



## Estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa de macrófitas en la Bahía interior de Puno, lago Titicaca

Estimation of carbon storage in macrophyte biomass in the interior Bay of Puno, Titicaca lake

**Ingrid Maldonado-Jimenez<sup>1\*</sup>** ,  
**Martha Elizabeth Aparicio-Saavedra<sup>2</sup>** 

<sup>1</sup>Escuela de posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Av Floral 1153, CP. 21001. Puno, Perú.

<sup>2</sup>Programa Académico de Ecología - Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano - Puno. Av. Floral 1153 - ciudad universitaria CP. 21001. Puno, Perú.

\*Autor de correspondencia: [Imaldonado@unap.edu.pe](mailto:Imaldonado@unap.edu.pe)

### Artículo científico

Recibido: 09 de febrero 2021

Aceptado: 08 de junio 2021

**Como citar:** Maldonado-Jimenez I, Aparicio-Saavedra ME (2021) Estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa de macrófitas en la Bahía interior de Puno, lago Titicaca. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 8(2): e2848. DOI: 10.19136/era.a8n2.2848

**RESUMEN.** El estudio se realizó en la Bahía interior de Puno del lago Titicaca, ubicada a orillas de la ciudad de Puno, cuyas actividades como la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera afectan esta zona del lago. El objetivo fue estimar la capacidad de almacenamiento de carbono en las macrófitas, *Schoenoplectus tatora*, *Potamogeton strictus*, *Myriophyllum elatinoides* y *Elodea potamogeton*. Se realizaron muestreos en cinco zonas de la Bahía interior de Puno, con dos repeticiones en cada punto, la toma de muestra se realizó en los meses de: agosto, setiembre, octubre y noviembre. Para estimar el contenido de carbono en cada macrófita, se determinó la cantidad de materia orgánica en porcentaje por el método de calcinación, y se multiplicó con el factor de conversión de 1.724. Las variables consideradas en el estudio fueron: contenido de biomasa, carbono, CO<sub>2</sub>, pH, temperatura, profundidad y transparencia; los porcentajes de conversión de carbono hallados fueron del 55% para *S. tatora*, 48% para *E. potamogeton*, 47.5% para *M. elatinoides* y 47.4% para *P. strictus*. Los resultados muestran que: *S. tatora* es la especie que mayor cantidad de carbono ha capturado con un máximo de 1 276 g.m<sup>2</sup>, *M. elatinoides* con un valor máximo de 298.8 g.m<sup>2</sup>, *E. potamogeton* con 313.7 g.m<sup>2</sup> y *P. strictus* con 84.5 g.m<sup>2</sup>; influyendo en mayor proporción la profundidad y transparencia. Por lo que *S. tatora* fue la especie que mayor cantidad de carbono almacenó en su biomasa y por metro cuadrado en el área estudiada.

**Palabras clave:** Almacenamiento, biomasa, carbono, CO<sub>2</sub>, macrófitas.

**ABSTRACT.** The study was conducted in the Puno Inland Bay of Lake Titicaca, located on the shores of the city of Puno, whose activities such as the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere affect this area of the lake. The objective was to estimate the carbon storage capacity of macrophytes, *Schoenoplectus tatora*, *Potamogeton strictus*, *Myriophyllum elatinoides* and *Elodea potamogeton*. Sampling was carried out in five areas of the inner Bay of Puno, with two replicates at each point, sampling was done in the months of August, September, October and November. To estimate the carbon content in each macrophyte, the amount of organic matter in percentage was determined by the calcination method, and multiplied with the conversion factor of 1.724. The variables considered in the study were: biomass content, carbon, CO<sub>2</sub>, pH, temperature, depth and transparency; the carbon conversion percentages found were 55% for *S. tatora*, 48% for *E. potamogeton*, 47.5% for *M. elatinoides* and 47.4% for *P. strictus*. The results show that: *S. tatora* is the species that captured the greatest amount of carbon with a maximum of 1 276 g.m<sup>2</sup>, *M. elatinoides* with a maximum value of 298.8 g.m<sup>2</sup>, *E. potamogeton* with 313.7 g.m<sup>2</sup> and *P. strictus* with 84.5 g.m<sup>2</sup>; influencing in greater proportion the depth and transparency. Therefore, *S. tatora* was the species that stored the greatest amount of carbon in its biomass and per square meter in the area studied.

**Key words:** Biomass, carbon, CO<sub>2</sub>, macrophytes, storage.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han incrementado las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente; al respecto, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) reportó que entre los años 2019- 2020, los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera alcanzaron niveles récord de 410 ppm, que equivale a un 148% más, comparados con los niveles preindustriales (OMM 2021). Este aumento se debe principalmente a diversas actividades humanas, como el uso de combustible para el sistema de transporte vehicular, deforestación e incendios (Montero *et al.* 2005), además de grandes cantidades de dióxido de carbono, que se liberan por la degradación de los humedales, lo que contribuye al aumento de la temperatura mundial (Palomino-Contreras y Cabrera-Carranza 2007), dado que el CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero que contribuye con el calentamiento global (Díaz-Franco *et al.* 2016).

En contraparte los bosques tienen gran capacidad de almacenamiento de carbono. Al respecto, un estudio realizado en bosques naturales de Honduras, reportan un secuestro anual de CO<sub>2</sub> de 105 989.86 t (Alberto y Elvir 2008); pero estos, no son los únicos ecosistemas que proveen ese servicio. También, los humedales juegan un rol importante por su alta capacidad de almacenamiento de carbono, por medio de las macrófitas y el fitoplancton (Medrano *et al.* 2012, Lolu *et al.* 2019); así como, los manglares que son muy eficientes en este proceso a largo tiempo, como lo indica Rovai *et al.* (2021). En los humedales se reportan diversas macrófitas, por ejemplo en la Bahía de Cohana del lago Titicaca, se halló hasta 58 especies (Fontúrbel *et al.* 2006), las cuales almacenan carbono y contribuyen de forma significativa en la retención de carbono, al mismo tiempo que brinda un servicio ambiental (Palomino-Contreras y Cabrera-Carranza 2007). Aunque dependiendo de la especie de macrófitas, se sabe que algunas contribuyen en mayor porcentaje que otras, como es el caso de las especies emergentes (Maqbool y Khan 2013) teniendo éstas mejores resultados en monocultivos y en zonas controladas (Means *et al.* 2016).

Los humedales brindan diversos servicios eco-

sistémicos, como el almacenamiento de carbono (Cejudo y Herrera-Caamal 2019, Lin *et al.* 2019, Lund y Drake 2020), por lo que algunos autores, las consideran como uno de los principales sumideros de carbono del planeta ( Mitsch *et al.* 2013, Dvořáková-Březinová y Vymazal 2018). Lo que se debe principalmente a la descomposición incompleta de la biomasa vegetal en los sedimentos, la presencia de macrófitas y fitoplancton, los que contribuyen en el almacenamiento de carbono (Calva Benítez y Torres Alvarado 2011, Dvořáková Březinová y Vymazal 2018, Mitsch *et al.* 2013). Dentro de los cuales, las macrófitas emergentes son las que fijan la mayor cantidad de carbono que las sumergidas (Maqbool y Khan 2013), dado que éstas últimas están condicionadas al paso de la luz y al carbono disuelto en el agua (Liu *et al.* 2020, Madsen *et al.* 1996). Pero los estudios realizados en humedales y macrófitas fijadoras de carbono en muchos lugares son escasos, por lo que es necesario realizar estudios para entender mejor los beneficios que brindan estos ecosistemas (Lolu *et al.* 2019).

En el lago Titicaca se encuentra una gran cantidad de macrófitas, esencialmente totales y lachales, cuya presencia permite mitigar los impactos que provienen de las actividades antropogénicas (Goyzueta *et al.* 2009), como la emisión de gases por el sistema vehicular y vertimiento de aguas residuales, que afectan el desarrollo de las especies predominantes de la zona. La biomasa de macrófitas es abundante, principalmente en la zona de orilla (Dejoux y Iltis 1991), lo que contribuye con el proceso de captura de CO<sub>2</sub>; dado que, cierto porcentaje de la biomasa es carbono (PELT y TDPS 2000, PELT y ADESU 2001), aproximadamente el 50% (Dávalos *et al.* 2008); lo que permite entender, parte de los beneficios ambientales que proporcionan estos ecosistemas. Por lo anterior, el objetivo del estudio fue estimar la concentración de carbono almacenado en la biomasa de cuatro especies de macrófitas predominantes en la Bahía interior de Puno y la variación de almacenamiento de carbono entre ellas, para conocer el aporte de estas macrófitas en la mitigación de CO<sub>2</sub> en el ambiente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La zona de estudio se encuentra en el lago Titicaca, conocida como; Bahía interior de Puno. Tiene un área de 17.5 km<sup>2</sup> (Ocola-Salazar y Laqui-Vilca 2017), profundidad máxima de 7.19 m (Loza del carpio *et al.* 2016); temperatura entre 12 y 13 °C y precipitación anual de 700 a 1000 mm. Con diversidad de flora y fauna, de las cuales para el estudio se tomó en cuenta las cuatro especies de macrófitas más dominantes del área, que son, *Schoenoplectus tatora*, *Elodea potamogeton*, *Myriophyllum elatinoides* y *Potamogeton strictus*. La ciudad de Puno está asentada a orillas de la Bahía, con actividades antrópicas, como el vertimiento de aguas residuales y emisión de gases provenientes del conjunto de los automóviles que transitan por la ciudad y de la quema ilegal de totorales. La zona fue elegida de acuerdo a los impactos antrópicos que existen, los cuales influyen el almacenamiento de carbono, principalmente el vertimiento de aguas residuales provenientes de la ciudad de Puno.

### Diseño de muestreo

Se seleccionaron cinco puntos de muestreo dentro del área de la Bahía interior de Puno, de acuerdo a la influencia de actividades antrópicas presentes en la zona (Tabla 1). El muestreo se realizó durante los meses de agosto, setiembre, octubre y noviembre del 2011, se colectaron muestras por duplicado, de *Schoenoplectus tatora*, *Elodea potamogeton*, *Myriophyllum elatinoides* y *Potamogeton strictus*, de las cuales se tomaron muestras de tallos y hojas mediante muestreo directo en cuadrantes de 1 m<sup>2</sup>, para luego extraer la parte sumergida, así como la parte emergente comprendidos dentro del área del cuadrante (sin rizomas); para luego guardar las muestras en depósitos de plástico y luego trasladarlas al laboratorio para su análisis. La temperatura se registró con un termómetro digital marca thermometer herwowe, el pH con un potenciómetro marca Hanna, la transparencia del agua fue medida con un Disco Secchi, cuya medida es el promedio de la profundidad a la que el ojo humano deja de ver el

disco metálico (20 cm de diámetro) al ser introducido en el agua, y la profundidad en la que aparece de nuevo al ojo humano (Lee *et al.* 2015), las coordenadas se registraron con un GPS marca Garmin etrex 30 y la profundidad se midió con una barra de madera milimétrica, dado que las mayores áreas de esta zona están ocupadas por profundidades menores a 1 m, como máximo 4 m (Loza-Del-Carpio *et al.* 2016). Todos estos parámetros se midieron en la zona de muestra de la planta, en la columna de agua, antes de tomar las muestras de macrófitas, para no alterar las mediciones.

### Análisis en laboratorio

En el laboratorio se determinó el peso de la biomasa húmeda (Drexler *et al.* 2021), después se pusieron las muestras en una estufa de convección natural a 75 °C, hasta obtener peso constante para determinar la biomasa seca. Luego se dividió la muestra en cuatro submuestras por especie, las cuales se pulverizaron en un mortero, se tomó su peso inicial; para posteriormente llevar las submuestras a una mufla para calcinarlas a 400 °C y determinar el peso de cenizas para calcular la materia orgánica de cada especie, que se calculó como la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra dividido entre el peso de la muestra inicial. Determinada la materia orgánica en la biomasa seca, se determinó la cantidad de carbono almacenado por especie en g m<sup>2</sup>, con la siguiente fórmula

$$\%C = \%M.O. * 1.724.$$

Dónde: % C = porcentaje de carbono por especie, % M.O.= porcentaje de materia orgánica y 1.724 = constante (Palomino y Cabrera 2007).

Con la cantidad de carbono almacenado, se determina la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado en unidades de gramos (g m<sup>2</sup>) con la fórmula:

$$CO_2 = KrxC.$$

Donde: CO<sub>2</sub> = Dióxido de carbono, C = Carbono, Kr = 3.67, factor de conversión a CO<sub>2</sub>, resultante del cociente de los pesos moleculares del dióxido de carbono 44 y del carbono 12. Dado que una molécula

**Tabla 1.** Descripción de los puntos de muestreo en la Bahía interior de Puno del lago Titicaca.

Puntos de muestreo	Coordenadas geográficas		Zonas de muestreo	Descripción
	X	Y		
P1	8249802	393464	Isla Esteves	Con tránsito de lanchas motorizadas. Además, por esta zona existen hoteles turísticos que vierten sus aguas servidas directamente al lago sin tratamiento alguno, con un pH promedio de 8.08, transparencia de 0.54 m profundidad 0.87 m.
P2	8248861	394276	Isla Joroba	En esta área existe gran cantidad de totorales, está cerca de la ruta de tránsito de las embarcaciones que zarpan desde el muelle de Puno con dirección a las islas flotantes de los Uros; con un pH promedio de 8.09, transparencia 0.71 m, profundidad 1.39 m.
P3	8247028	395035	Cerca de Chimu	Esta zona se halla cerca de la laguna de oxidación de la ciudad de Puno. No es la zona con la transparencia mas alta, hay otros puntos con > transparencia. Tiene un pH promedio de 7.96, transparencia 0.58 m, profundidad 1.47 m.
P4	8247364	393083	Cercanías de la Isla espinar	Cerca de este punto está el efluente de aguas residuales de la ciudad de Puno; las macrófitas que existen por esa zona son los totorales. Con un pH promedio de 7.97, transparencia 0.42 m, profundidad 1.19 m.
P5	8249257	396947	Malecón Eco-turístico	Es una zona recreativa, en el cual se emplea cayacs. También en esta zona se realizó un tratamiento con microorganismos eficientes, cuyos resultados hasta la fecha son positivos, pues a la observación directa el agua se muestra transparente, así como la presencia de macrófitas e incluso especies de peces. Con un pH promedio de 7.78, transparencia 0.27 m, profundidad 0.27 m.

de Carbono pesa  $12 \text{ g.mol}^{-1}$  y una molécula de  $\text{CO}_2$  pesa  $44 \text{ g.mol}^{-1}$ , luego  $44/12 = 3.67$ , una tonelada de carbono fijada en un árbol equivale a fijar 3.67 toneladas de  $\text{CO}_2$ .

### Análisis estadístico

Se usaron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y el Test de Levene, para comprobar la distribución normal y la homogeneidad de varianzas, las cuales indicaron que los datos no cumplían con los criterios para aplicar una prueba paramétrica, por lo que se aplicó el análisis de Kruskal Wallis con un nivel de confianza del 95%, para luego realizar la prueba de contraste de Kruskal-Wallis (Prueba de comparación Múltiple después del Kruskal-Wallis) con un nivel de significancia de  $P < 0.05$ . También se realizó una correlación de Pearson para relacionar el carbono almacenado en la biomasa de macrófitas y variables ambientales, como profundidad y transparencia. Los análisis se realizaron en el software libre R versión 4.0.3.

## RESULTADOS

### Almacenamiento de carbono en biomasa seca de macrófitas

Para el carbono almacenado en las macrófitas *S. tatora* es la especie con mayor porcentaje de car-

bono en su biomasa seca con 55%, seguida de *E. Potamogeton* con 48%, *M. elatinoides* con 47.5%, y *P. strictus* con un 47.4% (Figura 1).

### Almacenamiento de carbono en macrófitas

En relación al carbono almacenado por  $\text{m}^2$ , los resultados indican que *S. tatora* tiene la mayor cantidad y variación, ya que su valor máximo fue de  $1276 \text{ g.m}^2$  y su valor mínimo de  $44 \text{ g.m}^2$ , seguida de *E. potamogeton* con máximo y mínimo de  $313.7$  y  $41.28 \text{ g.m}^2$ , *M. elatinoides* con valor máximo y mínimo de  $96.9$  y  $8.07 \text{ g.m}^2$ , y *P. strictus* con valor máximo y mínimo de  $84.5$  y  $7.7 \text{ g.m}^2$ , respectivamente (Figura 2). Estos resultados indican que el contenido de carbono es significativamente superior en *S. tatora* con media de  $629.4 \text{ g.m}^2$ , seguida de *E. Potamogeton* con  $109.8 \text{ g.m}^2$ , *M. elatinoides* con  $45.11 \text{ g.m}^2$ , y *P. strictus* con  $34.5 \text{ g.m}^2$ . La prueba de Kruskal Wallis; mostró diferencias significativas (Kruskal Wallis =  $1.58e^{-12}$ ,  $P < 0.05$ ); lo que indica que por lo menos una especie es diferente al resto con respecto al contenido de carbono almacenado en su biomasa seca. Para verificar las diferencias y/o similitudes, se realizó la prueba de rango múltiple de Kruskal-Wallis, la cual detectó significancia entre *S. tatora* con las otras especies ( $p < 0.05$ ), lo cual se visualiza en la Tabla 2; donde se observa que *S. tatora* es la que presenta el mayor almacenamiento de car-

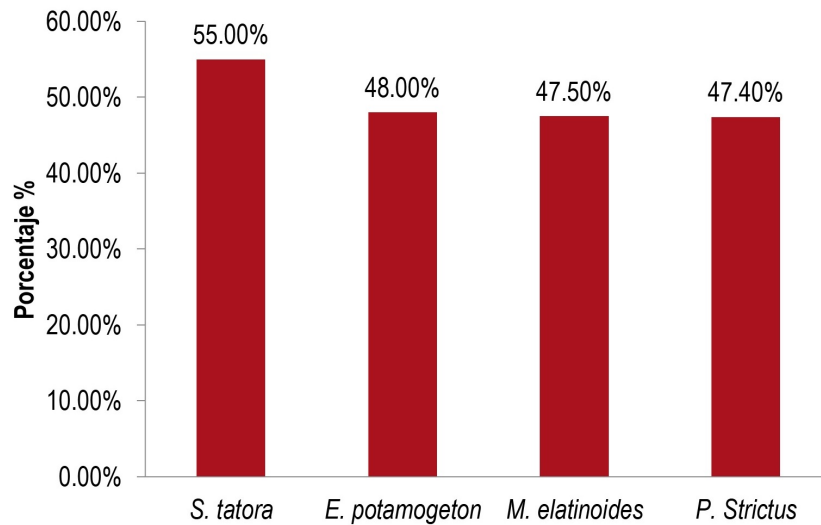


Figura 1. Porcentaje de carbono en la biomasa seca de cuatro especies de macrófitas.

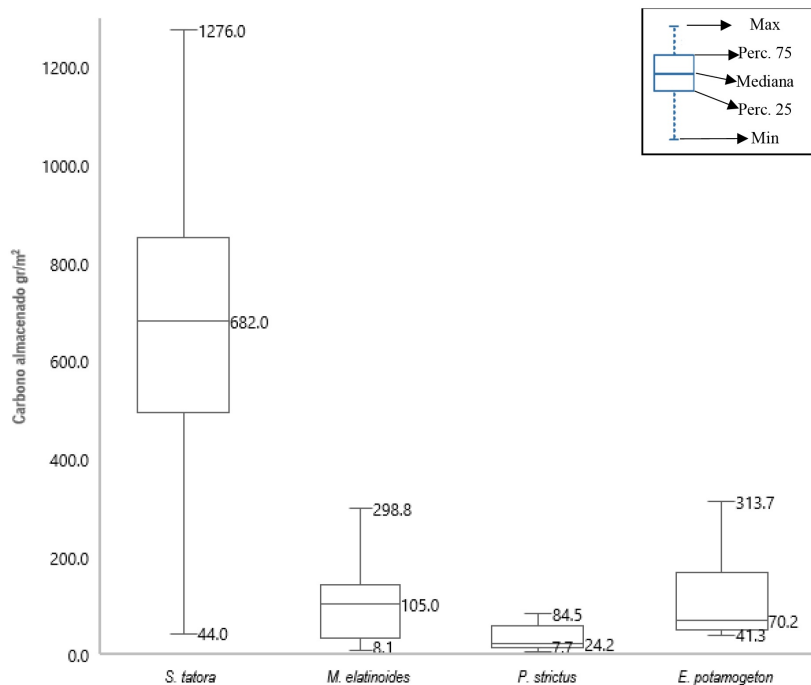


Figura 2. Comparación de almacenamiento de carbono en macrófitas predominantes en la Bahía interior de Puno del lago Titicaca.

bono; debido a su concentración en la biomasa.

Para el CO<sub>2</sub> fijado, los resultados muestran una tendencia similar a la del carbono almacenado, observándose que *S. tatora* es la especie que mayor cantidad de CO<sub>2</sub> captura del ambiente, con media

de 2 309.97 g.m<sup>2</sup>, seguida de *E. potamogeton* con 402.98 g.m<sup>2</sup>, *M. elatinoides* con 375.8 g.m<sup>2</sup> y *P. strictus* con media de 126.70 g.m<sup>2</sup>. Esta variación puede deberse a que la fijación de CO<sub>2</sub> se da mejor en plantas acuáticas de tallos emergentes que las



**Tabla 2.** Prueba de comparación múltiple Kruskal-Mc entre el carbono almacenado por macrófitas.

Comparaciones	Dif. Obs	Dif. crítica	Diferencia
<i>Elodea-Miriophyllum</i>	14.025	27.33282	False
<i>Elodea-Potamogeton</i>	17.275	27.33282	False
<i>Elodea-Schoenoplectus</i>	87.000	27.33282	True*
<i>Miriophyllum-Potamogeton</i>	3.250	27.33282	False
<i>Miriophyllum-Schoenoplectus</i>	72.975	27.33282	True*
<i>Potamogeton-Schoenoplectus</i>	69.725	27.33282	True*

Dif. obs. y Dif. crítica, representan los valores de diferencias observadas y críticas de la comparación.

sumergidas, ya que las plantas sumergidas están supeditados a factores adversos que pudieran perjudicar su normal desarrollo, como la transparencia, pH, temperatura, nutrientes, contaminación, presión atmosférica, entre otras.

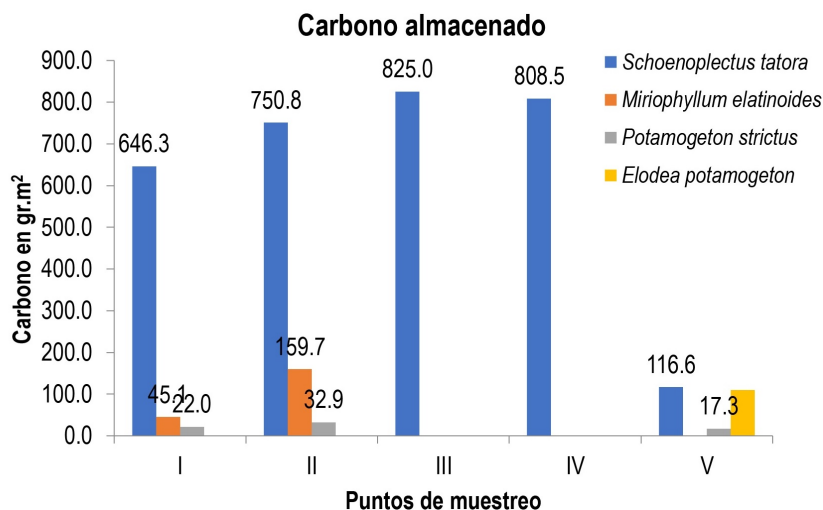
### Carbono almacenado en los cinco puntos de estudio

La especie que mayor cantidad de carbono almacenó en los cinco puntos de muestreo fue *S. tatora*, principalmente en el punto tres se tuvo una media de 825 g.m<sup>2</sup>, y la menor cantidad en el punto cinco con valor medio de 116.6 g.m<sup>2</sup> (Figura 3). Esto puede deberse a que el punto tres está cerca de la laguna de oxidación por lo que hay mayor cantidad de nutrientes necesarios para su desarrollo; además de que tienen profundidades apropiadas para el desarrollo de esta especie, a pesar de la época de estiaje la variación del nivel del agua no es significativa. Pero en el punto cinco, la variación de la profundidad sí fue notoria, lo que pudo influir en sus bajos niveles de captación de carbono.

Con respecto a *P. strictus*, se aprecia que, en el segundo punto de muestreo tuvo la mayor cantidad de carbono con media de 32.9 g.m<sup>2</sup>, mientras que en las zonas tres y cuatro no se registra esta especie; lo cual pudiera estar influenciado por el ingreso de aguas residuales a esas zonas. Mientras que, los puntos uno y dos están distantes de este foco contaminante; por lo que, al tener menor influencia, hay mayor transparencia en la columna de agua de 54 cm en el punto uno y 70 cm en el punto dos, lo cual repercute en el mayor paso de la luz; lo que favorece su desarrollo. En tanto, que en las zonas de muestro

tres y cuatro la profundidad fue mayor y la transparencia menor por la contaminación de aguas residuales. En lo que respecta a *M. elatinoides*, solo se encontró en el punto uno y dos, los cuales tienen aguas transparentes, con mayor oxigenación y están alejadas de la laguna de oxidación, lo cual explicaría su presencia, más no en los otros puntos de estudio. Mientras que *E. potamogeton*, solo se encontró en el punto cinco, lo que se puede deber a que no es una especie exigente en cuanto a nutrientes, pero sí con respecto a la transparencia y temperatura, además de que requiere aguas superficiales. Lo que puede explicar que no se encontró en los primeros cuatro puntos de muestreo, ya que la temperatura promedio fue de 13 °C, mientras que en el malecón ecoturístico el promedio de temperatura fue de 15 °C, con poca profundidad, lo que contribuyó a su desarrollo.

Los resultados de la correlación de Pearson para la cantidad de carbono almacenado y parámetros como profundidad, pH, y transparencia (Tabla 3), corroboran la explicación del porqué no se encuentra algunas especies en los puntos de estudio mencionado; como *S. tatora*, *M. elatinoides* y *P. strictus* que presentan correlación positiva con la profundidad de 79, 81 y 80%, respectivamente. Lo que indica, que a mayor profundidad mayor desarrollo de la especie. En tanto que *E. potamogeton* tiene una relación débil pero inversa, es decir, que a mayor profundidad menor almacenamiento de carbono. El pH no muestra influencia, mientras que la transparencia tiene leve relación positiva con las especies. En lo referente a *E. potamogeton* no se consideró en este análisis debido a que hubo 100% de transparencia en todas las mediciones realizadas.



**Figura 3.** Almacenamiento de carbono en macrófitas, en cinco puntos de muestreo de la Bahía interior de Puno del lago Titicaca.

**Tabla 3.** Correlación de Pearson entre la cantidad de carbono almacenado por las macrófitas y variables ambientales.

Especies	Profundidad	pH	Transparencia
<i>Schoenoplectus tatora</i>	0.79464	0.16059	0.51961
<i>p-valor</i>	9.252e-10	0.3222	0.0005902
<i>Miriophyllum elatinoides</i>	0.81481	0.04756	0.47810
<i>p-valor</i>	0.0001209	0.8611	0.06105
<i>Potamogeton strictus</i>	0.79715	0.08181	0.19400
<i>p-valor</i>	0.117e-06	0.7039	0.3637
<i>Elodea potamogeton</i>	-0.38577	0.18596	-
<i>p-valor</i>	0.3452	0.6593	-

## DISCUSIÓN

### Almacenamiento de carbono en biomasa seca de macrófitas

El porcentaje de carbono en la biomasa seca de macrófitas, no está lejos de los resultados reportados en vegetales, al respecto el Panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) así como otros estudios, reportan que el porcentaje promedio de carbono almacenado en vegetales es el 50% de la biomasa seca (IPCC 2005, Dávalos *et al.* 2008, Tobías-Baeza *et al.* 2019). Mientras que Dávalos-Sotelo *et al.* (2008), reportan que el contenido de carbono a nivel de especie puede variar del 40.27 al 46.29% e incluso puede ser mayor de 50%; en tanto que Mota *et al.* (2011) indican que el porcentaje de carbono almacenado puede oscilar entre el 45 y 50% del peso seco de la planta. Las diferencias reportadas en este estudio se pueden deber a que las

especies estudiadas tienen diferentes características anatómicas y fisiológicas, con necesidades y condiciones a las que deben adaptarse. Por lo que, el promedio porcentual de conversión de carbono es del 50%, pudiendo oscilar por debajo o por encima de este valor, como se encontró en este estudio.

### Almacenamiento de carbono en macrófitas en los cinco puntos de muestreo

En relación a las macrófitas y su capacidad de almacenamiento de carbono, *S. tatora* fue la especie que mayor cantidad de carbono almacenó en su biomasa por metro cuadrado. Lo que coincide con estudios realizados en humedales, los cuales indican que *Schoenoplectus californicus*, especie similar a la *S. tatora*, es la que mayor carbono almacena en su biomasa, a diferencias de otras macrófitas (Palomino-Contreras y Cabrera-Carranza 2007, Medrano *et al.*

2012). Por ello diversos estudios consideran a esta especie, debido a su extensa área de crecimiento en el lago Titicaca. Al respecto en el área de la Reserva Nacional del Titicaca existe gran cantidad de biomasa debido a la mayor profundidad y mínimos niveles de fluctuación de agua; con profundidades entre los 2 y 4 m, que son adecuados para el desarrollo de esta especie (PELT y TDPS 2000, Goyzueta *et al.* 2009); incluso el CIDAB (2003) menciona que esta macrófita puede crecer hasta cinco metros de profundidad. En tanto que *P. strictus*, prefiere zonas de aguas transparentes, mientras que *Potamogeton pectinatum* crece hasta 1.5 m de profundidad en zonas con sustrato arenoso o algo limosos (URS-CHE 2010). También se sabe que esta especie se desarrolla mejor en zonas oligotróficas ubicadas en aguas lénticas como las de la zona de estudio (PELT y TDPS 2000, San Martín *et al.* 2011). En tanto que *M. elatinoide*s necesita una gran cantidad de luz, y que algunas especies de este género pueden crecer hasta 10 metros de profundidad en condiciones apropiadas (URS-CHE 2010). Al respecto el PELT y TDPS (2000) mencionan que es una especie asociada a *S. tatora*, que presenta tallos frágiles, difusión limitada por el movimiento de las aguas y por la dureza del sustrato. En tanto que, *E. potamogeton* prefiere zonas someras como en las orillas de la Bahía de Cohana, el lado boliviano del lago Titicaca (Fontúrbel *et al.* 2006), así como en las orillas y canales de ingreso de los pantanos de Villa-Lima (Ramírez y Cano 2011). Por lo que, las especies *P. strictus*, *M. elati-*

*noides*, y *E. Potamogeton* son de aguas oligotróficas, transparentes, dado que desarrollan su ciclo vegetativo y comportamiento fenológico dentro del agua, por lo que es necesario el paso de la luz (Fontúrbel *et al.* 2006), y la contaminación de la columna de agua las afectará más que a las especies con tallos emergentes.

## CONCLUSIONES

La especie *S. tatora* fue la de mayor porcentaje de conversión de carbono tuvo en la biomasa seca, mientras que *P. strictus* fue la de menor porcentaje de carbono. También *S. tatora* presentó la mayor cantidad de almacenamiento de carbono y CO<sub>2</sub> por metro cuadrado. Los factores que más influyeron en la captura de carbono fueron la profundidad y turbidez. También las actividades antrópicas repercuten en la captura de carbono de las diferentes especies, debido a que la contaminación de las aguas, se desplazan a zonas de menor influencia antrópica, principalmente en el caso de las plantas sumergidas como *E. potamogeton*, *M. elatinoide*s y *P. strictus*. Se encontró capacidad de almacenamiento de carbono en las macrófitas estudiadas; por lo que, su distribución, función y capacidad de almacenamiento son prometedoras y significativamente sostenibles; por ello deberían ser mejor valorados por presentar un servicio ambiental.

## LITERATURA CITADA

- Alberto DM, Elvir JA (2008) Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales* 17: 67-78.
- Calva Benítez LG, Torres Alvarado R (2011) Carbono orgánico y características texturales de sedimentos en áreas del pasto marino *Thalassia testudinum* en ecosistemas costeros del sureste del Golfo de México. *Universidad y Ciencia* 27: 133-144.
- Cejudo E, Herrera-Caamal K G (2019) Humedales en dolina del norte de Quintana Roo, México: ecosistemas poco conocidos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6: 207-21
- CIDAB (2003) Conservación de la biodiversidad en la cuenca del lago Titicaca - Desaguadero - Poopo - Salar de Coipasa (TDPS). Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo. Perú-Bolivia: 67p.
- Dávalos-Sotelo R, Morato IM, Martínez-Pinillos-Cueto E (2008) Almacenamiento de carbono. En: Manson RH,



- Hernández-Ortiz V, Gallina S, Mehlreter K (ed.) Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología, Instituto Nacional de Ecología. México. pp: 223-233.
- Dejoux C, Iltis A (1991) El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM, HISBOL. La Paz, Bolivia. 584p.
- Díaz -Franco R, Acosta-Mireles M, Carrillo-Anzures F, Buendía-Rodríguez E, Flores-Ayala E, Etchevers-Barra JD (2016) Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques 13: 25-34.
- Drexler JZ, Khanna S, Lacy JR (2021) Carbon storage and sediment trapping by *Egeria densa* Planch., a globally invasive, freshwater macrophyte. Science of the Total Environment 755: 142602. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142602
- Dvořáková-Březinová T, Vymazal J (2018) Evaluation of macrophytes suitable for agriculture drainage treatment with respect to their carbon sequestration potential. Ecological Engineering 124: 31-37.
- Fontúrbel F, Richard E, García G (2006) Diversidad de flora fanerógama y aspectos ecobiológicos de la unidad vegetal de Aygachi-Cumana- bahía Cohana, lago Titicaca (La Paz, Bolivia). Ciencia Abierta Internacional 30: 1-19.
- Goyzueta G, Alfaro R, Aparicio M (2009) Totorales del lago Titicaca, importancia, conservación y gestión ambiental. Primera Edición. Editorial Meru diseño y publicidad. Puno, Perú. 325p.
- IPCC (2005) Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. En: Jim-Penman DK, Gytarsky M, Hiraishi, Krug T, Riitta-Pipatti F, Buendia L, Miwa K Wagner TN (Eds.) Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Ginebra - Suiza. 628p.
- Lee Z P, Shang S, Hu C, Du K, Weidemann A, Hou W, Lin J, Lin G (2015) Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. Remote Sensing of Environment 169: 139-149.
- Lin Q, Zhang K, Shen Ji, Liu E (2019) Integrating long-term dynamics of ecosystem services into restoration and management of large shallow lakes. Science of the Total Environment 671: 66-75.
- Liu J, Longjuan Ch, Shuchun Y, Xue B (2020) Variations in stable carbon isotopes in different components of aquatic macrophytes from Taihu Lake, China. Ecological Indicators 118: 106721. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106721.
- Lolu AJ, Amrik SA, Malkiat CS, Zafar AR (2019) Carbon Sequestration Potential of Macrophytes and Seasonal Carbon Input Assessment into the Hokersar Wetland, Kashmir. Wetlands 39: 453-472.
- Loza del carpio A, Gamarra C, Condori N (2016) Caracterización morfobatimétrica y estimación de sedimentos de la Bahía interior de Puno, lago Titicaca, mediante tecnología SIG. Revista de Investigaciones Altoandinas 18: 237-248.
- Lund E, Drake D (2020) Species-specific wet-dry mass calibrations for common submersed macrophytes in the Upper Mississippi River. Aquatic botany 169: 104743. DOI: 10.1016/j.aquabot.2020.103344.
- Madsen TV, Maberly SC, Bowes G (1996) Photosynthetic acclimation of submersed angiosperms to CO<sub>2</sub> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Aquatic Botany 53: 15-30.
- Maqbool C, Khan AB (2013) Biomass and carbon content of emergent macrophytes in Lake Manasbal, Kashmir: Implications for carbon and sequestration. International Journal of Scientific and Research Publication 3: 1-7.

- Means MM, Changwoo A, Korol AR, Williams LD (2016) Carbon storage potential by four macrophytes as affected by planting diversity in a created wetland. *Journal of Environmental Management* 165: 133-139.
- Medrano R, Chupan L, Vila M (2012) Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha. *Apuntes de Ciencia y Sociedad* 2: 110-117.
- Mitsch WJ, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, y Brix H (2013) Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28: 583-597.
- Montero G, Ruiz-Peinado R, Muñoz M (2005) Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid, España. 275p.
- Mota C, Alcaraz-López MI, Martínez-Ballesta MC, Carvajal M (2011) Investigación sobre la absorción de CO<sub>2</sub> por los cultivos más representativos de la región de Murcia. *Horticultura Global* 294: 58-63.
- Ocola-Salazar JJ, Laqui-Vilca WF (2017) Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca: un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú. 187p.
- OMM. (2021) Los indicadores empeoraron y los impactos del cambio climático se agravaron en 2020. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/los-indicadores-empeoraron-y-los-impactos-del-cambio-climatico-se>. Fecha de consulta: 10 de mayo del 2021.
- Palomino-Contreras D, Cabrera-Carranza C (2007) Estimación del servicio ambiental de captura del CO<sub>2</sub> en la flora de los humedales de Puerto Viejo. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica* 10: 49-59.
- PELT, ADESU (2001) Programa de capacitación sobre el manejo de la totora - Técnicas de Reimplante. Proyecto especial binacional del lago Titicaca. ALT. Puno, Perú. 51p.
- PELT, TDPS (2000) Proyecto conservación de la biodiversidad en el Sistema TDPS evaluación de la totora en el Perú. PELT, ALT, PNUD. Puno, Perú. 78p.
- Ramirez DW, Cano A (2011) Estado de la diversidad de la flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima - Perú). *Revista Peruana de Biología* 17: 111-114.
- Rovai AS, Coelho-JC, de Almeida R, Cunha-Lignonc M, Menghinic RP, Twilleya RR, Cintrón-Molero G, Schaeffer-Novelli Y (2021) Ecosystem-level carbon stocks and sequestration rates in mangroves in the Cananéia-Iguape lagoon estuarine system, southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 479: 118553. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118553
- San Martín C, Pérez Y, Montenegro D, Álvarez M (2011) Diversidad, hábito y hábitat de Macrófitos acuáticos en la Patagonia occidental (Región de Aisén, Chile). *Anales del Instituto de la Patagonia* 39: 23-41.
- Tobías-Baeza A, Salvador-Morales P, Sánchez-Hernández R, Ruiz-Acosta SC, Arrieta-Rivera A, Andrade-Prado H (2019) Composición florística y carbono en la vegetación arbórea de un área periurbana en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6: 369-376.
- URS- CHE (2010) Informe final Asistencia técnica para el control de macrófitos: Mejora de la gestión de los embalses del Bajo Ebro. URS-CHE. Ministerio del Medio ambiente y medio rural y marino. Barcelona, España. 151p.