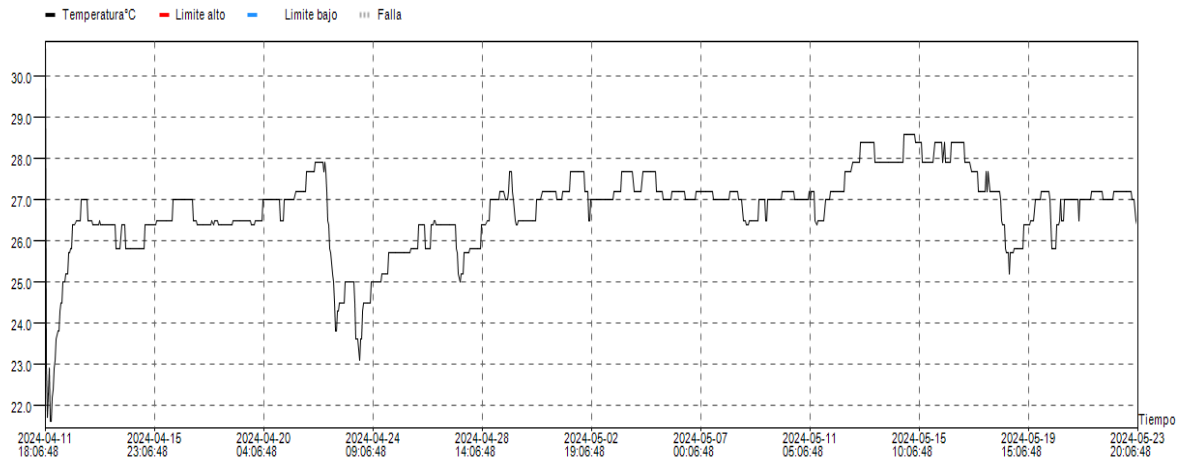
Yossa, M., Hernández-Arevalo, G. y Vásquez-Torres, W. (2012). Composición nutricional del sedimento en estanques con tilapia roja. *Orinoquia*, 16(2 sup), 217–224.  
<https://doi.org/10.22579/20112629.110>

**Anexos****Anexo A**

*Datos de la semana de muestreo para evaluar las condiciones ambientales de temperatura*

Parámetros	Punto 1	Punto2	Punto 3
T° agua	30.4	29.5	28.6
T° sedimento	25.5	25.3	25.9
T° ambiente	33	33	33
T° termómetro	30.2	31	32
Profundidad	0.4	1.7	0.5

*Nota.* T°: temperatura y todos los datos están en °C

**Anexo B***Gráfica de T (°C) del ensayo experimental*

**Anexo C***Resumen de las concentraciones de nutrientes del sedimento*

Zonas	PT (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	NT (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)
1	7.2	3.76	28	0.3497
2	6.4	4.56	98	5.9462
3	12.4	3.86	21	0.7926

**Anexo D**

*Comparación del punto 2 con los factores asociados a los cambios en el tiempo*

