

# PORH LAGO DE TOTA

Formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH del Lago de Tota y Ríos Tobal, Olarte, Hatolaguna y Las Quebradas La Mugre y Los Pozos

# Documento: Análisis de la distribución de la biomasa de *E. densa* y ensayos de remoción de nutrientes y materia orgánica



**Corpoboyacá**



CONSORCIO  
**PORH**  
LAGO DE TOTA 21



ENINCO S.A.



LONJACUN

CONSULTORÍA PARA LA FORMULACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO - PORH DEL LAGO DE TOTA Y RÍOS TOBAL, OLARTE, HATOLAGUNA Y LAS QUEBRADAS LA MUGRE Y LOS POZOS (EL POZO)",

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	OBJETIVOS .....	7
2.1	Objetivo General.....	7
2.2	Objetivos específicos.....	7
3	ÁREA DE ESTUDIO.....	8
4	METODOLOGÍA.....	9
4.1	Distribución espacial de Egeria densa en el litoral del lago de Tota. ....	9
4.1.1	Fase de campo.....	9
4.1.2	Análisis de la información .....	12
4.2	Distribución espacial de biomasa de Egeria densa en el lago de Tota.....	12
4.2.1	Fase de campo.....	12
4.2.2	Análisis de la información .....	14
4.3	Ensayos de remoción de nutrientes y materia orgánica de Egeria densa en condiciones de laboratorio.....	14
4.3.1	Ensayos de laboratorio .....	14
4.3.2	Análisis de la información .....	18
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
5.1	Distribución espacial de Egeria densa en el litoral del lago de Tota. ....	18
5.2	Distribución espacial de biomasa de Egeria densa en el lago de Tota.....	19
6	BIBLIOGRAFÍA.....	27

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación del área de estudio – Lago de Tota.....	8
<b>Figura 2.</b> (A) inspección visual, y (B) inspección con ayuda de un rastrillo sujeto a un ancla. ....	9
<b>Figura 3.</b> Localización de los puntos de muestreo - Distribución de Egeria densa en el Lago de Tota. ....	11
<b>Figura 4.</b> Localización puntos de muestreo- Distribución de biomasa de Egeria densa en el Lago de Tota .....	13
<b>Figura 5.</b> (A) extracción de la macrófita con draga, y (B) preservación de las muestras. ....	14
<b>Figura 6.</b> Diseño experimental para determinar la capacidad de remoción de nutrientes por parte de la Elodea. ....	15
<b>Figura 7.</b> Diseño experimental para determinar la capacidad de remoción de materia orgánica de la Elodea. .....	16
Figura 8. Morfología de los brotes apicales. ....	16
<b>Figura 9.</b> Traslado de la Elodea a las peceras experimentales.....	17
<b>Figura 10.</b> Diseño experimental para determinar la capacidad de remoción de materia orgánica y nutrientes por parte de la Elodea. ....	17
<b>Figura 11.</b> Área de distribución de Egeria densa en el litoral del Lago de Tota. (A) estudio realizado por el PORH Lago de Tota en el año 2023 – (B) estudio realizado por Pineda (2021) en el año 2018.....	19
<b>Figura 12.</b> Estimación de distribución de biomasa de Egeria densa en el litoral del Lago de Tota.....	21
<b>Figura 13.</b> Diferencia en la concentración de Fósforo total disuelto durante 10 días.....	23
<b>Figura 14.</b> Diferencia en la concentración de Nitrógeno total disuelto durante 10 días. ....	24
<b>Figura 15.</b> Diferencia en la concentración de DQO disuelto durante 10 días. ....	24
Figura 16. Cambio de coloración de agua al día 5 en las peceras de DQO. ....	25

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Puntos de monitoreo - Distribución de Egeria densa en el Lago de Tota.....	10
<b>Tabla 2.</b> Puntos de toma de muestras de biomasa de E. densa en el Lago de Tota. ....	12
<b>Tabla 3.</b> Resultados de biomasa seca (g/m <sup>2</sup> ) para los puntos de monitoreo.....	20
<b>Tabla 4.</b> Concentraciones iniciales en mg/L de los tratamientos aplicados para cada ensayo. ....	22

## 1 INTRODUCCIÓN

Con la resolución 421 del 2022, motivada por Corpoboyacá conforme a las competencias, se declaró en ordenamiento el recurso hídrico del Lago de Tota y ríos Tobal, Olarte, Hato laguna, y las quebradas La Mugre y Los Pozos (El Pozo), en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá.

Para complementar la información obtenida durante los estudios que se han llevado en la *Formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH del Lago de Tota y Ríos Tobal, Olarte, Hatolaguna y Las Quebradas La Mugre y Los Pozos* y, ante la solicitud de la CORPOBOYACÁ sobre la importancia de estudiar de manera espacial y fisiológica la macrófita acuática *Egeria densa* (Elodea), se presentan las metodologías y resultados del estudio de la distribución espacial y de biomasa de la Elodea en el Lago de Tota, junto con la capacidad de remoción de nutrientes y materia orgánica en condiciones de laboratorio.

La proliferación de macrófitas acuáticas está directamente relacionada con la disponibilidad de nutrientes para su desarrollo, lo cual conlleva a una posible eutrofización de los sistemas hídricos. La eutrofización es un proceso atribuido mayoritariamente a las actividades antrópicas (Smith & Smith, 2001), siendo el Lago de Tota un escenario de preocupación por el crecimiento demográfico de poblaciones ribereñas y actividades asociadas al Lago.

En el lago de Tota hay varias especies de plantas acuáticas, sin embargo, *Egeria densa*, macrófita sumergida y enraizada, es la que presenta mayor distribución en la zona litoral del Lago. Según el estudio de Pineda (2021), quien realizó una aproximación numérica y geoespacial de la distribución de *E. densa* en el litoral del Lago de Tota, la mayor colonización de esta macrófita se presentó en la zona norte, donde predominan las actividades agrícolas y la pendiente es menor. Caso similar, a lo descrito por Carrillo *et al.* (2017), cuya distribución de la biomasa en Elodea en el embalse del Neusa, se atribuye a la disponibilidad de nutrientes por la desembocadura de los arroyos y a la pendiente del litoral.

*Egeria densa* es una especie considerada invasora, debido a su alta tasa de colonización, como resultado de la combinación entre una baja tasa de senescencia y su continuo crecimiento (Carrillo *et al.*, 2006); por lo anterior se asocia a varios problemas ambientales en los cuerpos de agua como la afectación del caudal, reducción en el espejo del agua y disminución en la transparencia del agua por la cantidad de materia orgánica en suspensión. Sin embargo, su presencia en zonas litorales, constituyen un ecotono horizontal entre la tierra y el agua abierta y verticalmente entre los sedimentos y el agua superpuesta, siendo propicio como hábitat para el perifiton, macroinvertebrados y ser refugio para peces. Según el estudio de Pedroza *et al.* (2016), *E. densa* en el Lago de Tota, cumple un papel estructurador de la comunidad, por la generación de detritus y de sustrato para perifiton, que a la vez garantizan el flujo de recursos hacia niveles tróficos superiores.

Por otra parte, las macrófitas cumplen un rol fundamental en el ciclo de nutrientes, por ejemplo, las especies sumergidas con raíces, como *la elodea*, pueden absorber nutrientes tanto del agua como de los sedimentos, pero generalmente se considera que los sedimentos son la principal fuente de fósforo y nitrógeno (Barko *et al.*, 1991). Son múltiples los estudios que muestran la capacidad de *E. densa*, para absorber nutrientes de la columna de agua y sedimentos (Feijóo *et al.*, 1996; Bolaños, *et al.*, 2008; Muchtasjar, *et al.*, 2021; Feijóo,

et al.,2002), por lo que pueden llegar a actuar como barrera de contención y bioacumulacion de las entradas alóctonas a los sistemas.

Teniendo en cuenta la relevancia que tiene la presencia de *E. densa* en el Lago de Tota, este estudio tiene como objetivo analizar la distribución de su biomasa en la zona litoral y realizar ensayos de remoción de nutrientes y materia orgánica en condiciones de laboratorio, con el fin de conocer el papel que juega esta planta acuática como depurador de nutrientes. Así mismo estos resultados servirán de insumo en el modelo de calidad de agua del Lago.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Determinar la distribución espacial y de biomasa de *Egeria densa* en el lago de Tota, junto con la capacidad de remoción de nutrientes y materia orgánica en condiciones de laboratorio.

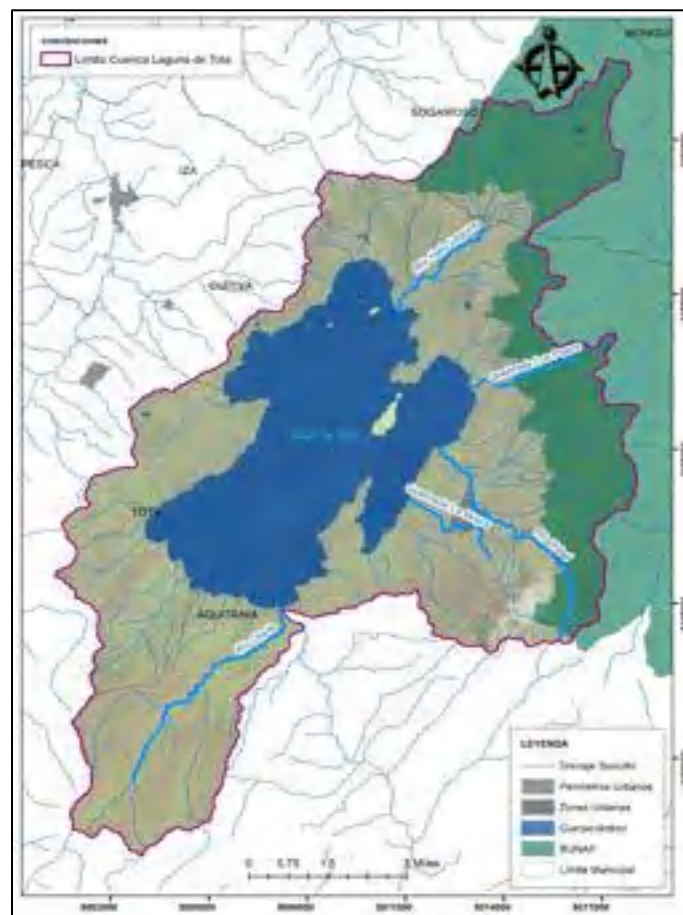
### 2.2 Objetivos específicos

1. Establecer el área de ocupación de *Egeria densa* en el litoral del lago de Tota.
2. Identificar la distribución de la biomasa de *Egeria densa* en el lago de Tota.
3. Estimar la capacidad de remoción de nutrientes y materia orgánica de *Egeria densa* en condiciones de laboratorio.

### 3 ÁREA DE ESTUDIO

El Lago de Tota está ubicado en zona térmica fría a 3.015 metros sobre el nivel del mar (msnm), con una temperatura promedio de 10,8°C, es el tercer lago natural más grande en Latinoamérica por su volumen y el más extenso en el territorio Colombiano, con una superficie de 56,5 Km<sup>2</sup>, está ubicada dentro del ecosistema de páramo Tota-Bijagual-Mamapacha, es provisión de agua para el consumo humano, el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias y procesos industriales en el departamento de Boyacá, así como posee un valor social, ambiental y económico tanto en la región como a nivel nacional. El lago de Tota representa cerca del 14% de la reserva de agua dulce superficial a nivel Nacional, de acuerdo con el estudio Nacional del agua 2014.

El plan de ordenamiento del recurso hídrico Lago de Tota, comprende los municipios de Tota, Sogamoso, Aquitania y Cúitiva, los cuales se encuentran bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá – Corpoboyacá. Los principales tributarios al Lago que son: Río Hatolaguna, Río Tobal, Río Olarte y Quebradas Los Pozos y Mugre. En la **Figura 1** se observa la ubicación espacial de la zona de estudio.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio – Lago de Tota.  
*Fuente:* Consorcio PORH Lago de Tota.



## 4 METODOLOGÍA

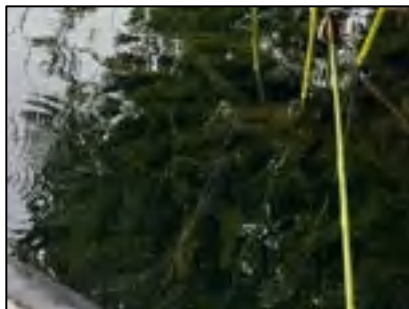
El presente trabajo abarca estudios independientes pero relacionados en su función y aporte al modelo de calidad del lago de Tota, para lo cual, la metodología de dichos estudios complementarios al trabajo realizado en la *Formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH del Lago de Tota y Ríos Tobal, Olarte, Hatolaguna y Las Quebradas La Mugre y Los Pozos*, se dividirá en tres, haciendo énfasis en las metodologías aplicables para cada estudio y su ubicación.

### 4.1 Distribución espacial de *Egeria densa* en el litoral del lago de Tota.

#### 4.1.1 Fase de campo

El estudio se llevó a cabo entre el 17 y 23 de octubre del año 2023, en el cual se realizó desplazamientos fluviales con ayuda de una embarcación a motor y capitán con experiencia, por el perímetro del lago de Tota, siguiendo como referencia el estudio realizado por Pineda (2021).

Para la determinación de la extensión de la macrófita acuática objeto de estudio, se realizaron transectos perpendiculares desde la orilla del lago hasta el interior del lago, acompañados de inspecciones visuales cada metro hasta donde lo permita la transparencia del agua y luego, se utilizó un rastrillo sujeto a un ancla para extraer la planta a diferentes profundidades (**Figura 2**). Adicionalmente, con ayuda del GPS se registró la ubicación del punto más distal de la extensión de la elodea sobre el litoral (**Anexo 1**).



**A**



**B**

**Figura 2.** (A) Inspección visual. (B) Inspección con ayuda de un rastrillo sujeto a un ancla.

Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.

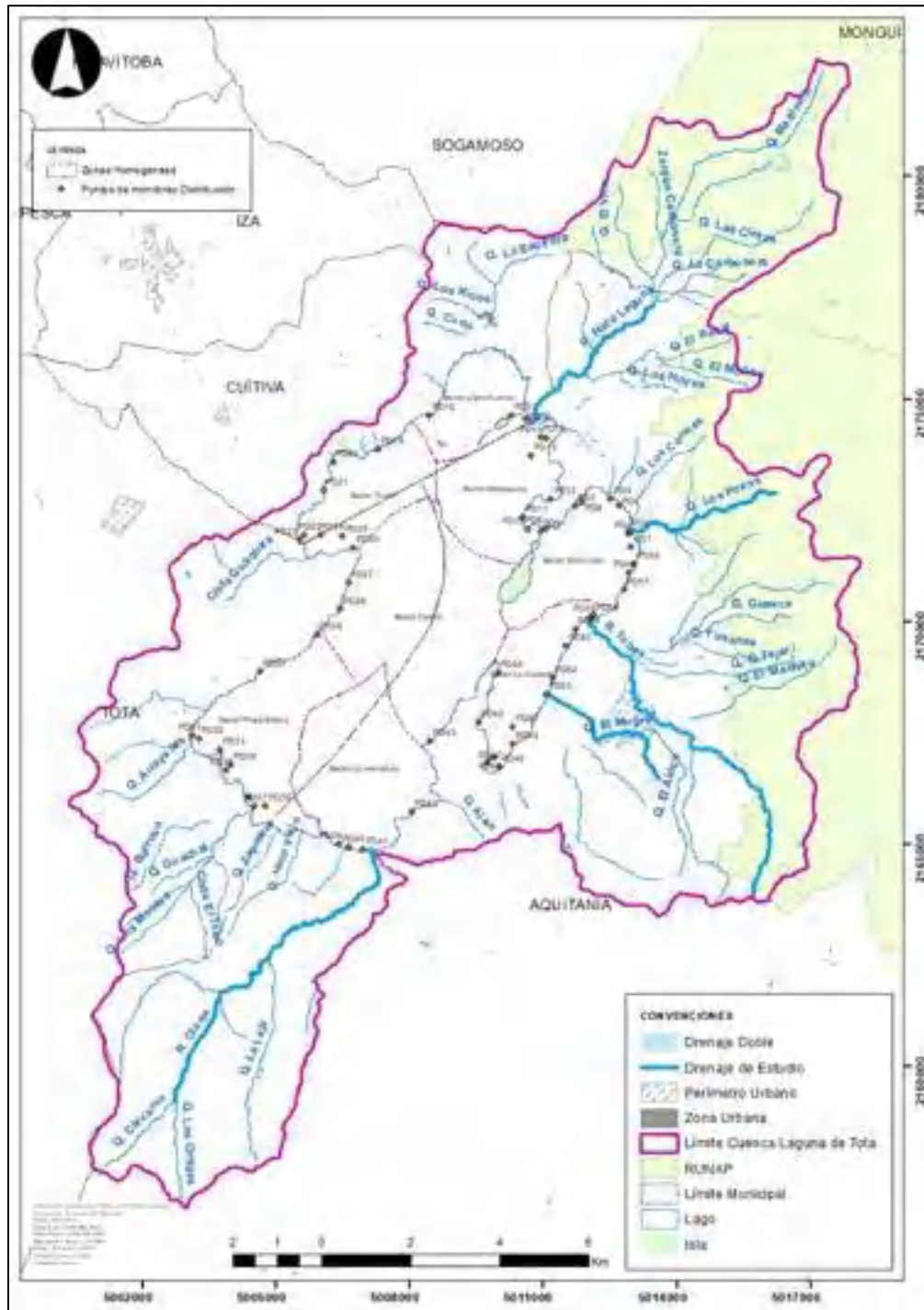
La georreferenciación de la extensión de la macrófita acuática consistió en marcar 59 puntos a lo largo de todo el perímetro del lago, los cuales fueron puntos próximos a los referenciados por el estudio de Pineda (2021) (**Tabla 1; Figura 3**), permitiendo establecer posteriormente la diferencia del aumento o disminución del área de distribución de la macrófita acuática sobre el litoral del Lago de Tota.

**Tabla 1. Puntos de monitoreo - Distribución de Egeria densa en el Lago de Tota**

ID	Norte *	Este *	ID	Norte *	Este *
PD1	2171662	5012974	PD31	2167427	5003124
PD2	2171959	5012924	PD32	2167368	5003259
PD3	2172012	5012918	PD33	2167107	5003733
PD4	2172590	5012689	PD34	2166663	5003866
PD5	2172745	5012510	PD35	2166779	5003975
PD6	2172666	5011864	PD36	2166035	5004383
PD7	2172590	5011719	PD37	2165840	5004505
PD8	2172089	5011067	PD38	2165847	5004755
PD9	2172019	5010940	PD39	2165002	5006405
PD10	2172067	5010650	PD40	2164916	5006632
PD11	2172341	5010530	PD41	2164884	5006948
PD12	2172743	5011171	PD42	2165733	5008051
PD13	2173723	5010728	PD43	2167306	5008464
PD14	2174109	5011067	PD44	2168855	5009987
PD15	2174133	5010934	PD45	2167719	5009542
PD16	2174549	5010604	PD46	2166938	5009895
PD17	2174634	5010288	PD47	2166811	5009754
PD18	2174621	5008430	PD48	2166734	5010005
PD19	2173871	5007294	PD49	2167246	5010312
PD20	2173578	5006279	PD50	2167629	5010312
PD21	2172932	5006058	PD51	2168367	5011061
PD22	2171832	5005534	PD52	2168723	5011199
PD23	2171937	5005619	PD53	2169456	5011511
PD24	2171939	5005993	PD54	2169813	5011715
PD25	2171906	5006480	PD55	2170099	5012062
PD26	2171648	5006726	PD56	2170128	5012132
PD27	2170873	5006621	PD57	2170712	5012810
PD28	2170273	5006436	PD58	2171084	5012926
PD29	2169704	5005916	PD59	2171279	5013042
PD30	2168871	5004628			

(\*) Coordenadas en datum Magna sirgas - origen único nacional.

Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.



**Figura 3.** Localización de los puntos de muestreo - Distribución de Egeria densa en el Lago de Tota.  
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.

## 4.1.2 Análisis de la información

La estimación de la distribución de *Egeria densa* (Elodea) sobre el litoral del lago, se realizó por medio del software ArcGIS 10.8, teniendo en cuenta los 59 puntos registrados durante la fase de campo con los cuales se definió una línea perimetral, y la georreferenciación del área del Lago de Tota suministrada por CORPOBOYACÁ de su base cartográfica.

El área de distribución de la Elodea se estimó a partir del perímetro del Lago de Tota, tomándose dicho perímetro como la orilla del lago, y como parte más distal de distribución de la Elodea el perímetro generado con los 59 puntos de monitoreo, con lo cual se estableció una franja estimada de ocupación de la macrófita acuática desde la orilla hasta el interior del lago.

## 4.2 Distribución espacial de biomasa de *Egeria densa* en el lago de Tota

### 4.2.1 Fase de campo

Para el presente estudio se tuvo en cuenta como base metodológica el artículo científico realizado por Carrillo *et al.*, (2006), con lo que se planteó determinar la distribución de la biomasa de la Elodea (*Egeria densa*) en el embalse del Neusa.

La biomasa se determinó mediante el muestreo directo en 30 puntos a lo largo del perímetro del lago durante los días comprendidos entre el 17 y 23 de octubre del año 2023, teniendo en cuenta el perímetro de cobertura del estudio de la distribución espacial de *Egeria densa* en el litoral del lago de Tota. La ubicación de los puntos de monitoreo se presenta en la **Tabla 2** y la **Figura 4**.

**Tabla 2.** Puntos de toma de muestras de biomasa de *E. densa* en el Lago de Tota.

ID	Norte *	Este *	ID	Norte *	Este *
PB1	2168123	5010963	PB16	2171922	5005522
PB2	2169966	5011816	PB17	2171552	5005905
PB3	2170201	5012392	PB18	2171374	5006821
PB4	2171680	5013066	PB19	2170297	5006462
PB5	2172938	5012085	PB20	2169114	5005253
PB6	2172096	5011317	PB21	2167955	5003510
PB7	2172147	5010708	PB22	2167142	5003782
PB8	2172850	5010883	PB23	2165745	5004669
PB9	2173570	5011120	PB24	2164974	5007177
PB10	2173989	5011038	PB25	2165947	5008277
PB11	2174665	5010417	PB26	2166973	5008430
PB12	2175444	5009076	PB27	2168285	5009136
PB13	2173860	5007301	PB28	2169114	5009941
PB14	2173645	5006306	PB29	2168077	5009758
PB15	2172699	5006061	PB30	2167057	5010241

(\*) Coordenadas en datum Magna sirgas - origen nacional.

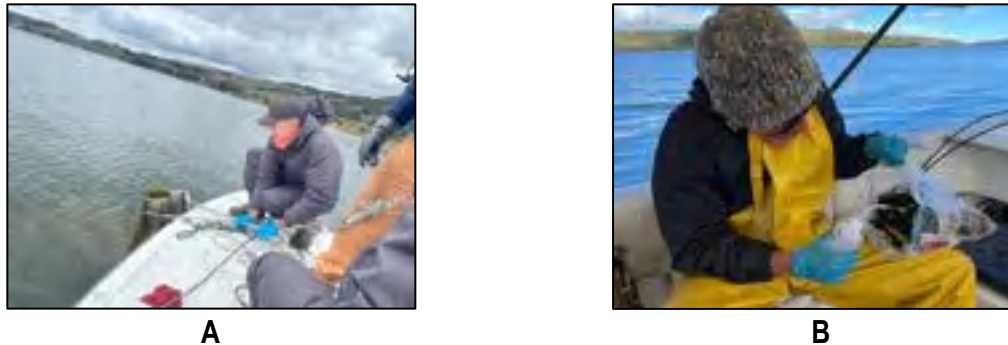
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.



**Figura 4.** Localización puntos de muestreo- Distribución de biomasa de *Egeria densa* en el Lago de Tota  
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.

La toma de la muestra se realizó con ayuda de draga Van Veen de área efectiva 0,05 m<sup>2</sup>, para realizar una extracción de la macrófita acuática muestreando toda la columna de agua, dos veces por punto (**Figura 5**). Las muestras frescas recolectadas y clasificadas fueron enviadas debidamente preservadas y rotuladas al herbario del museo de ciencias biológicas de la Universidad El Bosque, siendo el encargado de determinar el parámetro de biomasa seca, debido a que los laboratorios acreditados por el IDEAM no tienen contemplado el análisis de este parámetro. La biomasa seca fue calculada mediante el secado en un horno de circulación de aire hasta obtener un peso seco constante.





**Figura 5. (A) Extracción de la macrófita con draga (B) Preservación de las muestras.**  
**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota.

#### 4.2.2 Análisis de la información

Luego de obtener los datos de biomasa seca se procedió a estimar la distribución de la biomasa ( $\text{g/m}^2$ ), mediante análisis geoestadístico (Petitgas, 1996, citado por Carillo *et al.*, 2006), por medio del método Kriging de tipo ordinario, utilizando el software ArcGIS.

#### 4.3 Ensayos de remoción de nutrientes y materia orgánica de *Egeria densa* en condiciones de laboratorio.

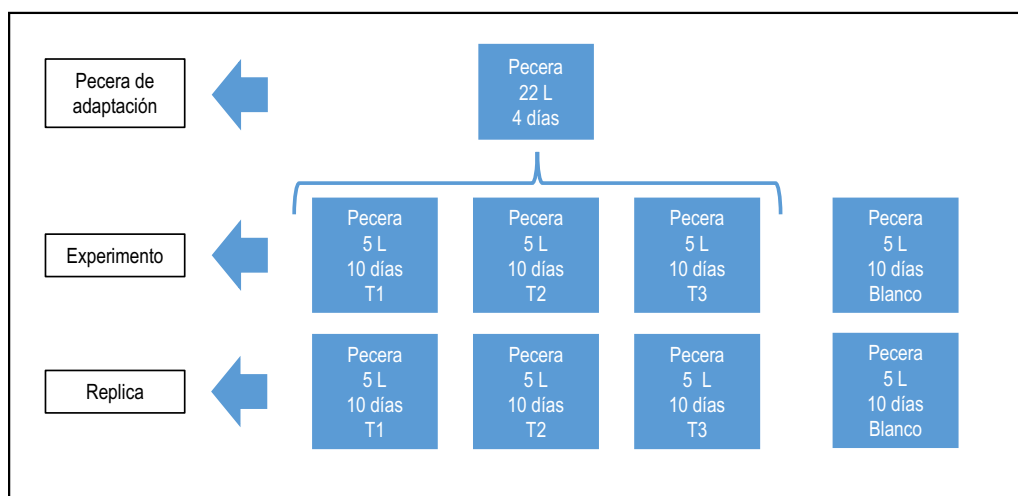
##### 4.3.1 Ensayos de laboratorio

Los parámetros para evaluar la efectividad de la remoción de nutrientes y materia orgánica por parte de la Elodea (*Egeria densa*) fueron: Fósforo Total, Nitrógeno Total (variables de remoción de nutrientes) y DQO (variable respuesta de materia orgánica). Se utilizaron las concentraciones máximas reportadas de cada parámetro durante las dos campañas de monitoreo de calidad de agua realizados durante el PORH Lago de Tota, y a partir de este valor máximo, se establecieron dos concentraciones inferiores para definir una concentración media y otra baja.

Para los ensayos de remoción de nutrientes se tomó como referencia el estudio desarrollado por Acevedo *et al.*, (2016), quienes realizaron pruebas de eliminación de fósforo y nitrógeno con microalgas en condiciones de laboratorio. Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizó tres peceras, en donde cada una contenía concentraciones conocidas de Fósforo y Nitrógeno, con 6 brotes apicales con morfología similar de la macrófita acuática en cada pecera (Feijoó *et al.*, 2002). Adicional a lo anterior se tuvo una pecera control con una cantidad conocida de Fósforo y Nitrógeno sin la macrófita acuática. Todo lo anterior se replicó para obtener mayores datos estadísticos por cada tratamiento (**Figura 6**).

Como se mencionó anteriormente la primera concentración usada fue el valor máximo reportado en las campañas de monitoreo de calidad de agua, los cuales fueron de 9,9 mg/L y 39,22 mg/L para fósforo total y

nitrógeno total, respectivamente. La segunda concentración fue la mitad de la concentración máxima (4,95 mg/L P y 19,61 mg/L N), y como concentración baja se definió la mitad de la concentración media (2,48 mg/L P y 9,81 mg/L N). Lo anterior siguiendo la relación de concentraciones del diseño experimental de Bolaños *et al.*, (2008).



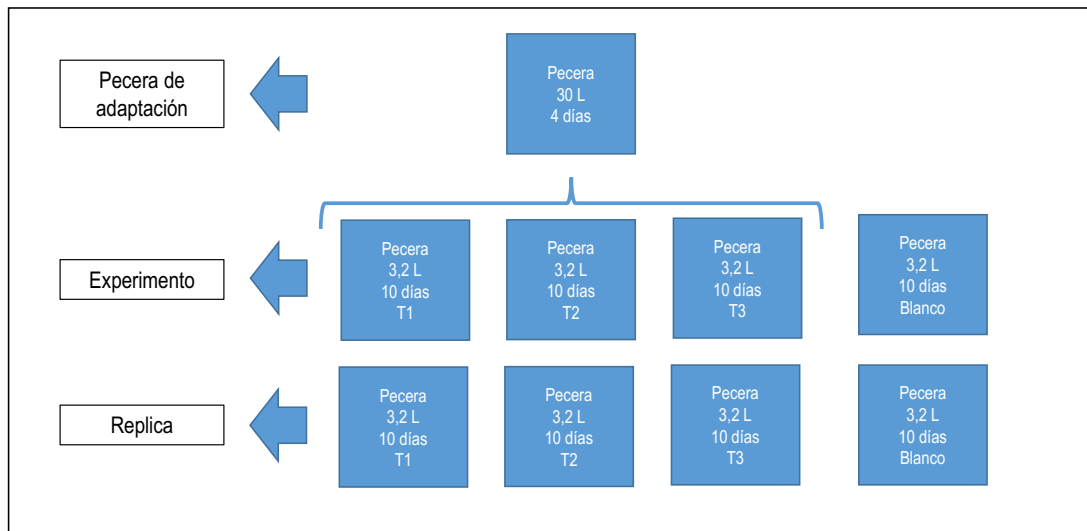
**Figura 6.** Diseño experimental para determinar la capacidad de remoción de nutrientes por parte de la *Elodea*.

**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota

Como referencia metodológica para la estimación de la remoción de materia orgánica disuelta en el agua por parte de la *Elodea*, se tuvo en cuenta los estudios realizados por Bolaños *et al.*, (2008) y Muchtasjar *et al.*, (2021), los cuales evalúan en condiciones de laboratorio la capacidad de remoción de materia orgánica con agua residual sintética. El agua residual sintética que se utilizó en el presente estudio como insumo de nutrientes necesarios para el desarrollo de la planta, se compone de fosfato dihidrogenado de potasio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), fosfato potásico hidrogenado ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) y cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ). Por otro lado, se utilizó el Ftalatato ácido de potasio (FAP) como sustrato orgánico.

Para lo anterior, se realizó un diseño experimental con una réplica del experimento, el cual consistió en utilizar tres concentraciones de Ftalatato ácido de potasio (FAP) expresadas en términos de DQO, una concentración baja (alrededor de 19,75 mg/L  $\text{O}_2$ ), media (alrededor de 39,5 mg/L  $\text{O}_2$ ) y fuerte (alrededor de 79 mg/L  $\text{O}_2$ ). Las concentraciones se establecieron manteniendo las proporciones utilizadas en el estudio de Bolaños *et al.* (2008). Cabe mencionar que las concentraciones propuestas se basaron del valor máximo de DQO reportado en el monitoreo de bajas precipitaciones.

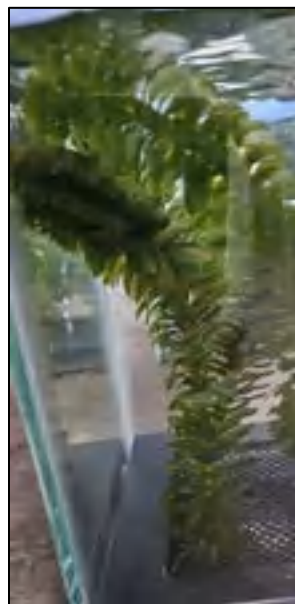
Al igual que el ensayo de nutrientes, se utilizaron 6 estanques de vidrio que contenían las concentraciones con sus respectivas réplicas, más dos estanques estándar que presentaban una solución de agua residual sintética y FAP determinada, las cuales sirvieron como control (**Figura 7**).



**Figura 7.** Diseño experimental para determinar la capacidad de remoción de materia orgánica de la Elodea.

**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota

Los experimentos se desarrollaron en las instalaciones de CORPOBOYACÁ, durante el 20 de octubre y el 1 de noviembre del año 2023, donde, en el primer día las plantas (brotes apicales) fueron extraídas del sector Túnel del lago de Tota (sector definido dentro de las 8 zonas homogéneas del diagnóstico), el cual según el Índice de Calidad del Agua presenta la clasificación “aceptable”, asumiendo que dichas plantas presentan menor exposición a contaminantes. Dichas plantas extraídas para el experimento presentaron similitud con respecto a su peso fresco y con morfología similar (18 cm de larga aproximadamente; **Figura 8**). La cantidad de brotes apicales recolectados correspondieron a una cantidad de 6 brotes por pecera experimental (Feijóo *et al.*, 2002).



**Figura 8.** Morfología de los brotes apicales.

**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota



Seguido de la recolecta de las plantas acuáticas, se mantuvieron en peceras de adaptación con sus respectivos aireadores e iluminación constante durante 12 horas en el lugar destinado para el experimento durante 4 días. Posterior a dicha fase de adaptación, los brotes apicales de *Egeria densa* fueron trasladados después de ser lavados con agua destilada para evitar la transferencia de nutrientes y macroinvertebrados a las peceras experimentales con las concentraciones teóricas propuestas (**Figura 9**). Dichas peceras experimentales presentaron las mismas características de exposición lumínica junto con sus aireadores (**Figura 10**).



**Figura 9.** Traslado de la *Elodea* a las peceras experimentales.  
*Fuente:* Consorcio PORH Lago de Tota



**Figura 10.** Diseño experimental para determinar la capacidad de remoción de materia orgánica y nutrientes por parte de la *Elodea*.  
*Fuente:* Consorcio PORH Lago de Tota

La toma de muestras de DQO (variable respuesta de materia orgánica), fósforo total y nitrógeno total (variables de remoción de nutrientes) fueron tomadas en los días 1, 5 y 10. Las muestras fueron enviadas cada día de la toma de muestra debidamente rotuladas, preservadas y refrigeradas (**Figura 10**) al laboratorio ANALQUIM, el cual se encuentra acreditado por el IDEAM mediante Resolución 0779 de junio de 2023 (**Anexo 2**).



**Figura 9.** Envío de muestras.  
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota

Cabe mencionar que antes de las pruebas de la remoción de nutrientes y materia orgánica, se realizaron una serie de pre-ensayos de las concentraciones a evaluar de DQO, Fosforo Total y Nitrógeno Total, las cuales sirvieron como confirmación de las concentraciones teóricas propuestas y la viabilidad de las concentraciones con respecto a los límites de cuantificación de las técnicas analíticas empleadas por el laboratorio (**Anexo 3**).

#### 4.3.2 Análisis de la información

La tasa de remoción de materia orgánica se determinó por medio de un análisis estadístico descriptivo con los resultados obtenidos de laboratorio para los 3 días de muestras analizados. Por otra parte, se realizó un análisis de homogeneidad para determinar si los datos presentaban similitud entre ellos y evitar datos sesgados. En aras de determinar si los tratamientos presentaron diferencias significativas entre ellos con, se empleó el análisis de Tukey para determinar dicha varianza.

Para determinar la capacidad de remoción de *E. densa* a través del tiempo se utilizó una regresión lineal, con la cual se modelará la capacidad de remoción con más de 10 días, siendo esta técnica de análisis predictora de valores desconocidos.

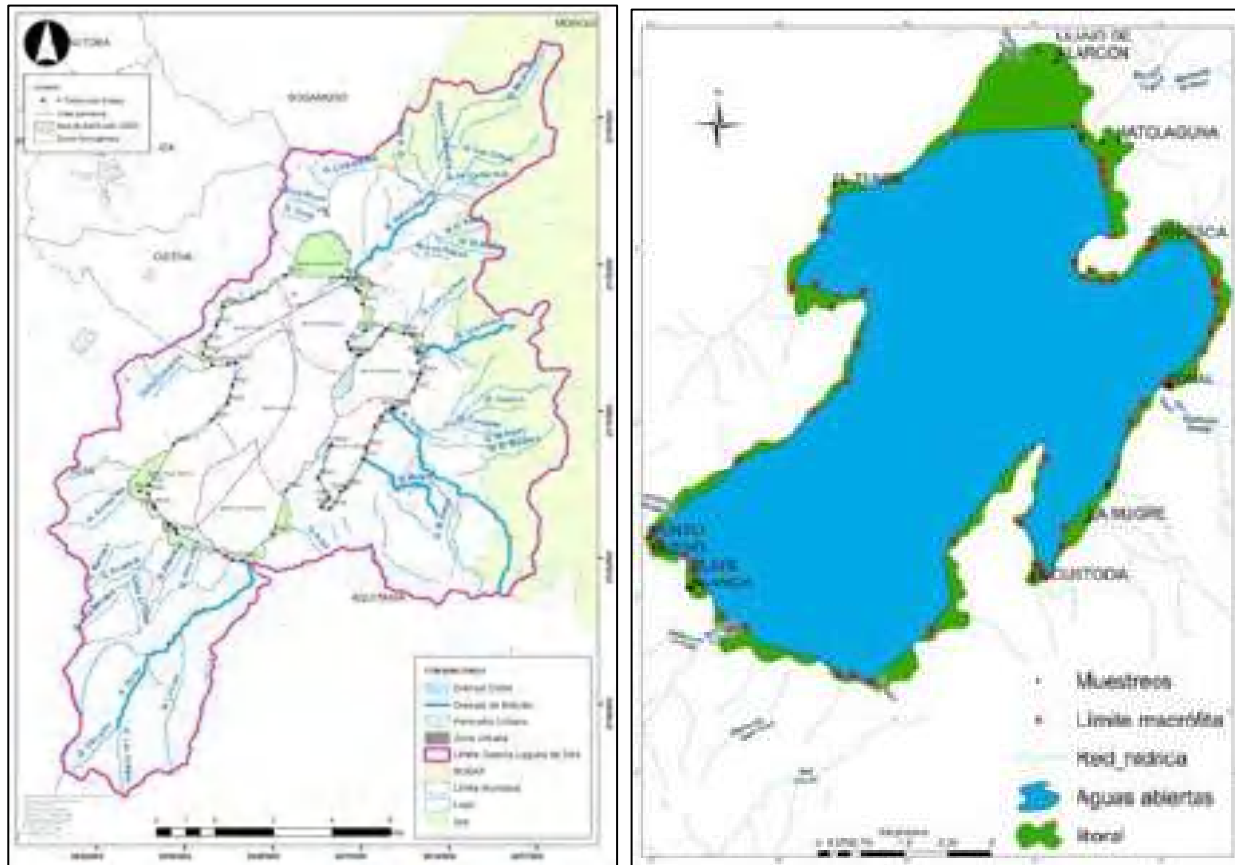
## 5 RESULTADOS

### 5.1 Distribución espacial de *Egeria densa* en el litoral del lago de Tota.

Como se puede observar en la **Figura 11**, la zona que presenta mayor extensión de *E. densa* en el Lago de Tota, fue el sector norte conocido como Llano Alarcón, hecho también evidenciado por Pineda (2021) en el año 2018. Según lo menciona esta autora, dicha condición estaría relacionada con la baja profundidad y pendiente, así como por la influencia de actividades antrópicas en esta zona, agricultura principalmente, lo cual aporta nutrientes al sistema, favoreciendo la proliferación de la macrófita.

La zona que presentó una menor cobertura de Elodea, fue la zona centro, la cual se caracteriza por presentar fuertes pendientes y profundidades que llegan a alcanzar los 48 m, como el registrado punto 27. Dichas condiciones afectan el enraizamiento de la macrófita y la extensión en el litoral.

Al comparar los resultados con el estudio de Pineda (2021), se puede evidenciar un aumento en el área de ocupación de la macrófita, pasando de 6,63 km<sup>2</sup> en el año 2018 a una extensión de 7,01 km<sup>2</sup> en el presente estudio. Como se observa en la **Figura 11**, las áreas donde se presentó un aumento en la extensión de la macrófita acuática fue en el sector de Playa Blanca, puntos del 30 al 38, lo cual podría suponer un aumento en la entrada de nutrientes en esta zona, favorables para la proliferación de la Elodea sobre el litoral. En contraste zonas como El Tunel y Hatolaguna, registraron una menor cobertura. Si bien se presentaron cambios en la distribución de la Elodea en la zona litoral del lago, se resalta que la macrófita continua su presencia en todo el perímetro del Lago.



**Figura 11.** Área de distribución de *Egeria densa* en el litoral del Lago de Tota. (A) estudio realizado por el PORH Lago de Tota en el año 2023 – (B) estudio realizado por Pineda (2021) en el año 2018.

Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota

## 5.2 Distribución espacial de biomasa de *Egeria densa* en el lago de Tota

En el análisis de biomasa se obtuvo valores entre un mínimo de 9,9 g/m<sup>2</sup> y un valor máximo de 77,5 g/m<sup>2</sup> de peso seco (**Tabla 3; Anexo 4**), presentando diferencias entre las zonas del lago.

En la **Tabla 3** se presentan los resultados de la biomasa por punto de monitoreo, los valores más altos se reportan en los puntos P11 y P12 ubicados en Llano Alarcón, que como se mencionó en el numeral anterior, presenta condiciones óptimas para el crecimiento de la elodea. Se destaca también el punto PB10, con un valor de biomasa de 66.1 g/m<sup>2</sup>, localizado en el sector de Hatolaguna, influenciado principalmente por criaderos de trucha.

Así mismo, los puntos PB1 y PB30, presentaron valores altos de la biomasa, los cuales están influenciados principalmente por la presencia cercana del casco urbano del municipio de Aquitania y los vertimientos domésticos de la Quebrada La Mugre.

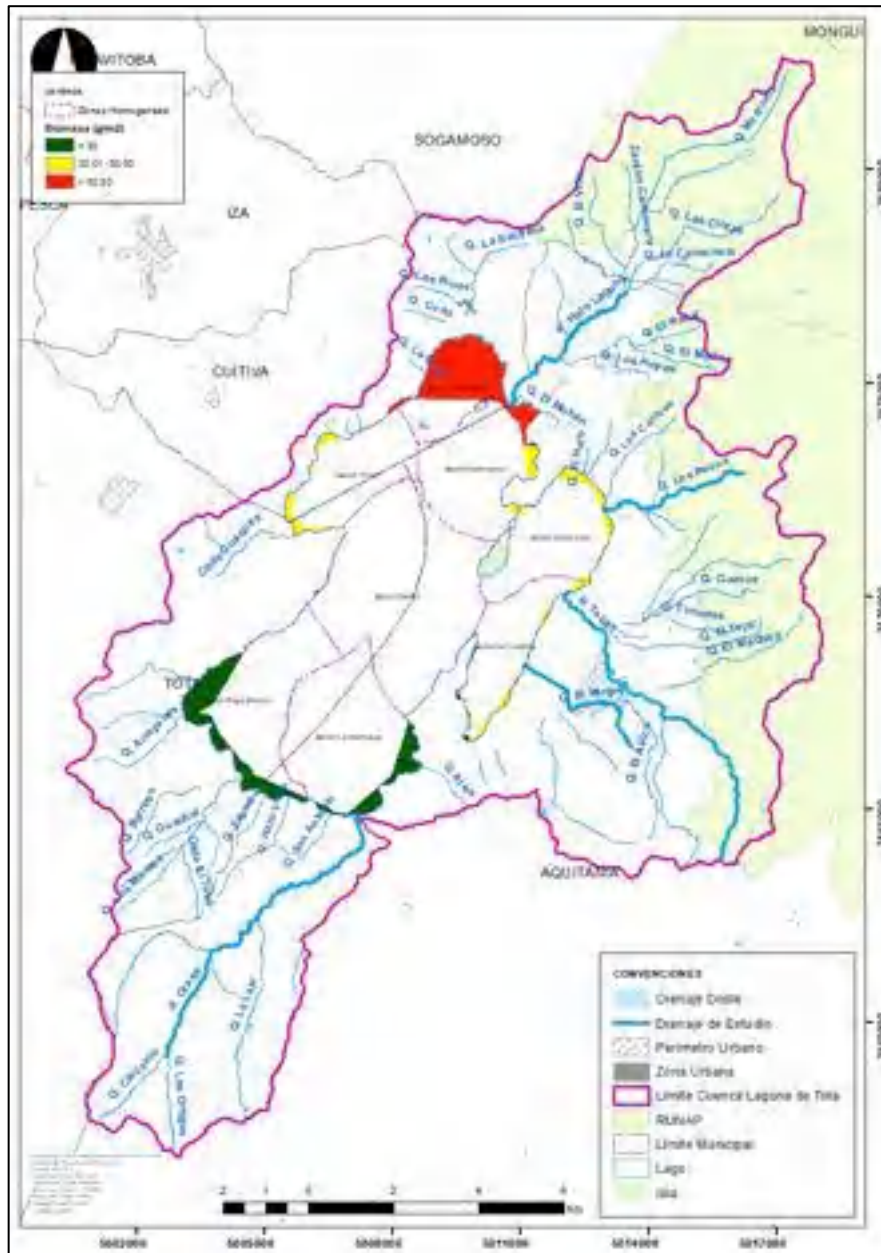
**Tabla 3.** Resultados de biomasa seca (g/m<sup>2</sup>) para los puntos de monitoreo.

Punto de muestreo	Peso seco (g/m <sup>2</sup> )	Punto de muestreo	Peso seco (g/m <sup>2</sup> )
PB1	59,5	PB16	40,9
PB2	39,2	PB17	45,3
PB3	56,6	PB18	50,8
PB4	38,6	PB19	18,6
PB5	48,3	PB20	16,6
PB6	9,9	PB21	25,1
PB7	40,8	PB22	13,6
PB8	22,0	PB23	36,3
PB9	31,5	PB24	14,9
P10	66,1	PB25	27,2
PB11	60,6	PB26	9,9
PB12	77,5	PB27	26,1
PB13	36,7	PB28	14,3
PB14	18,8	PB29	13,7
PB15	51,4	PB30	59,1

**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota

A continuación, se presentan los resultados de la interpolación geoestadística, la cual agrupa valores medios para evitar error con los resultados marginales y presentar un modelo de distribución de biomasa por valores cercanos entre las estaciones de monitoreo.

Según lo anterior y como se observa en la **Figura 12**, la zona de Llano Alarcón presentó las mayores biomásas durante el monitoreo (mayores a 50 g/m<sup>2</sup>), seguido del Túnel, Hatolaguna, Santa Inés y La Custodia con valores medios (entre 30 y 50 g/m<sup>2</sup>), y finalmente con valores inferiores a 50 g/m<sup>2</sup>, están la zona centro, Playa Blanca y Herradura.



**Figura 12.** Estimación de distribución de biomasa de *Egeria densa* en el litoral del Lago de Tota.  
**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota.

### 5.3 Ensayos de remoción de nutrientes y materia orgánica de *Egeria densa* en condiciones de laboratorio.

Los datos de remoción de nutrientes y materia orgánica se presentan en el **Anexo 5**. Según la prueba de Tuckey, se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) entre la mayoría de los tratamientos, con la excepción del tratamiento 1 y el tratamiento control (Blanco), los cuales no presentaron



diferencias significativas. Por el contrario, entre días de tratamientos no se registraron diferencias estadísticamente significativas.

Para las concentraciones iniciales propuestas teóricamente a partir de los resultados de los parámetros analizados durante las campañas de monitoreo del PORH Lago de Tota, se obtuvieron concentraciones cercanas a las propuestas para el Nitrógeno total (**Tabla 4**), a diferencia de atribuido del Fósforo total y DQO, los cuales presentaron concentraciones superiores a las propuestas en la metodología, posiblemente atribuido a la transferencia de nutrientes por las macrófita o la reacción química entre reactivos y compuestos.

**Tabla 4.** Concentraciones iniciales en mg/L de los tratamientos aplicados para cada ensayo.

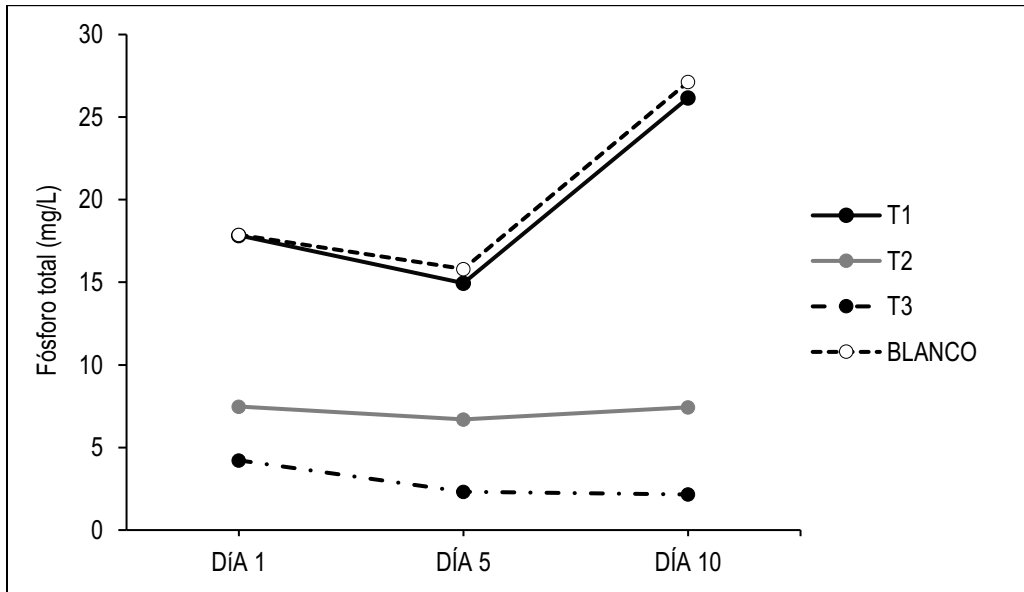
ENSAYOS DE REMOCIÓN DE NUTRIENTES				ENSAYOS DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA		
REPORTE	TRATAMIENTO	P	N	REPORTE	TRATAMIENTO	DQO
258063	TPN-1	17,74	31,90	258071	TDQO-1	164
258064	TPN-2	8,02	18,50	258072	TDQO-2	113
258065	TPN-3	5,81	8,40	258073	TDQO-3	105
258066	BLANCO-1	16,54	35,30	258074	BLANCO-1	160
258067	TPN-1.1	17,94	33,60	258075	TDQO-1.1	164
258068	TPN-2.1	6,94	20,20	258076	TDQO-2.1	125
258069	TPN-3.1	2,63	9,00	258077	TDQO-3.1	102
258070	BLANCO-1	19,20	30,20	258078	BLANCO-1.1	156

**Fuente:** Consorcio PORH Lago de Tota.

El tratamiento uno (T1) del Fósforo total presentó un comportamiento similar al control (Blanco) señalando una leve reducción entre el día 1 y 5, seguido de un aumento significativo en el día 10 (**Figura 13**). Lo cual puede estar relacionado a la cantidad disuelta de los compuestos, las cuales no fueron posibles de asimilar por los brotes apicales empleados en cada pecera de análisis, impidiendo una reducción y en lo contrario causando una osmosis entre la macrófita acuática y el medio con una concentración mayor del nutriente

En contraste, el tratamiento T3 (bajas concentraciones) presentó una reducción gradual del fósforo total, pasando de 4,22 mg P/L en el día 1 a 2,15 mg P/L en el día 10, lo cual equivale a un 48,93% de asimilación. En el caso del tratamiento T2, se registraron leves cambios ( $p>0,05$ ), con una reducción hacia el día 5, seguido de un aumento, el cual no alcanzó a superar el valor registrado al inicio del ensayo.

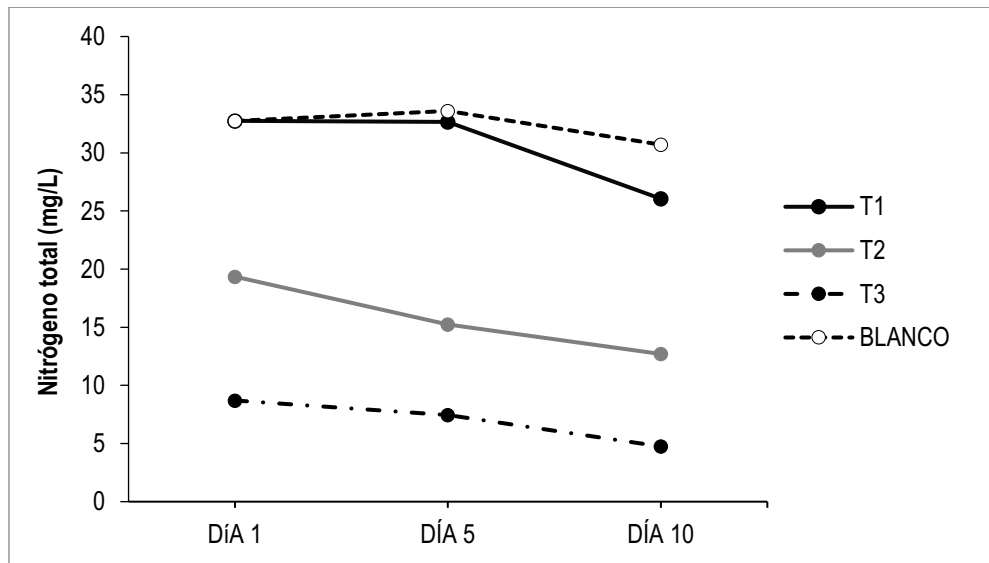
Lo anterior estaría indicando que la asimilación de fósforo por parte de la macrófita es más eficiente en condiciones de bajas concentraciones.



**Figura 13.** Diferencia en la concentración de Fósforo total disuelto durante 10 días.  
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.

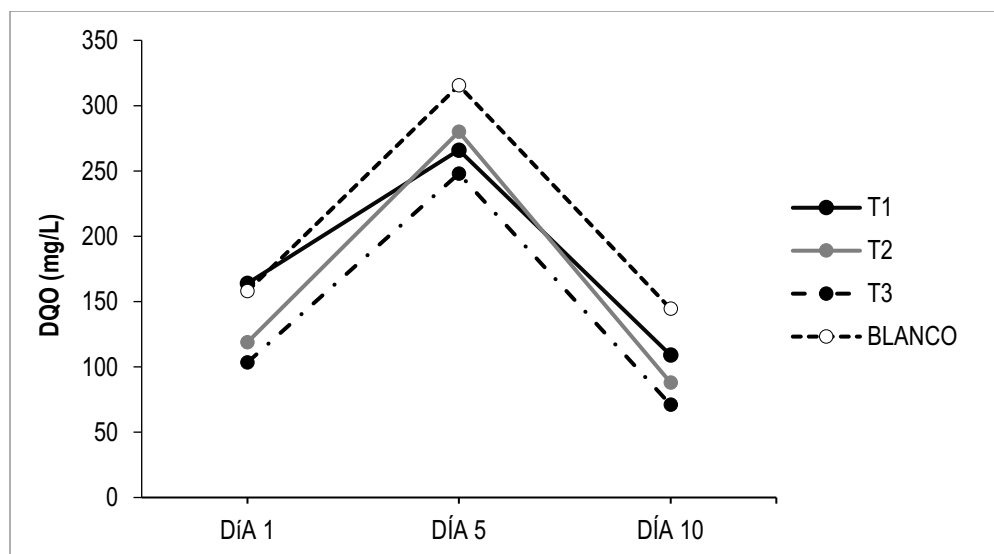
Para el caso de las concentraciones de Nitrógeno utilizado para todos los tratamientos se observó una disminución durante los 10 días de ensayos (**Figura 14**). En el T1 se observó que para el día 5 la concentración inicial se redujo en un 0,3% (0,1 mg N/L), y para el día 10 una reducción del nutriente disuelto en el medio del 20,46% (6,7 mg N/L).

El Tratamiento 2 por su parte, presento una disminución del 21,18% (4,10 mg N/L) en el día 5 y 34,37% en el día 10 (6,65 mg N/L). En el Tratamiento 3 se evidencio una mayor reducción del Nitrógeno Total disuelto, en donde para el día 5 hubo una reducción del 14,37% (1,25 mg N/L) y en el día 10 45,40% (3,95 mg N/L).



**Figura 14.** Diferencia en la concentración de Nitrógeno total disuelto durante 10 días.  
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.

Finalmente, para el análisis de la remoción de materia orgánica teniendo como variable respuesta la Demanda química de oxígeno, se observó un comportamiento diferente al esperado, en donde para el día 5 se presentó un aumento de las concentraciones iniciales (**Figura 15**), posiblemente a las mismas causas del caso registrado en el Fosforo total al día 10, teniendo en cuenta que el agua residual sintética utilizada en estos experimentos tiene como base nutritiva compuestos fosforados. Cabe mencionar que para este día todas las peceras de este análisis, presentaron una apariencia blanquecina (**Figura 16**), que posiblemente está asociada a ese aumento de compuestos fosforados, causando cierta turbiedad del agua.



**Figura 15.** Diferencia en la concentración de DQO disuelto durante 10 días.  
Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.



Para el día 10, la condición de coloración del agua retornó a su estado original, así como las concentraciones de DQO, las cuales alcanzaron valores ligeramente inferiores a las iniciales, presentando porcentajes de reducción de materia orgánica del 33,54% en el T1, 26,05% para el T2, y 31,40% en el T3.



Figura 16. Cambio de coloración de agua al día 5 en las peceras de DQO.

Fuente: Consorcio PORH Lago de Tota.

La tasa de asimilación de la macrófita acuática por el peso seco promedio de los brotes apicales utilizados en los ensayos (2,3 g), se basó en los resultados promedio obtenidos a partir del tratamiento 3 en cada análisis, siendo las concentraciones más cercanas a las teóricas propuestas para el estudio y las más cercanas a las halladas en las campañas de monitoreo.

Dicha tasa de asimilación para cada parámetro se determinó a partir de la ecuación de la recta hallada con los resultados obtenidos durante los 3 días de muestreo (1, 5 y 10 día), con la excepción del DQO, en la que se utilizó solamente los resultados del día 1 y 10 debido al aumento de la concentración que se evidenció en el día 5 de muestreo.

Para el Fósforo total se determinó la siguiente ecuación de  $y = -0,2214x + 4,0772$  teniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,76. Con lo anterior, se interpoló una eliminación de la totalidad del parámetro disuelto en el agua al día 19 para la escala experimental utilizada.

El Nitrógeno total presentó una ecuación de  $y = -0,443x + 9,3295$  con un coeficiente de determinación de 0,98, donde para el día 22 la concentración estaría ausente en el agua para dicha regresión empleada.

En el caso de la demanda química de oxígeno (DQO), la ecuación de la recta se definió como  $y = -3,6111x + 107,11$  con un  $R^2$  de 1, con la cual se estimó que la escala experimental utilizada en los ensayos tardaría 30 días en remover todo el parámetro disuelto.

## 6 CONCLUSIONES

- Según el análisis de distribución de la Elodea, y al compararlo con el estudio realizado en el año 2018, se evidenció un leve aumento en el área de colonización de la macrófita, que se presentó principalmente en el sector occidental de Playa Blanca. Sin embargo, sectores como Llano Alarcón, continúan registrando la mayor cobertura.
- La biomasa de *E. densa* presentó pesos medios diferentes entre los sectores del lago, evidenciando una mayor biomasa en puntos cercanos a actividades antrópicas como Llano Alarcón, Hatolaguna y La Custodia.
- Se recomienda realizar monitoreos de seguimiento de esta planta acuática en la zona litoral del Lago, ya que un crecimiento desmedido puede contribuir a acelerar procesos de eutroficación y afectar los servicios que el lago presta a la población.
- El estudio de remoción de nutrientes y materia orgánica evidencia que a mayor cantidad de nutrientes la biomasa utilizada no logra asimilar los nutrientes, lo cual se corrobora con los ensayos a menores concentraciones de nutrientes. El Fósforo total y Nitrógeno total presentaron mayores porcentajes de remoción en el tratamiento 3 (T3), lo cual indica que la macrófita acuática tiene la capacidad de fitoremediación.
- Este estudio corresponde a una aproximación de la capacidad que tiene *E. densa* en la absorción de nutrientes y materia orgánica en el Lago de Tota. Se recomienda ampliar este estudio con un análisis de captación no solo de la columna de agua sino también del sedimento, dado que esta macrófita presenta raíces que le permiten igualmente la absorción de nutrientes desde los sedimentos. Así mismo, es aconsejable evaluar otras variables, como las diferentes formas de nitrógeno y fósforo, usar diferentes partes de la planta o aumentar la biomasa utilizada.
- Si bien el crecimiento excesivo del cinturón de macrófitas de la zona litoral del Lago de Tota, puede llegar a generar problemas medioambientales, es posible afirmar que este se ha convertido en una barrera para filtrar la carga de nutrientes que llegan al Lago por escorrentía y por los afluentes, favoreciendo por tanto la calidad del agua del sistema.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, S., Pino, N. J., & Peñuela, G. A. (2017). Biomass production of *Scenedesmus* sp and removal of nitrogen and phosphorus in domestic wastewater Remoción de nitrógeno, fósforo y producción de biomasa de *Scenedesmus* sp en agua residual domestica. In *Ingeniería y Competitividad* (Vol. 19, Issue 1).
- Barko, J. W., D. Gunnison. & S. R. Carpenter. 1991. Sediment interactions with submers macrophyte growth and community dynamics. *Aquat. Bot.*, 41: 41-65.
- Bolaños, S., Casas, J., & Aguirre, N. (2008). Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrofitas *P. stratiotes* y *E. densa* en un sistema Batch. *Gestión y Ambiente*, 11(2).
- Carrillo, Y., Guarín, A., & Guillot, G. (2006). Biomass distribution, growth and decay of *Egeria densa* in a tropical high-mountain reservoir (NEUSA, Colombia). *Aquatic Botany*, 85(1), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2006.01.006>
- Feijoó, C., García, M. E., Momo, F., & Toja, J. (2002). Nutrient absorption by the submerged macrophyte *Egeria densa* Planch.: Effect of ammonium and phosphorus availability in the water column on growth and nutrient uptake. *Limnetica*, 21(1–2), 96–104. <https://doi.org/10.23818/limn.21.09>
- Feijoó, C. S., F. R. Momo, C. C. Bonetto & N. M. Tur. 1996. Factors influencing biomass and nutrient content of the submerged macrophyte *Egeria densa* Planch. in a pampasic stream. *Hydrobiologia*, 341 :2 1-26.
- Fontúrbel Rada, F. (2005). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del Lago Titikaka (Bolivia). *Ecología aplicada*, 4(1-2), 135-141.
- Muchtasjar, B., Hadiyanto, H., Izzati, M., Vinceviča-Gaile, Z., & Setyobudi, R. H. (2021). The ability of Water Hyacinth (*Eichhornia crasipes* Mart.) and water lettuce (*Pistia stratiotes* Linn.) for reducing pollutants in batik wastewater. *E3S Web of Conferences*, 226. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600010>
- Pedroza-Ramos, A., Caraballo, P., & Aranguren-Riaño, N. (2016). Estructura trófica de los invertebrados acuáticos asociados a *Egeria densa* (Planch. 1849) en el lago de Tota (Boyacá-Colombia). *Intropica*, 21-34.
- Pineda, L. (2021). Delimitación del Área Superficial de la Cobertura de Macrófitas Acuáticas en el Litoral del Lago de Tota y sus Implicaciones Ambientales. RIUPTC Repositorio Institucional. Documento de Conferencia. Encuentro de Estudios Aplicados, Investigación al Servicio de Sectores Productivo, Ambiental y Tecnológico de Boyacá. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/4830>
- Smith R.L. & Smith T.M. 2001. *Ecología*. 4ª edición. Addison Wesley, Madrid.