



DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA CON BUCHÓN DE AGUA (*Eichhornia crassipes*) MEDIANTE LA MODELACIÓN LOGÍSTICA DE VERHULST PARA EL SECTOR EL ESPINO-RÍO BOGOTÁ PTAP TIBITOC

Determination of the absorption capacity of organic matter with water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) through of the logistic growth model in the sector el Espino-río Bogotá DWTP TIBITOC

Andrés José SUÁREZ MALAGÓN¹, Julie Andrea LARA MENDIVELSO¹, Luz Jaddy CASTAÑEDA RODRÍGUEZ¹, Paula Andrea CASAS CORTÉS¹

1. Facultad de ciencias agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, Facatativá, Colombia.

* For correspondence: joseandrejo@hotmail.com

Received: 29th October 2019. Returned for revision: 22nd April 2021. Accepted: 12th July 2021.

Associate Editor: Nelson Fernández

Citation/ citar este artículo como: Suárez Malagón, A. J., Lara Mendivelso, J. A., Castañeda Rodríguez, L. J. y Casas Cortés, P.A. (2022). Determinación de la capacidad de absorción de materia orgánica con Buchón de Agua (*Eichhornia crassipes*) mediante la modelación logística de Verhulst para el sector el Espino-río Bogotá PTAP Tibitoc. *Acta Biológica Colombiana*, 27(3), 386-393. <https://doi.org/10.15446/abc.v27n3.83223>

RESUMEN

La Planta de Tratamiento de Agua Potable- PTAP Tibitoc se abastece en gran medida por el Río Bogotá, a través de dos bocatomas ubicadas en el sector El Espino. Allí es evidente el desarrollo incontrolado de la macrófita Buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) atribuido al constante aporte de carga de nutrientes y materia orgánica aguas arriba de la cuenca, lo cual genera problemas en la dinámica ecosistémica del cuerpo de agua, así como en la calidad del recurso que abastece a la planta. El propósito de este estudio, mediante una metodología experimental verdadera, es evaluar la capacidad de absorción de materia orgánica de la especie, representada por la cantidad de materia orgánica removida por unidad de biomasa, estimando un valor máximo de remoción equivalente a 19,53 mg O₂ L⁻¹/g por unidad de Buchón, y con ayuda del modelo logístico de crecimiento, se valida el periodo en el cual se puede mantener la especie en el cuerpo de agua, sin que esta afecte el sistema, concluyendo que su eficiencia empieza a decaer entre los 165 a 195 días después de sembrar los especímenes en cauce de la zona de estudio, luego de los cuales se sugiere su remoción.

Palabras Clave: Bioacumulación, capacidad de carga, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), macrófitas, modelo de Verhulst.

ABSTRACT

The Potable Water Treatment Plant - PWTP Tibitoc is largely supplied by the Bogotá River, through two intakes located in the sector El Espino. Is evident the uncontrolled development of the macrophyte *Eichhornia crassipes* attributed to the constant contribution of nutrients and organic matter load upstream of the basin, which generates problems in the ecosystem dynamics of the body of water, as well as in the quality of the resource that supplies to the plant. The purpose of this study, through a true experimental methodology, is to evaluate the absorption capacity of organic matter of the species, represented by the amount of organic matter removed per unit of biomass estimating a removal value of 19.53 mg O₂ L⁻¹/g for unit of Water Hyacinth. With the help of the logistic growth model, the period in which the species can be maintained in the reservoir is validated without affecting the system, concluding that its efficiency decay between 165 to 195 days after sowing the specimens in the course of the study area, after which removal is suggested.

Keywords: Bioaccumulation, Biological Oxygen Demand (BOD), carrying capacity, macrophytes, Verhulst model.

INTRODUCCIÓN

El uso de macrófitas como agentes biorremediadores dentro del tratamiento de aguas, ha demostrado una eficacia aceptable en la remoción de nutrientes disueltos, sustancias orgánicas e incluso metales pesados (Porras, 2017), en virtud de su adaptabilidad, asimilación y resistencia en sistemas acuáticos con altas concentraciones de este tipo de sustancias, aportadas habitualmente por la escorrentía o vertimiento de aguas residuales de procedencia antrópica (Bolaños et al., 2008; Lozada, 2020). Sin embargo, la evaluación de estas capacidades se realiza en sistemas controlados como humedales artificiales, laboratorios o en sistemas de tratamiento de aguas residuales (Porras, 2017), haciendo necesario identificar si la eficiencia de remoción es favorable cuando las macrófitas se encuentran implícitas en la naturaleza (Pinzón, 2012), y pueden apoyar en la capacidad de asimilación y dilución de elementos descargados en los cuerpos de agua que habitan, considerando los efectos asociados con su crecimiento, el cual puede afectar en su momento la calidad del agua (Bacca y Morales, 2007), limitando el recurso y la infraestructura asociada con el canal hidráulico del cuerpo de agua, por la acción de sedimentación de origen macrófito y la ocupación del mismos por su desarrollo poblacional (Bohórquez, 2009).

Esta situación no es ajena en la cuenca alta del Río Bogotá, la cual actúa como fuente de abastecimiento de agua cruda de la PTAP Tibitoc en el sector El Espino, en donde, particularmente la sobreoferta de nutrientes se ve reflejada en la abundancia de las poblaciones contiguas y no contiguas de la macrófita *Eichhornia crassipes* a lo largo de su ribera (Rodríguez, 2003), influyendo negativamente sobre la calidad del agua que ingresa a los procesos de operación de la Planta Tibitoc, puesto que una vez la especie alcanza su punto máximo de absorción de materia orgánica, se genera la liberación paulatina de los elementos removidos inicialmente, retornándolos al cuerpo de agua como solutos y/o sedimentos (Rodríguez, 2004), lo cual incide en los valores de turbidez que ingresan a la dársena de pre sedimentación de la PTAP (López y Polo, 2016); y a su vez, obstruyendo las rejillas asociadas con las bocatomas, por causa de su alta capacidad de ocupación (Instituto Humboldt, 2017; Paredes, 2004), ya que ésta, al ser una especie exótica invasora ejerce su potencial ecológico mediante una explosión demográfica, que aprovecha la abundancia en disposición de nutrientes y espacio de este cuerpo lótico (Salgado y Paz, 2015).

Es por esto que, se hace necesario relacionar la facultad de ganancia de masa vegetal con la capacidad de absorción de materia orgánica removida por unidad de biomasa, e identificar los tiempos favorables en que se puede emplear la especie sin que se vea afectado el sistema negativamente, con ayuda de la validación del modelo logístico de Verhulst, especialmente dirigido a evaluar el crecimiento del Buchón de agua con base a su ganancia de biomasa dentro del

experimento, puesto que, esta especie se puede emplear como agente reductor de la carga de materia orgánica que ingresa al sistema, aprovechando que su capacidad de acumulación de biomasa y crecimiento es acelerado (Rodríguez, 2004; Rial, 2013; Guio y Toscano, 2018).

De hecho, en la zona las investigaciones que involucran a la *Eichhornia crassipes* van dirigidas a identificar la calidad del recurso hídrico al interior de la dársena de pre sedimentación, estudiándola como mecanismo de bioacumulación de metales pesados (Rodríguez, 2003), como fitorremediador en condiciones controladas (Carreño, 2020) y como variable sugerida para establecer la modelación de la calidad del agua del Río Bogotá en la cuenta alta (Rodríguez, 2013; Agudelo y Fajardo, 2019); sin involucrar su facultad como unidad natural de remoción de materia orgánica disuelta en el sistema, puesto que la información actual sobre este tema es inexistente en la zona objeto de estudio (Lara y Suárez, 2019), por lo tanto, esta investigación tiene una gran importancia desde el estudio científico y técnico porque se fortalecería el proceso de aprovechamiento de esta especie invasiva en la operatividad de la PTAP Tibitoc.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló bajo un diseño experimental verdadero (Shuttleworth, 2008), para comprobar la relación matemática entre una variable independiente (causa) que afecta una dependiente (efecto), representado por la biomasa respecto a la absorción de materia orgánica respectivamente, para realizar una aproximación de la ocurrencia de este fenómeno in situ, realizando un contraste entre un grupo de unidades experimentales de control y un grupo experimental.

La fase experimental se desarrolló entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018, a través de la instalación de las dos unidades de monitoreo, la unidad de control sobre el cauce del Río Bogotá (in situ) instalado bajo las coordenadas 4°58'18,5563"N y 73°57'48.7854 W. Este sistema constituido por cuatro limnocorrales de 1 m², en concordancia con las especificaciones sugeridas por Rodríguez (2003). La unidad experimental consistió en un sistema confinado constituido por tres cámaras de desarrollo vegetal con dimensiones de 1m² y altura de 50 cm (Rodríguez et al., 2010), ubicadas en la ribera del Río bajo las coordenadas 4°58' 17,6692"N y 73°57'49,0177 W. Para determinar la cantidad de unidades de monitoreo que conformaron al grupo de control, se utilizó la ecuación de número de estaciones requeridas, establecida en el Standard Methods methods for the examination of water and wastewater para el muestreo de macrófitas, y para el grupo experimental este valor se obtuvo a partir de la adaptación de la ecuación "único estrato" de Porro, Chacón y Rüginitz (2009).

En cada estructura se realizó la siembra de siete individuos jóvenes de Buchón de Agua por cuadrante, estableciendo

un tamaño de muestra equivalente a 28 especímenes para los limnocorales y 21 individuos para el sistema confinado, los cuales debían poseer de tres a seis hojas sin manchas y/o daños en la superficie foliar o del peciolo, una longitud de raíz inferior a 19 cm con coloración marrón, y con un peso húmedo establecido entre 20 a 40 g, los cuales fueron monitoreados los días 1, 16, 31, 48, 61, 77 y 92, para identificar la capacidad de acumulación de biomasa y el crecimiento de la población en cada unidad.

Ahora bien, para estimar la relación de captura por absorción de materia orgánica disuelta en el medio por parte del Buchón, se emplearon los valores de biomasa en peso seco según el numeral 10400 D de los "Standard Methods" para macrófitas (2005), comprobando a su vez si el desarrollo de los especímenes en las dos unidades reflejaba un comportamiento similar. A su vez cada 30 días se realizó la valoración del parámetro de DBO₅ en los reactores de desarrollo vegetal para identificar el contenido de materia orgánica dispuesta en el medio, según los criterios establecidos por el método 5210B-ASTMD 888-09MET.C del numeral 5220 C (Baird et al., 2005).

Esto permitió tener a través de la Fórmula 1 que relaciona la tasa promedio de remoción y la Fórmula 2 que involucra la cantidad de materia orgánica removida por unidad de biomasa (Benítez et al., 2011) una aproximación del comportamiento de la degradación aeróbica de la materia orgánica, a lo largo del ciclo de crecimiento eco fisiológico de la especie; siendo el grupo experimental la unidad con la cual se estableció la relación, y de esta manera se formuló *in situ* la ocurrencia del fenómeno.

$$v = \frac{C_i - C_f}{N \times t} \quad (1)$$

Para la Fórmula 1: V es la Tasa promedio de remoción; C_i es la Concentración inicial de DBO₅ (mg O₂/L); C_f es la Concentración final de DBO₅ (mg O₂/L); N equivale al Peso seco de biomasa (g) y t, es el tiempo de exposición expresado en días.

$$q = \frac{v(C_i - C_f)}{S} \quad (2)$$

Donde q corresponde a la cantidad de materia orgánica removida por unidad de biomasa; v es el volumen de la solución (m³); C_i y C_f corresponde respetivamente a la concentración inicial y final de DBO₅ (mg/L O₂), y S es la cantidad de Buchón en peso seco (g).

Simultáneamente, con la información recopilada de biomasa se estimó el crecimiento de la población de macrófitas, por medio de la validación del modelo matemático de Verhulst, ya que *Eichhornia crassipes* usa un mecanismo de propagación vegetativa eficiente para aumentar su población debido a la poca capacidad para acumular biomasa por individuo (Neira, 2020).

Para alimentar el modelo matemático de Verhulst reflejado en la Fórmula 7, se identificaron la Capacidad de Carga K mediante la Fórmula 3, la Constante de Crecimiento Relativo de la población C mediante la Fórmula 4 y la Tasa de Crecimiento Específico r mediante la Fórmula 5 (Gutiérrez, 1989). Para el cálculo de K, C y r, se determinaron tres intervalos correspondientes a t₀, t₁, y t₂ para hallar respectivamente los parámetros N₀, N₁ y N₂. Se obtuvo t₀ del promedio de los productos entre el peso seco y la densidad relativa N₀ (Morlans, 2004), el cual se relaciona con la densidad dentro de los cuadrantes, según lo establecido por la Universidad de Buenos Aires (2016) en el método areal o de parcelas para la estimación de la abundancia en macrófitas, y ejecutado en la fase inicial (instalación) del experimento.

El valor establecido para t₁ en cada unidad, fue asignado el día en el que se identificó un marcado crecimiento exponencial de acumulación de biomasa N₁, y por cada unidad se calculó el promedio en esa fecha. Para el grupo control corresponde el día 31 y para el experimental el día 15. Por último, t₂ corresponde al valor máximo de ganancia de biomasa N₂, promediado para cada unidad experimental.

Capacidad máxima de carga (K):

$$K = \frac{2 \times N_0 \times N_1 \times N_2 - N_1^2 (N_0 \pm N_2)}{N_0 \times N_2 - N_1^2} \quad (3)$$

En caso de que el valor resultante de la Fórmula 3 sea inferior a la biomasa por número de individuos inicial, se puede tomar la estimación más alta obtenida de la Capacidad máxima de carga K (Rodríguez, 2003).

Constante de Crecimiento Relativo de la población (C), hallado con la Fórmula 4:

$$C = \ln \frac{(K - N_0)}{N_0} \quad (4)$$

Crecimiento Específico r, estimado con la Fórmula 5:

$$r = \frac{1}{t_1} \ln \frac{N_1 (K - N_0)}{N_0 (K - N_1)} \quad (5)$$

A partir de estos datos, la validación del modelo se efectuó usando el programa EXCEL de Microsoft Office 2010®, herramienta que permite describir la curva de crecimiento de la *Eichhornia crassipes* para las dos unidades de monitoreo (grupo control y experimental), calculando su evolución a lo largo de un año por periodos de 15 días; para verificar los valores muestreados, estos se pueden encontrar en el repositorio DOI 10.5281/zenodo.4775804.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aumento de biomasa demuestra similitud en su comportamiento para los especímenes evaluados, tanto en el grupo *in situ*, como en el grupo confinado, afinidad observada

en la Figura 1. Se deduce esta tendencia analizando tres fases: la primera representada por un estado de latencia (indicador amarillo), en la cual la acumulación de masa seca es lenta en ambos grupos a causa del proceso de recuperación de los especímenes manipulados en la siembra y la facultad de los mismos para adaptarse a las nuevas condiciones de competencia por recursos. Este proceso se dio en los primeros 16 días para el grupo experimental y a los 31 días para el grupo control. La segunda fase corresponde a una fase exponencial (indicador azul), que refleja la adaptación a los factores de estrés de la etapa anterior, lo cual se traduce en el incremento de la ganancia de biomasa atribuida a la capacidad de crecimiento y generación de estructuras vegetativas por parte de los individuos evaluados, puesto que a medida que obtiene los requerimientos nutricionales y espaciales acorde con la oferta que existe en el medio, los individuos incrementan su crecimiento. Este comportamiento se evidencio entre los días 16 al 31 para el grupo confinado y entre los días 31 al 77 para el grupo *in situ*.

Finalmente, en la tercera fase de deceso (indicador rojo en la Fig. 1), hay un decrecimiento relacionado con la baja capacidad de generación y retención de nuevas estructuras vegetativas mediante clones por estolones (Rodríguez, 2003), o por el deterioro fisiológico de las estructuras encargadas tanto de dar flotabilidad (peciolos), como las especializadas en la conversión sintética (hojas). Este fenómeno fue evidente, entre el día 77 y el 92 para el grupo de control y, del día 31 al día 92 para el grupo experimental.

Al comparar la tendencia de los datos entre las dos unidades de muestreo, existen similitudes en la distribución de los valores hallados; pero se evidenció que los tiempos en que se llega a cada etapa fueron diferentes, debido a que los especímenes se encontraban bajo condiciones de estrés distintas puesto que el grupo control tenía mayor oferta de nutrientes que promovían su crecimiento, en comparación con el grupo experimental que no tenía un flujo constante de estos elementos aportados por el caudal del Río Bogotá, razón que generó una competencia interespecífica, que repercutió en la acelerada producción de biomasa en el Buchón de agua reflejada en su alta densidad (Ramírez, 2019).

Con relación a los resultados obtenidos del comportamiento de oxidación biológica (DBO5) observados en la Fig. 2, se obtuvo un valor inicial de 6 mg O₂/L, que gradualmente se incrementó hasta 151 mg O₂/L, correspondiendo al pico de mayor oxidación biológica de la materia orgánica, y que se percibió a los 30 días. Este incremento del parámetro puede relacionarse con el proceso de bioconcentración en función del punto máximo de generación de biomasa, ya que los especímenes al alcanzar una mayor capacidad fotosintética y al incorporar biomasa en nuevos especímenes de origen asexual, ejercen su mayor rendimiento a nivel morfofisiológico, lo cual estimula el crecimiento de poblaciones de microorganismos simbióticamente asociados a su raíz, que contribuyen a la descomposición de la materia orgánica disuelta, dando una mayor demanda de oxígeno y generando un cambio en la calidad del recurso hídrico.

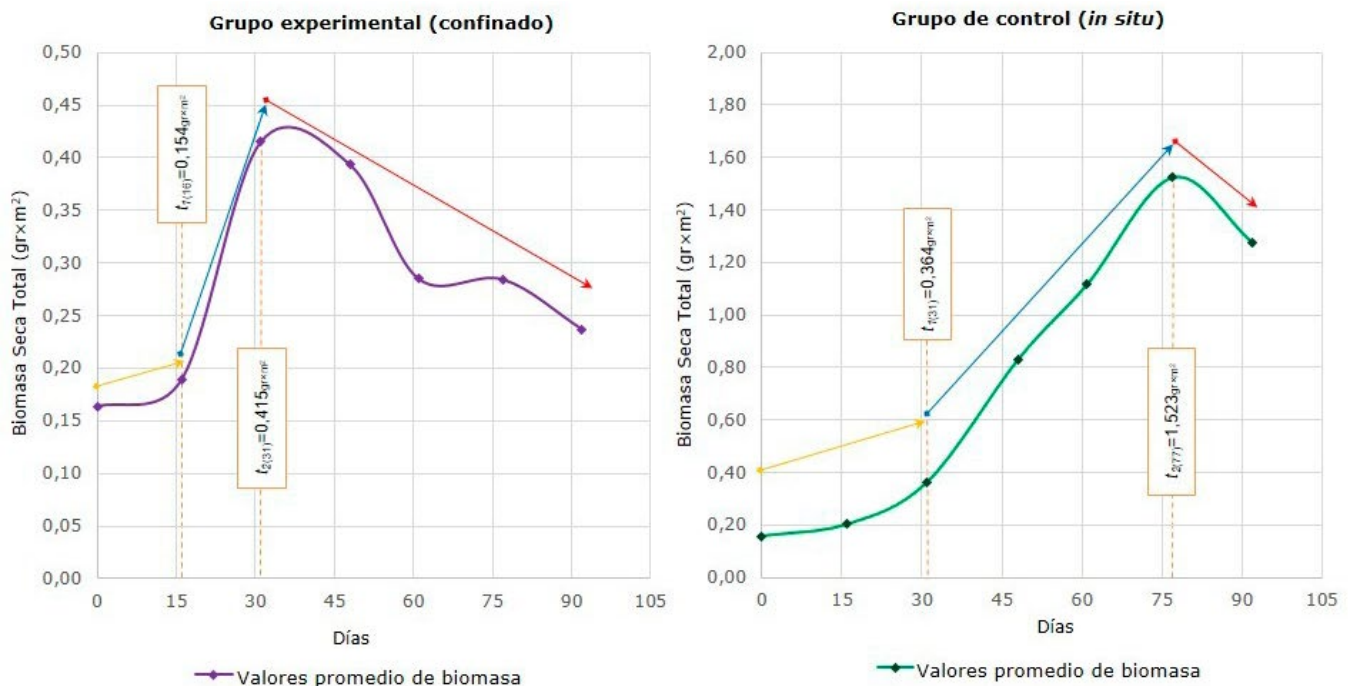


Figura 1. Representación gráfica del parámetro de Biomasa de *Eichhornia crassipes* de los grupos control y experimental, durante los siete períodos de monitoreo entre el 25 de abril al 27 de julio del 2018, señalando las fases comportamiento vinculado con la producción de masa vegetal e identificando los datos t_1 y t_2 para nutrir el modelo logístico de Verhulst.

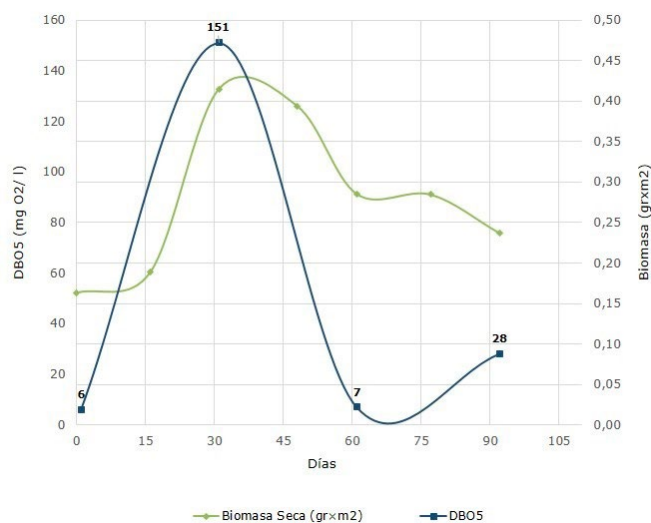


Figura 2. Comparativo entre ganancia de biomasa seca y comportamiento de oxidación biológica a partir de los resultados de análisis de laboratorio entre abril-agosto 2018, de cuatro ensayos extraídos de los reactores de desarrollo vegetal y analizado en el laboratorio CIAN Ltda.

Posteriormente, la Demanda Biológica de Oxígeno, decayó drásticamente entre los días 31 al 61, relacionado con varios factores entre estos el estrés resultante de la necrosis presentada en algunas hojas y peciolo que repercute en el detrimento y/o muerte de los tejidos, la fluctuación de las características propias del agua contenida en cada reactor y, la influencia que pudo presentar la baja relación N:P (Nitrógeno-Fósforo). Teóricamente la relación óptima de estos elementos para la especie *Eichhornia crassipes* es de 6:1 (Benítez et al., 2011), teniendo en cuenta que las plantas acuáticas necesitan en mayor cantidad Nitrógeno que Fósforo. lo cual fue evidenciado por el cambio de color de las raíces, las cuales presentaron un viraje de marrón a púrpura, indicador de este desequilibrio.

Por último, el comportamiento de la DBO₅ dado entre el tercer y cuarto muestreo (7 mg O₂/L y 28 mg O₂/L respectivamente) se incrementó, debido al crecimiento de los nuevos individuos promovido por la sedimentación evidente en los reactores y el aumento de la resistencia al flujo motivado por las hojas y raíces de los individuos confinados, conjugado con el efecto de estimulación simbiótica microbiana.

A partir de los parámetros analizados en la unidad experimental establecida en las cámaras de desarrollo vegetal (sistema confinado), se pudo establecer la relación existente entre la acumulación de materia vegetal respecto a la absorción de materia orgánica, cuyo resultado se presenta en la Tabla 1.

Esta relación demuestra que, a mayor aumento de biomasa, ya sea por ganancia en el tejido de la planta o por el aumento de la población de origen asexual, se desencadena una remoción de materia orgánica en el medio, siendo para el caso equivalente a 19,53 mg O₂L⁻¹ /g por unidad

de Buchón para el día 31, a una tasa promedio de 1,46 mg O₂L⁻¹ /g Buchón, identificándose como pico máximo de remoción y esto tiene correspondencia con el periodo en el cual se registró el mayor valor de ganancia de biomasa de los individuos evaluados, lo cual para fines de la escala de investigación es lo esperado, sin embargo puede variar si el tamaño muestral se incrementa en una investigación a mayor escala.

A partir de esta fecha y hasta el día 61, la capacidad de absorción disminuyó, pero su eficiencia no fue afectada, puesto que únicamente se reduce en un rango de 0,55 mg O₂L⁻¹/g por unidad de Buchón. Situación contraria a lo establecido entre el periodo de tiempo del día 61 al 92, donde la concentración de materia orgánica removida se redujo a 1,51 mg O₂L⁻¹/g por unidad de Buchón, asociado al deterioro morfo fisiológico observado en los individuos como mecanismo de regulación de absorción osmótica (Benítez et al., 2011). Esto conlleva a la liberación de la carga de sustancias removidas al medio limitando la tasa promedio de remoción de 0,82 mg O₂L⁻¹ /g por unidad de Buchón registrado en el día 61, a 0,05 mg O₂L⁻¹ /g por unidad de Buchón para el día 92.

Al respecto del proceso de validación por medio del modelo de crecimiento, su principio matemático se describe a partir de la ecuación general de tasa de crecimiento poblacional (Fórmula 6).

$$\frac{dn}{dt} = rN \quad (6)$$

Donde $\frac{dn}{dt}$ representa la variación de la tasa de crecimiento de la población, N el tamaño de la población y r la tasa de aumento per cápita (Tasa de Crecimiento Específico). La relación de la Fórmula 6 con el modelo logístico, se deriva del comportamiento dado por la tasa de aumento r, puesto que, si este no cambia, aunque el tamaño de la población sea muy grande, se tiene un crecimiento exponencial. Por el contrario, si r disminuye a medida que la población alcanza su límite máximo, se presenta un crecimiento logístico entendido como el crecimiento de la cantidad de especímenes que se suman a la muestra poblacional.

Al alimentar el modelo con valores vinculados al parámetro de biomasa, se pudo determinar cómo la población de estudio creció a partir de la distribución de la masa vegetal acumulada en nuevos ejemplares, resultado de la propagación vegetativa de la especie. Al validarlo, se identificó una etapa en la cual fue posible observar un comportamiento logarítmico cuando el número de individuos no superaba la disponibilidad de recursos con el que se sustenta, que para el caso sería la materia orgánica disponible en el medio. Cuando la población aumento, los recursos empezaron a agotarse, lo cual desaceleró el parámetro de crecimiento. A partir de esto, la ganancia de biomasa por parte de la población inicial se estabilizó, reflejando así la capacidad máxima de carga K, que soportaba el sistema.

Tabla 1. Valores de remoción de materia orgánica para la unidad confinada. Fuente de: Autores.

Tiempo exposición (días)	Concentración DBO (mg O ₂ /L)	Biomasa (gr × m ²)	V (mg O ₂ L ⁻¹ /g Buchón)	Q (mg O ₂ L ⁻¹ /g por unidad de Buchón)
1	6	1,50	0,00	0,00
31	151	3,19	1,46	19,53
61	7	2,88	0,82	18,98
92	28	4,88	0,05	1,51

V: Tasa promedio de remoción;
Q: Cantidad de materia orgánica removida por unidad de biomasa.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k}{1 \pm e^{C-rt}} \quad (7)$$

Esta condición se pudo representar por medio de la Fórmula 7, en la cual la cantidad $1 \pm e^{(C-rt)}$ establece la cantidad de biomasa por individuo de origen asexual que se puede agregar antes que se alcance la capacidad de carga.

El crecimiento del Buchón de Agua ocurrió a partir del día 1 y antes del día 30 para el grupo experimental y desde el día 1 pero antes del día 167 para el grupo de control, como se observa en la Fig. 3. Sin embargo, al analizar la fracción $K/(1 \pm e^{(C-rt)})$, que se interpreta como la cantidad de biomasa que puede agregarse amortiguándose gradualmente a medida que se llega al valor de K (Courchamp, Berec, y Gascoigne, 2008), indica que mientras más se reduzca el tiempo para llegar a la capacidad de carga (K), mayor es la reducción que el término $K/(1 \pm e^{(C-rt)})$ tiene sobre la tasa de crecimiento.

Por otra parte, al esquematizar la validación del modelo logístico, se identificó que el comportamiento del crecimiento de *Eichhornia crassipes*, es diferente para cada uno de los grupos, siendo posible evidenciar que el amortiguamiento en la acumulación de masa vegetal de origen asexual se alcanza a los 30 días para la unidad de experimental y a los 165 días para el grupo de control. Esto se ve reflejado en las gráficas relacionadas en la Fig. 3, ya que el primer grupo presenta una menor distribución respecto al desplazamiento de la curva sigmoidea, en comparación al segundo; lo anterior debido a que los datos obtenidos en el grupo experimental presentan el efecto Allee, el cual atribuye esta menor distribución por el aislamiento del sistema, lo que acelera las funciones morfo fisiológicas relacionadas con la acumulación de biomasa por parte de los individuos analizados. Este aspecto derivado de las condiciones de estrés que sufren los especímenes al enfrentarse a la limitada disponibilidad de nutrientes y al incremento de la competencia intraespecífica a lo largo del experimento (Courchamp et al., 2008). Por su parte en la unidad de muestreo *in situ* – grupo control, se observó competencia intra e interespecífica por espacio y oferta de luz fotosintéticamente activa. Y algunos otros recursos necesarios para el crecimiento, señalando que

el aumento de la biomasa esta siendo condicionado por múltiples factores.

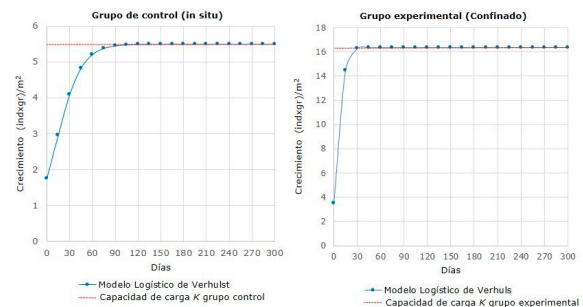


Figura 3. Representación del modelo logístico para las dos unidades de evaluación, la cual demuestra que la capacidad de carga se supera a los 30 días para la unidad experimental y a los 165 para la de control.

CONCLUSIONES

Al interpretar el crecimiento de la macrófita evaluada en la unidad experimental a partir del modelo logístico, y la absorción de materia orgánica respecto a la acumulación de biomasa, se estableció que la población de Buchón de Agua se debe extraer del sistema desde el día 30 hasta el día 61, puesto que, si se superara este periodo, la especie en lugar de absorber iniciará la liberación de la materia orgánica capturada. Hay complejidad en la determinación de cuánta materia orgánica remueve esta macrófita dentro del río, ya que la dinámica asociada con las diferentes interacciones ecológicas y humanas dificultan evaluar el comportamiento de este parámetro debido a la fluctuación en la concentración y volumen del flujo de nutrientes en el tiempo. A partir de la información recopilada de biomasa y la validación logística, es posible aseverar que la cantidad de materia orgánica removida por el grupo de control es semejante a la unidad confinada, partiendo del hecho que el comportamiento tanto de ganancia, como de crecimiento por biomasa, presentó afinidad entre las dos unidades respecto a la tendencia y distribución de los datos

recolectados. Conforme a esto, el periodo idóneo para retirar los especímenes in situ es a partir del día 165, como fecha en la cual se alcanza la máxima capacidad de carga del sistema, y hasta el día 195; ya que en este espacio de 30 días la capacidad de absorción se estabiliza, pero no decae. Lo anterior indica que la separación de los individuos más jóvenes es importante ya sea para reiniciar el ciclo de absorción de materia orgánica extrayendo la mayoría de individuos del sistema y dejando algunos jóvenes o retirar sistemáticamente los individuos más viejos para evaluar la posibilidad de mantener estable la capacidad de absorción del sistema. Es importante resaltar que, aunque se tienen estas opciones, el estudio no permite conocer cuál es la más eficiente en términos de extracción de materia orgánica, puesto que la segunda opción es motivo de investigaciones futuras. Al identificar la escala de absorción de materia orgánica, al igual que los periodos de extracción del Buchón de agua en el Río Bogotá, se puede plantear una estrategia de aprovechamiento de las poblaciones de esta macrófita aguas arriba de las bocatomas, con el fin de reducir la carga de materia orgánica que llega a la dársena de presedimentación de la PTAP Tibitoc, y así reducir los costos asociados al tratamiento del agua por la presencia de sedimentos. Para finalizar, el presente estudio se desarrolló con una muestra representativa pero reducida, por lo que precisa que en futuras investigaciones el número de muestras sea mayor, lo que permitiría aseverar si el comportamiento en la asimilación de la carga de materia orgánica evidenciado constituye efectivamente un patrón particular de la especie *Eichhornia crassipes*. Este estudio puede realizarse por medio de simulaciones computacionales que integren la inclusión de variables particulares del área objeto de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Cundinamarca extensión Facatativá, particularmente a la coordinadora de laboratorios Sandra Devia, quien desde su campo de especialización brindó acompañamiento y apoyo técnico.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan no tener conflicto de intereses

REFERENCIAS

- Agudelo, V., y Fajardo, M. (2019). *Simulación de calidad del agua en un tramo de la subcuenca río alto Bogotá en el periodo 2014-2016 a partir del modelo HEC-RAS*. Sucre: Revista Colombiana De Ciencia Animal. <http://www.scielo.org.co/pdf/recia/v11n2/2027-4297-recia-11-02-43.pdf>
- Bacca, A. K., y Morales, W. (2007). *Estudio de los efectos Hidráulicos causados por la planta acuática Eichhornia crassipes localizada en la superficie de canales abiertos*. (Tesis de pregrado).
- Baird, R., Ciesceri, L. Eaton, A. y Rice, E., (Eds). (2005). *Standard Methods 10400 D Macrófitas. Estimados de Población, 1) Diseño Muestral*. Estados Unidos de América: En American Public Health Association (APHA), Standard methods for the examination of water and wastewater. USA: American Public Health Association (APHA), la American Water Works Association (AWWA) y la Water Environment Federation (WEF).
- Benítez, R., Calero, V., Peña, E., y Martín, J. (2011). Evaluation of the kinetics of accumulation of chromium in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9, 66-73.
- Bohórquez, A. (2009). Producción de plantas macrófitas: Alternativa para la depuración en humedales artificiales. *Revistas UAN*, 1, 17-24.
- Bolaños, S., Casas, J., y Aguirre, N. (2008). Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrófitas *Pistia stratiotes* y *Egeria densa* en sistema Batch. *Revista Gestión y Ambiente*, 11(2), 39-48.
- Carreño, U. (2020). "*Buchón de agua*" (*Eichhornia crassipes*): impulsor de la fitorremediación: Editorial Universidad Libre. <http://hdl.handle.net/11371/3807>
- Courchamp, F., Berec, L., y Gascoigne, J. (2008). *Allee effects and ecosystem shifts*. Published to Oxford Scholarship.
- Gómez Rodríguez, A. M., Valderrama Valderrama, L.T., y Rivera-Rondón, C. A. (2017). Comunidades de macrófitas en ríos andinos: composición y relación con factores ambientales. *Acta Biológica Colombiana*, 22(1), 45-58. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n1.58478>
- Guio, D. y Toscano, J. D. (2018). Fitorremediación en humedal artificial con *Eichhornia crassipes* para remoción de materia orgánica en muestras de agua del Canal Albina en Bogotá. *Repositorio Institucional Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/3417>
- Gutiérrez, E. (1989). *Técnicas de evaluación del lirio acuático: Densidad, cobertura y crecimiento*. México: Editorial Instituto mexicano de tecnología del agua. Comisión nacional del agua, Control y aprovechamiento del Lirio acuático en México. http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/814/IMTA_004.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (Ed). (2017). *Las 35 plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia*. Bogotá D.C, Colombia. <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1108-35-plantas-exoticas-invasion-colombia>
- Lara, J. A., y Suárez A. J. (2019). *Desarrollo y validación de un modelo matemático para la capacidad de absorción de materia orgánica de la Macrófita Eichhornie crassipes en el sector el Espino - Río Bogotá planta de tratamiento de agua potable Tibitoc* (Tesis de pregrado). <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/1644/DESARROLLO%20Y%20VALIDACI%33%93N%20>

- DE%20UN%20MODELO%20MATEM%20TICO%20 PARA%20LA%20CAPACIDAD%20DE%20 ABSORCI%20N%20DE%20MATERIA%20 ORG%20NIC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- López, C. N., y Polo, G. A. (2016). *Análisis del sistema actual de abastecimiento de Bogotá. Agua Subterránea como fuente alternativa o de contingencia* (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- Lozada, E. (2020). *Eficiencia de cuatro biomásas de Eichhornia crassipes en la remoción de cadmio en aguas residuales del tragadero Yacuchingana- Cajamarca* (Tesis de pregrado). https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/35906/Lozada_MEY.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Morlans, M. C. (2004). Densidad, Caracteres estructurales. En M. C. Morlans, (Ed.). *Introducción A La Ecología De Poblaciones* (pp. 4). Catamarca, Argentina. Editorial Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca.
- Neira, Y. (2020). *Humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales* (Tesis de pregrado). <http://repositorio.ucss.edu.pe/handle/UCSS/996>
- Paredes, J. (2004). *Integración de la Modelación de la Calidad del Agua en un Sistema de Ayuda a la Decisión para la Gestión de Recursos Hídricos* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/1895>
- Pinzón, G. P. (2012). *Análisis de la Mitigación del Impacto Ambiental en el Lago del Parque la Florida, por Fitorremediación usando Buchón de Agua* (Tesis de posgrado). <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/7129/2/GomezSierraHelena2012.pdf>
- Porras, C. N. (2017). *Forma De Vida. Obtenido de Estudio del buchón de agua (Eichornia crassipes) para el tratamiento de aguas residuales* (Tesis de pregrado). <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/17528/1/1098682038.pdf>
- Porro, R., Chacón, M., y Rüginitz, M. (2009). Parámetros estadísticos de selección. En R. Porro, M. Chacón, y M. Rüginitz. (Eds.), *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales* (pp. 61). Lima, Perú: World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Ramírez, E. (2019). *Evaluación de los riesgos ambientales en el humedal el Resbalón ubicado en el municipio de Cota (Cundinamarca)* (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Rial, B. (2013). Plantas acuáticas: aspectos sobre su distribución geográfica, condición de maleza y usos. *Biota Colombiana*, 14(2). <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/283>
- Rodríguez, J., Gómez E., Garavito, L., y López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(1), 59-68. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000100005&lng=es&tlng=es
- Rodríguez, D. F. (2003). *Utilización de macrófitas acuáticas para la remoción de nutrientes y metales en agua destinada al consumo humano - Caso Planta de Tratamiento Tibitoc* (Tesis doctoral). https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/
- Salgado, N. y Paz, H. (2015). Protocolo para la medición de rasgos funcionales en plantas. En N., Salgado, y H. Paz. (Eds.) *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: Protocolos y aplicaciones*. (p. 50). Bogotá, D.C, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Shuttleworth, M. (2008). Diseño Experimental Verdadero [Mensaje en un blog]. <https://explorable.com/es/disenio-experimental-verdadero>