

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**USO DE *ELODEA CANADENSIS* PARA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES**

POR

CATALINA ANAIS PINO ARAVENA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMIA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2026**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**USO DE *ELODEA CANADENSIS* PARA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES**

POR

CATALINA ANAIS PINO ARAVENA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CONCEPCIÓN – CHILE

2026

Aprobada por:

Profesora asociada, Inés Figueroa C.
Ing. Agrónomo, Mg, Dr.

Guía

Profesor asistente, María Urbina P.
Licenciada en Biología

Asesora

Profesor asistente, Windfred Espejo C.
Médico veterinario, Dr. Cs.

Asesor

Profesor asociado, Manuel Faúndez S.
Ing. Agrónomo, Mg.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary	1
Introducción	2
Desarrollo y discusión.....	4
Conclusiones	17
Referencias	17

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Parte terminal de rama estéril de <i>Elodea canadensis</i>	4
Figura 2 Distribución en ocurrencias entre canales, ríos y lagos de <i>Elodea canadensis</i>	5
Figura 3 Rangos de distribución de las plantas acuáticas invasoras presentes en Chile	7
Tabla 1 Familia, origen geográfico, de plantas acuáticas invasoras presentes en Chile.....	8
Tabla 2 Tipo de reproducción, tipo de polinización, tipo de dispersión, primer año de registro y valores WRA-Ch de plantas acuáticas invasoras presentes en Chile	8
Tabla 3 Resumen de diferentes técnicas de fitorremediación.....	9

USO DE *ELODEA CANADENSIS* PARA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

USE OF *ELODEA CANADENSIS* FOR PHYTOREMEDIATION OF WASTEWATER.

Palabras índices adicionales: *Elodea canadensis* Michx., macrófita, remediación, humedales.

RESUMEN

Elodea canadensis es una macrófita sumergida nativa de América del norte, que se ha presentado en Chile en las últimas 5 décadas. Presenta órganos adaptados, con características estructurales que resultan de ayuda; como proporcionadora de refugio y alimento para insectos y organismos acuáticos. Este último ha tenido mayor reconocimiento, debido al alto potencial de distribución y capacidad acumuladora de contaminantes en ecosistemas acuáticos, como lo son los humedales. Reconociendo la escasez de agua que hay en el presente y la gran falta que hará para las siguientes generaciones, se han planteado diversas tecnologías circulares como la fitorremediación, método que demuestra la gran capacidad de *Elodea canadensis* para acumular metales y por ende la depuración de las aguas residuales para su próximo uso. Esta monografía es una revisión bibliográfica que se divide en 5 capítulos que consideran, características de *Elodea canadensis*, características de la fitorremediación, descripción y origen de aguas residuales y concluyendo como *Elodea* forma parte de alternativas para fitorremediación y los alcances a futuro que tienen ambas.

SUMMARY

Elodea canadensis is a submerged macrophyte native to North America, which has been present in Chile over the past five decades. It exhibits adapted organs with structural characteristics that are helpful; as a provider of shelter and food for insects and aquatic organisms, as a source of food and forage, and as a biomonitor. The latter has been more widely recognized due to its high distribution potential and,

Chile is positioned in the accumulation capacity for contaminants in aquatic ecosystems such as wetlands. Recognizing the current water scarcity and the significant need for future generations, various circular technologies have been proposed, such as phytoremediation, a method that demonstrates *Elodea canadensis*'s great capacity to accumulate metals and, consequently, the purification of wastewater for its next use. This monograph is a bibliographic review divided into 5 chapters that consider the characteristics of *Elodea canadensis*, the characteristics of phytoremediation, the description and origin of wastewater, and concludes with how Elodea is part of phytoremediation alternatives and the future scope of both.

INTRODUCCIÓN

La tierra y el agua son recursos básicos para los sistemas de producción de todo alimento, lo cual, frente a la escasez de agua, está causando problemas de seguridad alimentaria (Hussain *et al.*, 2019). Dicho problema, relacionado al uso de plaguicidas que, si bien han mejorado la calidad de alimentos, deposita una acumulación de residuos en aguas dulces teniendo efectos negativos en la salud humana y en ecosistemas acuáticos (Helbling, 2015).

Es con esto y que reconociendo que el medio ambiente está sometido a una alta presión debido a la creciente urbanización e industrialización, se plantean consigo nuevos desafíos y el desarrollo de tecnología; en donde con la alta demanda y ante la presente y futura escasez del recurso agua, el desarrollo sostenible ha requerido de promoción a la gestión ambiental y su desarrollo, estando en una constante búsqueda de tecnologías circulares para tratar ecosistemas contaminados por las crecientes actividades antropogénicas (Juwarkar *et al.*, 2010).

Entre estas tecnologías circulares, los métodos biológicos para descontaminar dichas zonas significan una gran importancia; centrándose en la fitorremediación del medio mediante uso de plantas principalmente (Dubchak y Bondar 2019); método que demuestra la capacidad de las plantas para poder acumular metales lo que depende de diversos factores como la temporada de crecimiento, condiciones ambientales, tipo y grupo ecológico al que pertenece la planta (Petrov *et al.*, 2023).

Existen colonias de alta expansión de plantas acuáticas en humedales que son utilizadas para la absorción de contaminantes solubles de aguas residuales (Haripriyan *et al.*, 2022). *Elodea canadensis* es una planta acuática sumergida, originaria de América del norte donde se ha extendido rápidamente por todo el mundo. Esta especie es muy invasiva y se considera maleza debido a su gran capacidad de crecer y multiplicarse rápidamente en diversos hábitats y condiciones, siendo también una planta de gran producción de oxígeno (Mosoarca *et al.*, 2018).

Morfológica y estructuralmente las hojas y tallos de *Elodea canadensis* tienen características de importancia como la estructura y distribución de los cloroplastos en los diferentes tejidos, las lagunas de gas de la región cortical de tallos, el material hidrofóbico que se sitúan en las paredes celulares y la organización de las células inferiores de las hojas similar a las células de transferencia. En donde se reconoce que las hojas de *Elodea canadensis* son órganos verdaderamente sumergidos, que están bien adaptados a la vida submarina; dentro de sus características ultraestructurales corresponden a una mejora en intercambio de agua-célula y que se pueden utilizar con una alta eficiencia el CO₂ y el HCO₃ como fuentes de Carbono inorgánico. Por el contrario, el tallo se comporta como un órgano terrestre, el cual cuya capacidad fotosintética depende de la disponibilidad de CO₂ atrapado en los espacios intercelulares de sus tejidos (Rascio *et al.*, 1994). *Elodea canadensis*, es una planta efectiva en biofiltración donde acumula en su biomasa, de rápido crecimiento, selenio y metales pesados (Miranda *et al.*, 2014), e igualmente macro concentra zinc, plomo y cobre (Akmukhanova *et al.*, 2018).

Frente a la prevalencia y liberación de contaminantes orgánicos en medios acuosos, se observa una gran amenaza para lograr un desarrollo sostenible, con lo que, frente a ello, el tratamiento de aguas residuales ha alcanzado un gran alcance en presente y futuro (Haripriyan *et al.*, 2022). La producción de cultivo en tierras degradadas utilizando consigo recursos hídricos no convencionales, como lo es las aguas residuales, pueden a futuro ayudar a que se logre una seguridad alimentaria necesaria para futuras generaciones (Hussain *et al.*, 2019). Con esto, la fitorremediación con *Elodea canadensis*, siendo este un cultivo fácil de reproducir

con un cierto valor estético es una estrategia sostenible para el tratamiento de aguas residuales (Sankaranarayanan *et al.*, 2023).

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Capítulo 1. Origen y descripción de *Elodea canadensis*

Características de *Elodea canadensis*. *Elodea canadensis*, también conocida por especímenes de nombres actualmente aceptados y sinónimos como, *Anacharis alsinastrum* Planch., *A. canadensis* (Michx.) Planch., *Elodea canadensis* Michx., *Philotria canadensis* (Michx.) Britton (Buldrini *et al.*, 2023); es una macrófita sumergida (Fritioff y Greger, 2007) y enraizada, miembro de la familia Hydrocharitaceae, nativa de América del norte (Zehnsdorf *et al.*, 2015), es una planta perenne que posee sus hojas sumergidas, verticiladas y sésiles y sus flores flotantes al abrirse se desprenden dispersando su polen sobre la superficie del agua (Bowmer *et al.*, 1995). Esta especie de agua dulce absorbe elementos minerales directamente del medio acuático a través de sus amplias superficies foliares (Eugelink, 1998), se caracteriza por ser macro concentradoras de zinc, plomo y cobre y micro concentradoras de cadmio (Akmukhanova *et al.*, 2018).

Figura 1. Parte terminal de rama estéril de *Elodea canadensis*



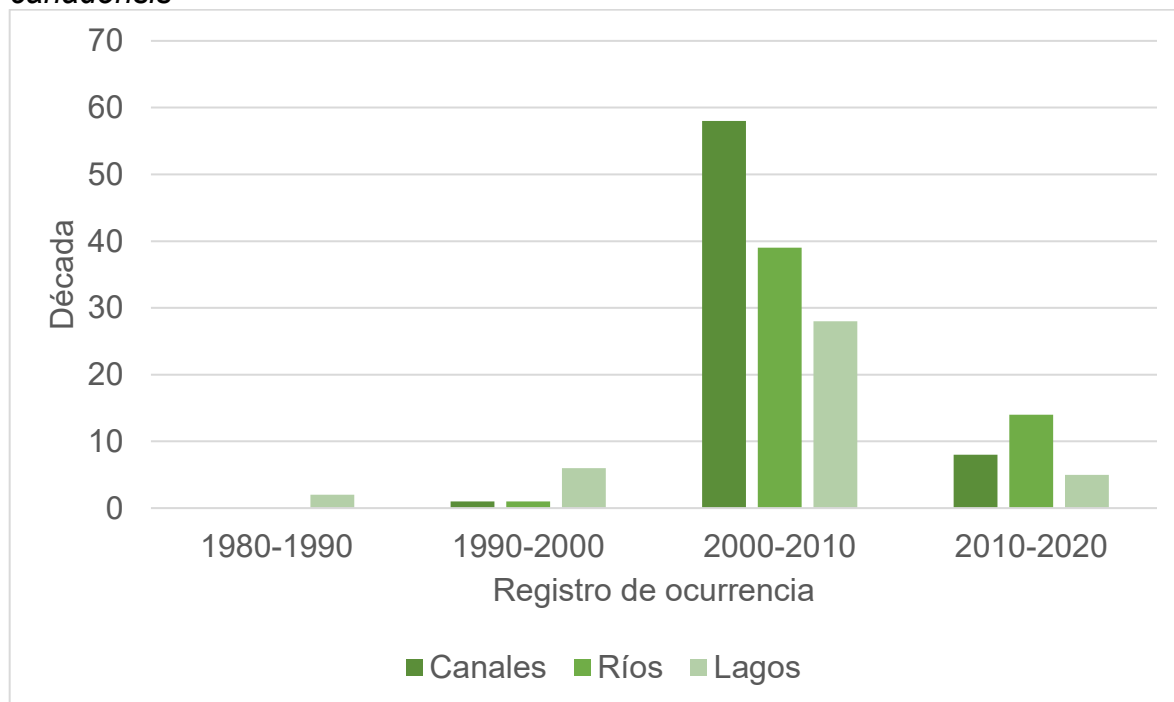
Fuente: Buldrini *et al.*, (2023)

Las hojas de *Elodea canadensis* son órganos verdaderamente sumergidos bien adaptados, las cuales tienen características ultraestructurales que mejoran los intercambios agua-células y que pueden utilizar con gran eficacia tanto el CO₂

ambiental como el HCO_3 como fuentes de C inorgánico. Opuesto a ello, el tallo se comporta como un órgano terrestre, de la cual su capacidad fotosintética depende de la disponibilidad de CO_2 atrapado en los espacios intercelulares de sus tejidos. (Rascio *et al.*, 1994).

Si bien, *Elodea canadensis* es una macrófita altamente adaptada, ha presentado preferencias con respecto al medio acuoso en el que se implemente, observando así, preferencias en, profundidades promedio de agua de más de 100 cm, cursos de agua con moderada turbulencia y con crecimiento en arcilla y lodo al 36%, piedras al 17% y arena con pequeñas piedras al 37% (Bučar *et al.*, 2024).

Figura 2. Distribución en ocurrencias entre canales, ríos y lagos de *Elodea canadensis*



Fuente: Buldrini *et al.*, (2023)

Elodea es capaz de colonizar fácilmente áreas nuevas mediante fragmentos vegetales que poseen una gran capacidad de supervivencia y propagación periférica; ésta macrófita en primavera, la mayoría de sus fragmentos vegetales desarrollan propágulos, mientras que en otoño y verano la mayoría se anclan para

lograr aumentar la supervivencia durante la época de invierno (Barrat-Segretain y Bornette 2000).

Siendo conocida como la especie de plantas acuáticas exóticas más común en el mundo (Hussner, 2012), estudios muestran que *Elodea canadensis* prefiere aguas moderadamente mineralizadas ($545 \pm 329 \mu\text{S cm}^{-1}$), ricas en magnesio y calcio ($174 \pm 63 \text{ mg CaCO}_3 \text{ l}^{-1}$, $84,1 \pm 31,4 \text{ mg Ca}^{2+} \text{ l}^{-1}$ y $11,1 \pm 6,4 \text{ mg Mg}^{2+} \text{ l}^{-1}$), con moderada concentración de cloruros y sulfatos ($38,9 \pm 59,1 \text{ mg Cl}^{-} \text{ l}^{-1}$ y $62,3 \pm 50,9 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ l}^{-1}$); por otro lado, en términos de nutrientes prefiere aguas moderadamente eutróficas y mesotróficas. Igualmente, *E. canadensis* tiene requerimientos de luz altos, por lo que su crecimiento se observa en secciones de ríos poco profundos sin sombra (Cegłowska *et al.*, 2017).

Usos de *Elodea canadensis*. *Elodea canadensis* es una macrófita, de enraizamiento perenne nativa de aguas dulces estancadas y corrientes proveniente de América del norte (Buldrini *et al.*, 2023) vista frecuentemente en aguas claras, alcalinas y ricas en nutrientes; se caracteriza por ser beneficiosa en proporcionar alimento y refugio para insectos y organismos acuáticos pequeños.

Elodea canadensis ha sido propuesta como un biomonitor potencial debido a que posee una amplia distribución y capacidad para acumular contaminantes en ecosistemas acuáticos (Mal *et al.*, 2002); por lo que, con su alta tasa de crecimiento, distribución y reproducción, además de alta tolerancia a condiciones ambientales, posee posibilidades de uso adicional a la biomasa cosechada de esta (Zehnsdorf *et al.*, 2015).

Elodea canadensis tiene aspectos de gran interés, dentro de ellos es el uso como parte de humedales y estanques, además de formar parte de elementos de paisajismo (Cook *et al.*, 1974); siendo *Elodea canadensis* una macrófita de fácil cultivo, tiene además un valor estético (Sankaranarayanan *et al.*, 2023).

Control de *Elodea canadensis*. Al ser considerada una maleza en el hemisferio norte, se han trabajado tipos de controles, como lo es el control mecánico mediante embarcaciones equipadas con cortadores, siendo necesaria una cosecha adecuada de esta macrófita, ya que cada fragmento de yema puede convertirse en una nueva planta; por otro lado, el control biológico se ha estado investigando mediante peces

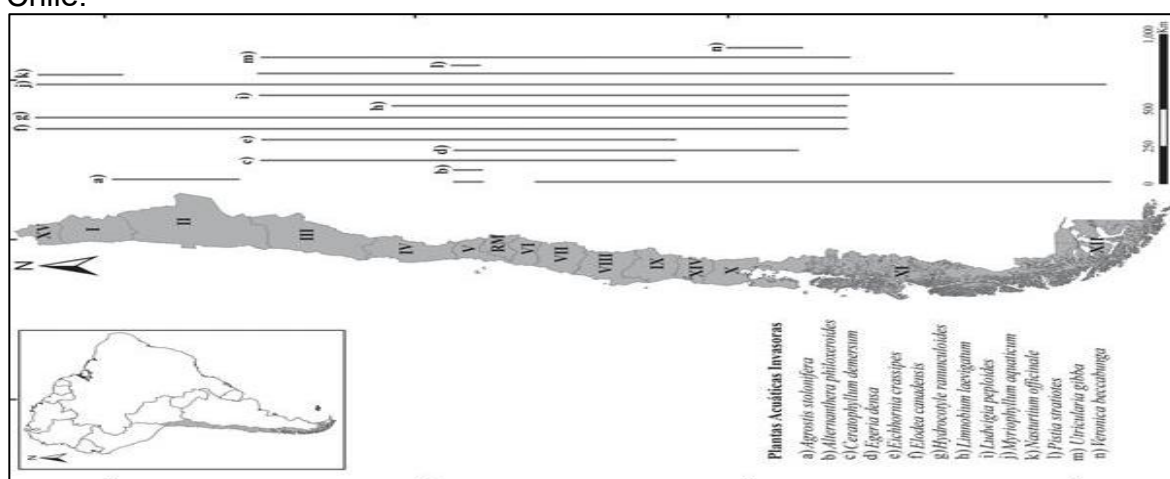
herbívoros no productivos (Spicer y Catling, 1988). Al considerar un control químico, las medidas deben aplicarse al inicio y término del verano, que es cuando las poblaciones están acercándose al periodo de propagación de brotes y ocurre la fragmentación e inicio de propágulos hibernantes (Bowmer *et al.*, 1984).

A pesar del uso exitoso en Europa de Acroleína (utilizada para eliminar malezas, algas en canales de irrigación y suministros de aguas residuales (La acroleína, e. A. "1.2)) para control de *Elodea canadensis*, la mencionada ya no se considera una amenaza para el funcionamiento de sistemas de suministro y/o de tratamiento de aguas residuales (Spicer y Catling, 1988).

Presencia de *Elodea canadensis* en Chile. Elodea, perteneciente a la familia Hydrocharitaceae, a pesar de mostrarla mundialmente con preferencia a ambientes tropicales (Crow, 1993), es la familia con una mayor representación de especies en estudios realizados en el país.

Elodea se encuentra presente en el país y ha sido reportada en Chile en el año 1950 y aunque se sabe de la existencia de esta en el territorio, se desconoce la escala a la que ha llegado actualmente; siendo necesario un estudio en terreno.

Figura 3. Rangos de distribución de las plantas acuáticas invasoras presentes en Chile.



Fuente: Urrutia *et al.*, (2017).

Con lo anterior, la información relacionada a algunas especies de plantas acuáticas es aún escasa y existen vacíos con respecto a los impactos a mayor escala al

ambiente y su amenaza; pero aun con esto, se conoce la presencia en colecciones y catálogos locales.

Tabla 1. Familia, origen geográfico, tipo de reproducción, tipo de polinización, tipo de dispersión, primer año de registro y valores WRA-Ch de plantas acuáticas invasoras presentes en Chile.

Especie	Familia	Origen geográfico	Tipo de reproducción
<i>Egeria densa</i> Planch.	Hydrocharitaceae	Sudamérica	Vegetativo
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	Hydrocharitaceae	Norteamérica	Vegetativo
<i>Limnobium laevigatum</i> (Humb. Y Bo pl. Ex Willd). Heine	Hydrocharitaceae	Sudamérica	Semilla/ Vegetativo

Fuente: Urrutia *et al.*, (2017).

Tabla 2. Tipo de polinización, tipo de dispersión, primer año de registro y valores WRA-Ch de plantas acuáticas invasoras presentes en Chile.

Especie	Tipo de polinización	Tipo de dispersión	Primer año de reporte	WRA-CH
<i>Egeria densa</i> Planch.	Insecto	Hidrocoria	1966	20
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	Agua	Hidrocoria	1950	22
<i>Limnobium laevigatum</i> (Humb. Y Bo pl. Ex Willd). Heine	Viento	Hidrocoria/Anemocoria	1945	12

Fuente: Urrutia *et al.*, (2017).

Capítulo 2. Descripción del proceso de Fitorremediación

Fitorremediación. La fitorremediación, es un enfoque de proceso de remediación que se basa en el uso de plantas que aprovechan su capacidad para concentrar elementos y compuestos del medio, además de metabolizar diversas moléculas

dentro de sus tejidos. Este proceso se refiere a la capacidad natural que tienen ciertas plantas conocidas como hiperacumuladoras de degradar o neutralizar contaminantes en entorno y de bioacumularse. Dichas plantas son capaces de estimular la biodegradación de ciertos contaminantes que se encuentran en el suelo en contacto con sus raíces. (Dubchak y Bondar 2019). Este proceso, en donde las plantas acuáticas mejoran la calidad del agua mediante procesos como la adsorción y acumulación de nutrientes excesivos y metales pesados en su biomasa (Mosoarca *et al.*, 2018), es una tecnología que aprovecha la capacidad que poseen las plantas para concentrar compuestos y elementos del medio y metabolizar moléculas en sus tejidos (Salt *et al.*, 1998). Se estima que las mejores plantas para este proceso son aquellas plantas que poseen un sistema radicular muy desarrollado que es capaz de realizar rizofiltración o aquellas que con un área bien desarrollada de biomasa sea capaz de trabajar en la fitoextracción (Dubchak y Bondar, 2019). Dicho proceso presenta diversas técnicas como fitoextracción, fitofiltración, fitoestabilización, fitovolatilización, rizodegradación, entre otras (Dubchak y Bondar, 2019) que se describen en la Tabla 1.

Tabla 3. Resumen de diferentes técnicas de fitorremediación

Técnica	Descripción	Referencia
Fitoextracción	Acumulación de contaminantes en brotes de plantas	Corzo <i>et al.</i> , (2020).
Fitofiltración	Captación de contaminantes en aguas residuales en plantas	Pratas <i>et al.</i> , (2014).
Fitoestabilización	Barrera de disponibilidad y movilización de contaminantes en el suelo por raíces de plantas	Mendez y Maier (2008).
Fitovolatilización	Transformación de contaminantes en forma volátil y liberación a la atmósfera	Sharma <i>et al.</i> , (2024).

Técnica	Descripción	Referencia
Fitodegradación	Degradación de orgánicos por enzimas vegetales en tejidos vegetales	Kim y Tanaka, (2009).
Rizodegradación	Deterioro de orgánicos en rizosfera por microorganismos rizosféricos	Lu <i>et al.</i> , (2011).
Fito desalinización	Eliminación de demasiada de sales en suelos salinos con uso de halófitas	Kalanaki <i>et al.</i> , (2020).

Fitorremediación como alternativa. “La fitorremediación se refiere básicamente al uso de plantas y microbios del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en el medio ambiente” (Greipsson, 2011). Dicha tecnología trata del uso de plantas verdes las cuales tiene una gran capacidad de absorber contaminantes y lograr desintoxicación del medio ambiente; este proceso, puede utilizarse para la eliminación de metales pesados, contaminantes orgánicos como lo son pesticidas, bifenilos policlorados e hidrocarburos aromáticos polinucleares (Ali *et al.*, 2013).

Surgiendo como una tecnología no invasiva, rentable y aceptable en la que se puede abordar la eliminación de contaminantes en el ambiente (Arthur *et al.*, 2005), se percibe como eficiente, novedosa y ecológica (Ali *et al.*, 2013). El uso de esta nueva tecnología puede verse limitado por el rango pequeño de hábitat para utilización o el tamaño de las plantas que pueden presentar potencial de remediación, sumado a las capacidades no suficientes de las plantas nativas frente a la desintoxicación, tolerancia y acumulación de ciertos contaminantes (Arthur *et al.*, 2005); aun con esto, se ha observado cierto interés por el uso de plantas para mitigar la contaminación ambiental y sobre los humedales, el cual cobró mayor relevancia en los años 1870-1970, se diferencia del uso del presente en donde la mayoría de los humedales utilizados actualmente para mejorar la calidad del agua, son artificiales y se han construido en todo el mundo; siendo estos no objeto para estudios científicos, no se tiene un número de publicaciones científicas que refleje

la cantidad de dichos humedales utilizados con fin de remediación ambiental (Otte, 2023).

Capítulo 3. Origen y descripción de aguas residuales

Aguas residuales. Las aguas residuales son aquellas aguas que son liberadas tras su uso por la humanidad; las cuales se vierten directamente en diversos cuerpos de agua sin tratamiento previo ni adecuado, causando una contaminación grave en diversos entornos (Benit y Roslin, 2015); las que presentan una amenaza ambiental para el desarrollo sostenible ya que contiene porcentaje de contaminantes orgánicos (Jain *et al.*, 2022) metales pesados, materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos, entre otros; esto dependiendo del origen (Abd-Elhamid *et al.*, 2021).

Ante esta mayor necesidad de un futuro acceso a este recurso para diversos medios, han surgido diversas prácticas a lo largo de la historia como las aguas residuales, efluentes y escorrentías provenientes de hogares, establecimientos e instituciones, también referentes a la agricultura (Hussain *et al.*, 2019); por esto que con la escasez que se presenta y el aumento que tendrá en el futuro el recurso agua, la reutilización de estas aguas genera mayor atención como estrategia para ayudar la transición hacia una economía circular (Abd-Elhamid, *et al.*, 2021).

Dentro de los metales que se encuentran presentes en aguas residuales de diversas áreas está el Cromo (Sankaranarayanan *et al.*, 2023) y Cobalto (Lingamdinne *et al.*, 2016); por lo que es posible clasificarlos según su naturaleza en lo que se encuentran y sus componentes como; contaminantes orgánicos que se presentan generalmente como pesticidas e incluyen insecticidas, herbicidas, fungicidas, hidrocarburos, entre otros (Lokhande *et al.*, 2011), contaminantes inorgánicos en los que se encuentran metales pesados, cancerígenos y altamente tóxicos (Gaikwad y Kamble, 2014) y por último, los contaminantes biológicos incluyen variados tipos de microbios como lo son algas, hongos, bacterias, virus, entre otros (Lokhande *et al.*, 2011).

Orígenes de aguas residuales. Las aguas residuales son el resultado de la descarga de metales pesados tóxicos, solutos orgánicos e inorgánicos, fertilizantes y contaminantes microbianos. Dentro de los principales sectores que son

generantes de aguas residuales están, las industrias, los laboratorios clínicos, hospitales, corporaciones municipales, desechos domésticos (Soni *et al.*, 2020), agrícolas y lodos líquidos de depuradora (Kesari *et al.*, 2021).

Por lo que, debido a las diversas actividades antropogénicas que se han situado en la actualidad, las aguas residuales se pueden clasificar principalmente en aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas (Manasa y Mehta, 2020).

Las aguas residuales domésticas son aquellas que provienen de las actividades cotidianas de las personas, incluyendo aguas residuales de la ducha, cocina, inodoro, lavabo y lavandería; las que por su parte se pueden segmentar en aguas amarillas, aguas negras y aguas grises. Por otro lado, las aguas residuales industriales provenientes de las industrias manufactureras liberan grandes cantidades de contaminantes que varían según la industria; estas se presentan en industria de bebida, cervecería, productos lácteos, almidón, acero y hierro, textil, farmacéutica, entre otras. Finalmente se encuentra la industria agrícola, en donde el agua escurrida desde los campos agrícolas está altamente contaminada con productos químicos y residuos orgánicos de pesticidas, fertilizantes, desechos de animales y restos de cultivo (Manasa y Mehta, 2020).

Capítulo 4. *Elodea canadensis* como alternativa para fitorremediación

Elodea canadensis tiene un crecimiento y producción de biomasa rápido, así también como su capacidad de bioacumulación de contaminantes del agua, lo que la ha hecho formar parte de los modelos de sistemas experimentales para tratamientos de la calidad del agua y para dichas evaluaciones (Gomes *et al.*, 2019), siendo considerada efectiva en el área de biofiltración de productos químicos, el cual ofrece solución ecológica y rentable frente a problemas de contaminación de agua y hacia la producción de energías renovables. (Miranda *et al.*, 2014).

Observando la representación de amenaza cancerígena del Cromo, metal pesado tóxico, el cual se puede encontrar presente en aguas residuales, su reducción se ha evaluado mediante fitorremediación con *Elodea canadensis*; en donde, estudios han obtenido factores de bioacumulación de 3,89 y factor de translocación de 2,8, factores que indican la capacidad de esta macrófitas para actuar como fitoacumulación. Es así como se han obtenido valores de reducción

en contenido de cromo de un 65% y una baja de sólidos totales disueltos de hasta un 48%; obteniéndose así un agua tratada libre de contaminantes adecuada para su reutilización como en medios de industrias (Sankaranarayanan *et al.*, 2023).

Con lo anterior, resultados de estudios indican que *Elodea canadensis* puede utilizarse como indicadora en pruebas de contacto con sedimentos de fondo; en donde las respuestas finales en crecimiento de longitud de brotes y raíces, Elodea trabaja como indicador básico de sensibilidad a la toxicidad presente en sedimentos, y por otro lado, se pueden llegar a presentar análisis de células con cromosomas anormales en meristemo apical de la raíz de esta para lograr evaluar la genotoxicidad de dichos sedimentos (Zotina *et al.*, 2015a).

Fitorremediación en humedales. Los humedales artificiales como naturales se han utilizado como alternativas eficientes para el tratamiento de agua (Verhoeven y Meuleman 1999); siendo parte de las tecnologías recientes aprobadas para dicho tratamiento. A diferencia de otros sistemas de tratamiento convencionales, los humedales artificiales son fáciles de operar y mantener, los que poseen un alto potencial de aplicación en diversas zonas (Kivaisi, 2001).

Estos sistemas de humedales tienen características únicas que los hacen aptos para utilizar en la purificación del agua; como lo es la mantención de condiciones aeróbicas y anaeróbicas en donde los microbios son parte del proceso del tratamiento, además que debido a inundaciones y constantes lluvias, estos se mantienen como medios semiacuáticos que logran contener grandes cantidades de agua y por otro lado, estos apoyan el crecimiento de vegetaciones de alto crecimiento, ayudando a optimizar las condiciones de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno y en el proceso de eliminación de nutrientes (Verhoeven y Meuleman, 1999).

Los humedales caracterizados y distinguidos por su suelo húmedo que actúa como una barrera entre el agua y la tierra, según su vegetación predominante se pueden clasificar en; marismas que son humedales que conforman el punto de transición entre ecosistemas acuáticos y terrestres, pantanos de agua salada y dulce son conocidos como marismas costeras siendo muy ricos en nutrientes que ayudan al crecimiento floral y por último como turberas que en su mayoría suelen

ser depósitos de humedales que contienen material vegetal muerto que son compuesto principalmente de turba, siendo así presentados con una alta biodiversidad (Kivaisi, 2001).

Reacción de *Elodea canadensis* frente al contacto con contaminantes. En *Elodea* se logran observar efectos tóxicos y genotóxicos en la biota acuática frente a contaminantes depositados en sedimentos del fondo del agua, anomalías que se muestran en el meristemo apical de la raíz, la cual es sensible a la calidad de dichos sedimentos naturales, los que presentan mezclas de contaminantes (Zotina *et al.* 2015b).

En el caso del Cobre, en concentraciones de hasta 10 μM , este provoca efectos fisiológicos en las hojas de *Elodea*, así también, como la degradación de proteínas solubles, acumulación de polipéptidos y la acumulación de pigmentos fotosintéticos (Malec *et al.* 2009).

Elodea canadensis al estar expuesta a Cadmio llegan a mostrar brotes más cortos con relación a plantas sin esta exposición, además de tallos más delgados y hojas menos expandidas; en donde estas últimas logran acumular altas cantidades de este elemento, el cual entre un 90-95% permanece unido a las paredes celulares aniónicas. Ante esto, hojas jóvenes y maduras llegan a mostrar una disminución en la actividad fotosintética, lo cual no es solo atribuible a un menor contenido de clorofila, si no que en hojas jóvenes el Cd dificulta la división y expansión de cloroplastos, mientras que en hojas adultas el Cd acelera la aparición de síntomas de senescencia en cloroplastos (Dalla *et al.*, 2005).

Estudios indican que el Níquel podría producir estrés oxidativo en hojas de *Elodea canadensis*, en concentraciones de hasta 10 μM ; con esto y en respuesta, las plantas lograron desarrollar mecanismos de desintoxicación como lo es una síntesis mejorada de compuestos, mejorando así la acumulación de Ni en tejidos vegetales; es así como *E. canadensis* podría utilizarse como eliminador biológico de este contaminante hasta la concentración mencionada (Maleva *et al.*, 2009).

Elodea con su carácter hiperacumulador frente al Cobalto, presenta una biomasa y tasa de crecimiento relativo en aumento, el cual con una cantidad de $0,39\% \pm 0,02\%$ de masa seca a una concentración inicial en aguas residuales de

15 mg/L, se presenta como una planta con alta tolerancia a la exposición a este contaminante (Mosoarca *et al.*, 2018).

Solución ecológica de *Elodea canadensis* usada para fitorremediación. Está demostrado que la fitorremediación se lleva a cabo mediante variados mecanismos como fitoextracción, rizofiltración y otros mencionados; en donde las plantas con un sistema radicular desarrollado son las más adecuadas para la fitorremediación, por lo tanto, es necesario aplicar especies vegetales con alto factor de acumulación de radionucleidos y con una biomasa considerable (Dubchak y Bondar, 2019).

Con esto, las macrófitas acuáticas suelen seguir el mecanismo de rizofiltración para la eliminación de metales, las cuales son herramientas de alto valor ecológico para la reducción de contaminantes por metales pesados presentes en ecosistemas acuáticos que de alguna manera reciben efluentes industriales y aguas residuales de diversos orígenes. Estas son preferidas debido a su bajo costo, su abundante presencia en ecosistemas acuáticos y su fácil manejo (Rai, 2009).

Es con esto, que el agua tratada post proceso de fitorremediación, es libre de un gran porcentaje de contaminantes, lo que la hace apta para su reutilización en industrias (Sankaranarayanan *et al.*, 2023). Por otro lado, una vez que las plantas son utilizadas para el proceso de fitorremediación, es necesario cosecharlas en el tiempo indicado, esto ya que se descompondrá en dicho suelo, redispersando los componentes y radionucleidos ya absorbidos (Entry *et al.*, 1999).

Capítulo 5. Alcance a futuro y posibles limitaciones de la *Elodea canadensis* frente a fitorremediación

Frente a condiciones que permitan el crecimiento y la actividad microbiana y vegetal es cuando la fitorremediación puede ser eficaz, proceso que es económica en cuanto a otros medios (Dubchak y Bondar, 2018); campo que se encuentra en rápido desarrollo, siendo en un futuro parte integral de la gestión ambiental y la reducción de posibles riesgos que existirán. Proceso que tiene además ventajas económicas por su bajo costo, presenta menor daño para el medio ambiente a comparación a métodos basados en la ingeniería (Dubchak y Bondar, 2019).

Dentro de las estrategias de la biorremediación hay ventajas como lo es el costo el cual es inferior a procesos tradicionales, existe un control fácil hacia las plantas,

es posible la recuperación y reutilización de metales valiosos y es potencialmente el método menos dañino ya que utiliza organismos naturales que ayudan a preservar el medio ambiente de forma más natural. Por otro lado como limitaciones se encuentran que esta se limita a profundidades ocupadas por raíces, tiene un crecimiento lento y una baja biomasa, con biorremediación basado en plantas no es posible prevenir completamente la lixiviación de contaminantes al agua subterránea, la supervivencia de las plantas se puede ver afectada por la toxicidad y el estado en general del agua y la bioacumulación de contaminantes se observa en las plantas que pasan a la cadena alimentaria, esto desde el consumidor primario y que pueda requerir de la eliminación de este (Dubchak y Bondar, 2018b).

La biorremediación con uso de *Elodea canadensis* podría proporcionar beneficios tanto a la sociedad como a la naturaleza, en donde contribuiría a la regulación de nutrientes en lagos y particularmente en ambientes más degradados, pero que en cierto punto al formar monocultivos pueden causar daños asfixiando zonas litorales (Marbuah *et al.*, 2019). Como técnica la biorremediación a menudo se limita a contaminantes biodegradables, el cual es un proceso sumamente selectivo que puede dificultar su aplicación a gran escala (Shah y Shah, 2020b). Esta planta de tratamiento de aguas residuales logra disminuir las concentraciones de Carbono y Nitrógeno, contaminantes orgánicos que se han convertido en preocupación en temas de salud alimentaria, por lo que la prevención de la contaminación en el agua y en alimentos es prioridad de salud pública, por lo que lo hace un trabajo aún más necesario (Guo *et al.*, 2019).

Elodea canadensis posee una capacidad fitoacumuladora que fue evaluada en un estudio, de las cuales dicha capacidad varía dependiendo del número de plantas utilizadas en el medio, la concentración de elementos como el cromo, el tiempo de retención y el número de días en donde se aplicó el proceso de fitorremediación; de los cuales en dicho estudio encontraron factores de bioacumulación como lo es el factor de translocación mayores a 1 para esta especie. Esto logra corroborar la capacidad que posee esta planta como fitorremediador. Dicho estudio demostró una reducción en la solución de cromo hasta un 65% y una reducción de contenido de Total de Sólidos Disueltos (TDS) hasta un 45%; además, tras la optimización de los

análisis de superficie, se reveló que este tratamiento es efectivo durante 90 días con una solución de cromo de 7,5 ppm, en donde el tiempo de retención optimizado fue de 1,5 h, obteniendo mejores resultados con dos plantas en un contenedor (Sankaranarayanan *et al.*, 2023).

Con lo mencionado, la fitorremediación como tratamiento de aguas residuales es una gran alternativa puesto que no se consume energía, no genera residuos secundarios, además de ayudar a mejorar el ecosistema. Este procedimiento se puede seguir estudiando adicionalmente para lograr identificar las condiciones óptimas para el tratamiento a escala con mayor número de plantas. Aunque este tratamiento puede llegar a combinarse con diversas técnicas para lograr 0 vertidos de contaminantes al medio ambiente (Sankaranarayanan *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

Elodea canadensis gracias a su proximidad ecológica a los sedimentos del fondo, puede utilizarse como indicador de sensibilidad frente a la toxicidad de sedimentos e igualmente utilizarse como criterio para valorizar la genotoxicidad.

Elodea canadensis se presenta como una estrategia sostenible para el tratamiento de aguas residuales, gracias a su bajo costo para el tratamiento, al no requerir de adición de productos químicos, funcionar con bajo consumo de energía, fácil cultivo y valor estético.

Elodea canadensis al crecer y llegar a colonizar controladamente embalses o humedales artificiales, presenta componentes importantes y atractivos para la fitorremediación.

REFERENCIAS

1. Abd-Elhamid H. F., S. M. Abd-Elmoneem, G. M. Abdelaal, M. Zeleňáková, Z. Vranayova and I. Abd-Elaty 2021. Investigating and managing the impact of using untreated wastewater for irrigation on the groundwater quality in arid and semi-arid regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(14): 7485.
2. Akmukhanova N., B. Zayadan, A. Sadvakasova, K. Bolatkhan and M. Bauenova 2018. Consortium of higher aquatic plants and microalgae designed to purify

- sewage of heavy metal ions. Russian Journal of Plant Physiology 65: 143-149.
3. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. 2013. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. Chemosphere, 91(7), 869-881.
 4. Arthur E. L., P. J. Rice, P. J. Rice, T. A. Anderson, S. M. Baladi, K. L. Henderson 2005. Phytoremediation—an overview. Critical Reviews in Plant Sciences 24(2): 109-122.
 5. Barrat-Segretain, M.-H. and G. Bornette 2000. Regeneration and colonization abilities of aquatic plant fragments: effect of disturbance seasonality. Hydrobiologia 421: 31-39.
 6. Benit, N. and A. S. Roslin 2015. Physicochemical properties of wastewater collected from different sewage sources. International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology 2(11): 1-6.
 7. Bowmer K. H., S. Jacobs and G. Sainty 1995. Identification, biology and management of *Elodea canadensis*, Hydrocharitaceae. Journal of aquatic plant management 33(1): 13-19.
 8. Bowmer K. H., D. S. Mitchell and L. David 1984. Biology of *Elodea canadensis* Michx. and its management in Australian irrigation systems. Aquatic botany 18(3): 231-238.
 9. Bučar M., A. Rimac, V. Šegota, N. Vuković and A. Alegro 2024. Ecology of *Elodea canadensis* Michx. and *Elodea nuttallii* (Planch.) H. St. John—Insights from National Water Monitoring in Croatia. Plants 13(12): 1624.
 10. Buldrini F., G. Pezzi, M. Barbero, A. Alessandrini, L. Amadei, S. Andreatta 2023. The invasion history of *Elodea canadensis* and *E. nuttallii* (Hydrocharitaceae) in Italy from herbarium accessions, field records and historical literature. Biological Invasions 25(3): 827-846.
 11. Cegłowska A., S. Jusik, A. Samecka-Cymerman, A. Klink and K. Szoszkiewicz 2017. Habitat requirements of *Elodea canadensis* Michx. in Polish rivers. Oceanological and Hydrobiological Studies 46(4): 363-378.
 12. Cook C. D., B. J. Gut, E. M. Rix and J. Schneller 1974. Water plants of the world: a manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes, Springer Science & Business Media.

13. Corzo A., R. L. Chaney, A. J. Baker, M. Edraki, P. D. Erskine, G. Echevarria 2020. Phytoextraction of high value elements and contaminants from mining and mineral wastes: opportunities and limitations. *Plant and Soil* 449: 11-37.
14. Crow, G. E. 1993. Species diversity in aquatic angiosperms: latitudinal patterns. *Aquatic botany* 44(2-3): 229-258.
15. Dalla F., N. La Rocca, I. Moro, S. De Faveri, C. Andreoli and N. Rascio 2005. Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. *Plant science* 168(2): 329-338.
16. Entry J., L. Watrud and M. Reeves 1999. Accumulation of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi. *Environmental pollution* 104(3): 449-457.
17. Eugelink, A. 1998. Phosphorus uptake and active growth of *Elodea canadensis* Michx. and *Elodea nuttallii* (Planch.) St. John. *Water Science and Technology* 37(3): 59-65.
18. Fritioff, Å. and M. Greger 2007. Fate of cadmium in *Elodea canadensis*. *Chemosphere* 67(2): 365-375.
19. Gaikwad, S. S. and N. A. Kamble 2014. Heavy metal pollution of Indian river and its biomagnifications in the molluscs. *Octa Journal of Environmental Research* 2(1).
20. Gomes M. P., D. S. Tavares, V. S. Richardi, R. Z. Marques, N. Wistuba, J. C. M. de Brito 2019. Enrofloxacin and Roundup® interactive effects on the aquatic macrophyte *Elodea canadensis* physiology. *Environmental pollution* 249: 453-462.
21. Guo W., B. Pan, S. Sakkiyah, G. Yavas, W. Ge, W. Zou 2019. Persistent organic pollutants in food: contamination sources, health effects and detection methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(22): 4361.
22. Haripriyan U., K. Gopinath, J. Arun and M. Govarthan 2022. Bioremediation of organic pollutants: A mini review on current and critical strategies for wastewater treatment. *Archives of Microbiology* 204(5): 286.

23. Helbling, D. E. 2015. Bioremediation of pesticide-contaminated water resources: the challenge of low concentrations. *Current Opinion in Biotechnology* 33: 142-148.
24. Hussain M. I., A. Muscolo, M. Farooq and W. Ahmad 2019. Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agricultural water management* 221: 462-476.
25. Hussner, A. 2012. Alien aquatic plant species in European countries. *Weed research* 52(4): 297-306.
26. Jain M., S. A. Khan, K. Sharma, P. R. Jadhao, K. K. Pant, Z. M. Ziora 2022. Current perspective of innovative strategies for bioremediation of organic pollutants from wastewater. *Bioresource technology* 344: 126305.
27. Javed, M. T. and M. Greger 2010. Cadmium triggers *Elodea canadensis* to change the surrounding water pH and thereby Cd uptake. *International journal of phytoremediation* 13(1): 95-106.
28. Juwarkar A. A., S. K. Singh and A. Mudhoo 2010. A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Reviews in Environmental Science and bio/technology* 9: 215-288.
29. Kalanaki M., H. Ritzema, R. Bamshad, E. Jones and M. Fazilatnia 2020. Application of bio-desalinization for reclamation of salt-affected soil under composted cow manure and deficit irrigation with saline water. *Paddy and Water Environment* 18: 469-479.
30. Kesari K. K., R. Soni, Q. M. S. Jamal, P. Tripathi, J. A. Lal, N. K. Jha 2021. Wastewater treatment and reuse: a review of its applications and health implications. *Water, Air, & Soil Pollution* 232: 1-28.
31. Kim, I. and H. Tanaka 2009. Photodegradation characteristics of PPCPs in water with UV treatment. *Environment international* 35(5): 793-802.
32. Kivaisi, A. K. 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological engineering* 16(4): 545-560.

33. Lingamdinne L. P., J. R. Koduru, H. Roh, Y.-L. Choi, Y.-Y. Chang and J.-K. Yang 2016. Adsorption removal of Co (II) from waste-water using graphene oxide. *Hydrometallurgy* 165: 90-96.
34. Lokhande R. S., P. U. Singare and D. S. Pimple 2011. Study on physico-chemical parameters of waste water effluents from Talaja industrial area of Mumbai, India. *International Journal of Ecosystem* 1(1): 1-9.
35. Lu H., Y. Zhang, B. Liu, J. Liu, J. Ye and C. Yan 2011. Rhizodegradation gradients of phenanthrene and pyrene in sediment of mangrove (*Kandelia candel* (L.) Druce). *Journal of Hazardous Materials* 196: 263-269.
36. Mal T. K., P. Adorjan and A. L. Corbett 2002. Effect of copper on growth of an aquatic macrophyte, *Elodea canadensis*. *Environmental pollution* 120(2): 307-311.
37. Malec P., M. Maleva, M. Prasad and K. Strzałka 2009. Copper toxicity in leaves of *Elodea canadensis* Michx. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 82: 627-632.
38. Maleva M. G., G. F. Nekrasova, P. Malec, M. Prasad and K. Strzałka 2009. Ecophysiological tolerance of *Elodea canadensis* to nickel exposure. *Chemosphere* 77(3): 392-398.
39. Manasa, R. L. and A. Mehta 2020. Wastewater: sources of pollutants and its remediation. *Environmental Biotechnology* Vol. 2: 197-219.
40. Marbuah G., I.-M. Gren, K. Tattersdill and B. G. McKie 2019. Management of an Aquatic Invasive Weed with uncertain benefits and damage costs: The case of *Elodea canadensis* in Sweden. *Water Economics and Policy* 5(03): 1850025.
41. Mendez, M. O. and R. M. Maier 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology. *Environmental health perspectives* 116(3): 278-283.
42. Miranda A., N. Muradov, A. Gujar, T. Stevenson, D. Nugegoda, A. Ball 2014. Application of aquatic plants for the treatment of selenium-rich mining wastewater and production of renewable fuels and petrochemicals. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 4(1): 97-112.

43. Mosoarca G., C. Vancea, S. Popa and S. Boran 2018. Adsorption, bioaccumulation and kinetics parameters of the phytoremediation of cobalt from wastewater using *Elodea canadensis*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 100: 733-739.
44. Nyquist, J. and M. Greger 2007. Uptake of Zn, Cu, and Cd in metal loaded *Elodea canadensis*. *Environmental and experimental botany* 60(2): 219-226.
45. Otte, M. L. 2023. A Brief History of Phytoremediation Using Wetlands. *Wetlands for Remediation in the Tropics: Wet Ecosystems for Nature-based Solutions*, Springer: 1-14.
46. Petrov D. S., A. E. Korotaeva, M. A. Pashkevich and M. A. Chukaeva 2023. Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment. *Environmental Monitoring and Assessment* 195(1): 122.
47. Pratas J., C. Paulo, P. J. Favas and P. Venkatachalam 2014. Potential of aquatic plants for phytofiltration of uranium-contaminated waters in laboratory conditions. *Ecological engineering* 69: 170-176.
48. Rai, P. K. 2009. Heavy metal phytoremediation from aquatic ecosystems with special reference to macrophytes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 39(9): 697-753.
49. Rascio N., P. Mariani, F. Dalla Vecchia, A. Zanchin, A. Pool and W. Larcher 1994. Ultrastructural and photosynthetic features of leaves and stems of *Elodea canadensis*. *Journal of plant physiology* 144(3): 314-323.
50. Salt D. E., R. Smith and I. Raskin 1998. Phytoremediation. *Annual review of plant biology* 49(1): 643-668.
51. Sankaranarayanan V., S. Velusamy, P. Sankaran and K. Kandasamy 2023. Phytoremediation potential of *Elodea canadensis* for reduction of chromium—optimization using response surface methodology. *Desalination and Water Treatment* 293: 192-199.
52. Shah, A. and M. Shah 2020. Characterisation and bioremediation of wastewater: a review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater. *Groundwater for Sustainable Development* 11: 100383.

53. Sharma K., P. Devi, S. R. Dey and P. Kumar 2024. Mercury phytovolatilization: an overview of the mechanism and mitigation. Role of green chemistry in ecosystem restoration to achieve environmental sustainability: 325-331.
54. Soni R., A. K. Pal, P. Tripathi, J. A. Lal, K. Kesari and V. Tripathi 2020. An overview of nanoscale materials on the removal of wastewater contaminants. *Applied water science* 10(8): 189.
55. Spicer, K. W., & Catling, P. M. 1988. The biology of canadian weeds.: 88. *Elodea canadensis* Michx. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(4), 1035-1051.
56. Urrutia J., P. Sánchez, A. Pauchard and E. Hauenstein 2017. Plantas acuáticas invasoras presentes en Chile: Distribución, rasgos de vida y potencial invasor. *Gayana. Botánica* 74(1): 147-157.
57. Verhoeven, J. T. and A. F. Meuleman 1999. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations. *Ecological engineering* 12(1-2): 5-12.
58. Zehnsdorf A., A. Hussner, F. Eismann, H. Röncke and A. Melzer 2015. Management options of invasive *Elodea nuttallii* and *Elodea canadensis*. *Limnologia* 51: 110-117.
59. Zotina T., M. Medvedeva, E. Trofimova, Y. Alexandrova, D. Dementyev and A. Bolsunovsky 2015a. Chromosomal abnormalities in roots of aquatic plant *Elodea canadensis* as a tool for testing genotoxicity of bottom sediments. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122: 384-391.
60. Zotina T. A., E. A. Trofimova, M. Y. Medvedeva, D. V. Dementyev and A. Y. Bolsunovsky 2015b. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry* 34(10): 2310-2321.