

Guanajuato Rumbo al Desarrollo Sustentable, Etapa-2.0: Caracterización del material lignocelulósico proveniente de *Eichhornia crassipes* dentro del rol de biorremediación en aguas contaminadas

Barroso Rangel Daniela Atláy¹, López Alvarado Hugo¹, Gutiérrez Vargas Santiago², Álvarez Varga Aurelio³, Serafín Muñoz Alma Hortensia^{1*}
Universidad de Guanajuato
sermuah@ugto.mx^{1*}

Resumen

La biomasa del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) presenta gran potencial para llevar a cabo técnicas de fitorremediación, esto principalmente a su gran capacidad de bioacumulación frente a distintos contaminantes presentes en cuerpos de agua, especialmente metales pesados. En este trabajo se llevó a cabo determinar los factores de bioacumulación y de translocación de distintos metales pesados en muestras de lirio acuático. Como resultados se obtuvo que el lirio acuático cuenta con un gran potencial de hiperacumulación ya que los factores de bioacumulación para los metales analizados fueron $x > 1$. La afinidad por bioacumular Plomo (Pb) se presentó en hoja y raíz mientras que en el tallo el metal prioritario fue el aluminio (Al). La tendencia de bioacumulación para las raíces fue $Pb > Cr > Hg > Ni > Al > As$; mientras que para el tallo fue de $Al > Ni > Hg > Cr > Pb$. Para las hojas fue de $Pb > Ni > Al > Cr > Hg$. Este trabajo contribuye en el posible uso del lirio acuático como posible material de insumo en prototipos para el tratamiento de aguas contaminadas con metales y metaloides.

Palabras clave: Lirio acuático, metales pesados, Laguna de Yuriria, biorremediación, fitorremediación.

Abstract

The biomass of water lily (*Eichhornia crassipes*) has great potential for phytoremediation techniques, mainly due to its high bioaccumulation capacity against different pollutants present in water bodies, especially heavy metals. In this work, the bioaccumulation and translocation factors of different heavy metals were determined in aquatic lily samples. The results showed that the aquatic lily has a great potential for hyper-accumulation, since the bioaccumulation factors for the metals analyzed were $x > 1$. The affinity to bioaccumulate lead (Pb) was present in the leaf and root, while in the stem the priority metal was aluminum (Al). The bioaccumulation trend for roots was $Pb > Cr > Hg > Ni > Al > As$, while for the stem it was $Al > Ni > Hg > Cr > Pb$. For the leaves, it was $Pb > Ni > Al > Cr > Hg$. This work contributes to the possible use of water lily as a possible input material in prototypes for the treatment of water contaminated with metals and metalloids.

Keywords: Water lily, heavy metals, Laguna de Yuriria, bioremediation, phytoremediation.

Introducción

La laguna de Yuriria es un embalse artificial ubicado mayoritariamente en el municipio Yuriria del estado de Guanajuato, parte de su extensión llega hasta los municipios de Salvatierra y Valle de Santiago, pertenecientes al mismo estado. Anteriormente, en el norte de la población de Yuriria existía una gran depresión geográfica que era constituida por numerosos pantanos donde se dice que se proliferaba el mosquito transmisor del paludismo, una enfermedad potencialmente mortal que se hacía cada vez más frecuente dentro de la comunidad (Quesada Camargo, 2010). Además, al encontrarse en la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, las inundaciones provocadas por las aguas provenientes del Río Lerma en el poblado eran bastante comunes, esto generaba grandes impactos y pérdidas para los pobladores (González Arévalo, 2021). Como una solución a ambos problemas anteriormente mencionados, el Fraile Diego de Chávez y Alvarado propone en el año 1548 convertir la depresión geográfica ubicada al norte del poblado en un lago. Esta propuesta tuvo un gran nivel de aceptación por parte de los habitantes, esto facilitó la construcción de lo que hoy conocemos como laguna de Yuriria, la cual es considerada como la primera obra hidráulica de América y una de las lagunas más grandes de México (SMAOT, 2016). Actualmente se encuentra catalogada como Área Natural Protegida (ANP), bajo la categoría 10 Área de Preservación Ecológica, también fue denominada como Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS) por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en el año de 1999 y declarada como Sitio RAMSAR en el año de 2004 por ser considerada como un Humedal de Importancia Internacional (SMAOT, 2016).

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es una especie tropical flotante originaria de Brasil y, posiblemente, de algunos países centroamericanos. Fue introducido por el hombre a ciertas zonas del resto de los continentes, lo que ha extendido su distribución ampliamente en los últimos cien años. El lirio acuático forma parte de la vegetación presente en la Laguna de Yuriria, se encuentra catalogado como una especie exótica e invasora para esta zona y ha llegado a cubrir alrededor de un 60% de la superficie total de la laguna (Hernández et al., 2015). Esta especie es altamente invasiva por lo que se considera como una de las principales malezas acuáticas del mundo, se caracteriza por tener una alta velocidad de crecimiento lo que le permite cubrir rápidamente las superficies de los cuerpos de agua en los que se encuentra. Esto puede representar efectos negativos para el ambiente, la salud humana y la economía (Tovar-Jiménez et al., 2019). No obstante, el lirio acuático también posee algunas características positivas, entre las que podemos destacar un buen potencial para fitorremediación hablando especialmente de metales pesados. El lirio acuático tiene diferentes posibilidades para ser utilizado en la eliminación de metales pesados, ya que tiene la capacidad de absorberlos, aun cuando se encuentren contenidos en sedimentos, incluso en el caso de sitios altamente contaminados como las zonas aledañas a los depósitos de desechos electrónicos o reciclaje. *Eichhornia crassipes* no sólo tiene la capacidad de acumular metales pesados, también aumenta su capacidad de absorción y la translocación en sitios muy contaminados, lo que indica que tiene una buena capacidad para remover metales del agua (Du et al., 2020). El desarrollo de tecnologías de remediación que aprovechen el lirio acuático como materia prima resulta beneficioso en dos sentidos, da una pauta para eliminar metales pesados de cuerpos de agua lo que permitiría elevar la calidad de estos significativamente y, además, nos permitiría librar de cierto estrés ambiental a los cuerpos de agua que se encuentran infestados de *Eichhornia crassipes*, lo que también nos ayudaría a mejorar las condiciones de los cuerpos de agua que albergan esta especie. Los metales pesados representan un grave peligro ambiental y sanitario, estos se encuentran naturalmente en la Tierra tienen diversos usos o aplicaciones industriales, como pesticidas, los metales pesados son compuestos inorgánicos que se agravan por su persistencia, los cuales consisten en diversos productos entre ellos herbicidas, insecticidas, fungicidas y rodenticidas. La fitorremediación es un método alternativo eficiente y menos costoso para eliminar metales pesados y pesticidas directamente del agua (Anand et al., 2019).

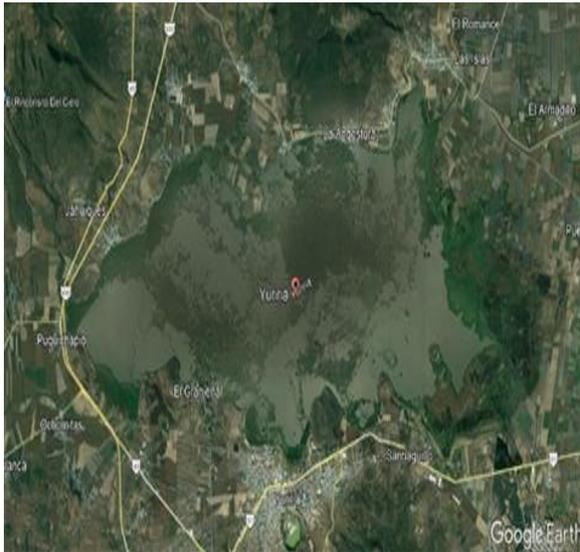


Figura 1 Imagen satelital de la Laguna de Yuriria. Fuente: Google Earth.



Figura 2 Visita a la Laguna de Yuriria.
Fuente: Autor



Figura 3 Lirio acuático extraído de la Laguna de Yuriria. Fuente: Autor

Los metales pesados son tóxicos, generalmente presentan problemas en los seres vivos cuando en lugar de ser metabolizados son acumulados en órganos o tejidos blandos. Estos llegan al cuerpo humano cuando este ingiere agua o alimentos contaminados, por medio de inhalación o absorción por parte de la piel. Los problemas que pueden generar en cuanto a salud son diversos, pueden afectar severamente al sistema

nervioso (Alzheimer, Parkinson, depresión, demencia), a nivel óseo e incluso nivel reproductivo. Además, pueden generar alteraciones y daños en ADN y producir cáncer en distintos órganos (pulmones, piel, vejiga, etc.) (Ungureanu & Mustatea, 2022). El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo la caracterización de muestras de agua y lirio acuático enfocándose en metales pesados presentes en puntos específicos en de la Laguna de Yuriria con propósito de hacer una correlación que nos permita determinar la capacidad de fitorremediación que posee el lirio acuático.

Metodología

La metodología fue llevada a cabo en tres etapas cruciales, (Figura 4):

1) **Recolección y preparación de las muestras.**

En esta primera etapa se visitó la Laguna de Yuriria para recolectar muestras tanto de agua como de planta, en este caso *Eichhornia crassipes* (lirio acuático).

I. Muestras – Agua

Con el objetivo de preservar la caracterización de las muestras se utilizaron botellas de PEAD (Polietileno de Alta Densidad) y se preservaron agregando una solución de ácido nítrico llevándolas hasta a un pH aproximado de 2-3.

II. Muestras – Plantas

a. Las muestras se transportaron frescas hasta el laboratorio, Donde se diseccionaron para separarse en tres principales componentes que fueron: hojas, tallo y raíces.

b. Se sometieron a un proceso de secado, triturado y finalmente tamizado.

c. Por último, el polvo obtenido para cada parte de cada muestra fue sometido a una digestión acida con una combinación de soluciones concentradas de ácido nítrico y ácido clorhídrico en proporción 20:1, así como peróxido de hidrogeno concentrado, hasta obtener muestras totalmente liquidas y cristalinas.

2) **Análisis de la muestra.**

Teniendo las muestras en forma líquida se procedió a analizarlas con la ayuda de un Colorímetro SMART3, DR900, DR3900 y kits de las compañías LaMotte y HACH, siguiendo los protocolos previamente establecidos y avalados por la misma compañía para metales (Cr, Hg, Pb, Ni, Fe, Mn, Al) y para algunos iones (NO₂⁻, NO₃⁻, NH₃-N), disponibles en <https://www.hach.com/> y <https://lamotte.com/>. Cabe resaltar que en algunos casos fue necesario ajustar:

- El pH de las muestras, generalmente usando una solución de NaOH 1N, o
- La temperatura de estas llevándolas al horno por cierto periodo de tiempo hasta alcanzar una temperatura entre 15 – 25°C.

3) **Análisis de bioacumulación.**

En la última etapa se utilizaron los valores obtenidos para agua y planta para establecer una relación gramos de metal/ion-kilogramos de biomasa a partir del cálculo del factor de bioacumulación y del factor de adsorción.

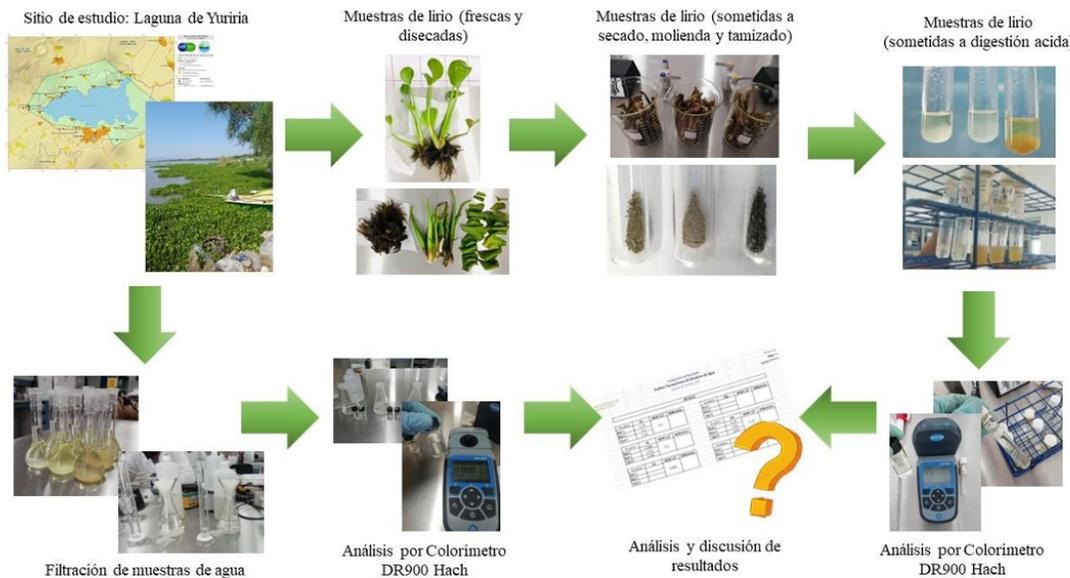


Figura 4 Metodología utilizada en el desarrollo del proyecto. Fuente: Autor

Resultados

Los valores reportados en la tabla 1 corresponden a las concentraciones arrojadas por el equipo de espectrofotometría de Hach, después de someter las muestras recolectadas en los distintos puntos representativos de la Laguna de Yuriria a los distintos procedimientos previamente establecidos por la empresa Hach correspondiente a cada parámetro. Se calculó la media para cada parámetro contemplando las tres muestras analizadas para obtener un valor generalizado para las concentraciones de los distintos metales e iones presentes en la laguna de Yuriria.

Se realizaron visitas a campo, figuras 5 y 6, donde se recabó información esencial y se recolectaron muestras de agua del sitio a analizar, de las cuales se analizaron los principales parámetros insitu determinados anteriormente de acuerdo con el impacto que tiene el tiempo de almacenamiento sobre estos, de los cuales se les dio mayor importancia a nitrato, nitritos, sulfuros y sulfatos.

Para poder establecer las concentraciones de los distintos metales bioacumulación por el lirio acuático en orden de definir y evaluar su desempeño en cuanto a capacidad de fitorremediación se calculó una correlación con los datos obtenidos en los análisis de agua y de plantas. En la tabla 2 se reportan los valores de las concentraciones de los metales en miligramo por cada kilogramo de biomasa de lirio acuático analizado.



Figura 5 Análisis In situ de muestras de agua realizadas con equipos HACH. Fuente: Autor



Figura 6 Análisis In situ de muestras de agua realizadas con equipos HACH. Fuente: Autor

Tabla 1. Valores de las concentraciones obtenidas de los distintos parámetros analizados en agua.

Parámetro	Muestra 1 (mg/L)	Muestra 2 (mg/L)	Muestra 3 (mg/L)	Media de las Muestras Analizadas (mg/L)	NOM-001- SEMARNAT- 2021
pH	7.32	7.83	7.59	7.58	6-9
T (°C)	22.2	26.1	26.7	25.00	35
DQO (mg/L)	66	65	67	66.00	140
Plomo (PB)	0.177	0.122	0.122	0.14	0.4
Níquel (Ni)	0.68	0.051	0.068	0.37	4
Arsénico (As)	0.013	0.013	0.10	0.04	0.2
Cromo (Cr VI)	0.08	0.09	0.05	0.07	1
Zinc (Zn)	N/D	N/D	N/D	N/D	20
Cianuro (CN)	0.002	N/D	N/D	N/D	2
Mercurio (Hg)	0.09	0.06	0.04	0.06	0.01
Hierro (Fe)	0.28	0.20	0.18	0.22	N/A
Manganeso (Mn)	0.2	0.0	0.0	0.07	N/A
Aluminio (Al)	0.066	0.025	0.085	0.06	N/A
Nitrógeno Total (NT)	65.8	93.7	132.0	97.17	30
NITRITOS (NO ₂ ⁻)	0.004	0.001	0.005	0.003	N/A
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ -N)	0.20	0.14	0.10	0.15	N/A

*N/D: No detectable, el equipo utilizado no detectó el parámetro a analizar.

*N/A: No asignado, el parámetro no cuenta con un valor asignado según la norma referenciada.

Tabla 2. Valores de las concentraciones de metales y metaloides obtenidos en plantas de lirio acuático.

Muestra Representativa	% de Humedad	Cr _{VI} (mg/kg)	Hg (mg/kg)	As (mg/kg)	Al (mg/g)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)
Hoja	29.8	8	4	N/D	7.2	0	0	24.2	49
Tallo	81.6	2	4	N/D	15.2	0	0	1.8	24.8
Raíz	75.8	16	6	2.5	4	0	0	348	28.6

*N/D: No detectable, el equipo utilizado no detectó el parámetro a analizar.

El factor de bioacumulación hace referencia a la capacidad de una planta (raíces, tallos y hojas) de captar metales dentro de su organismo, en relación con la concentración de estos en el entorno donde se encuentren, en este caso con la concentración de ciertos metales pesados presente en el agua (Medina & Montaña). El factor de bioadsorción se obtiene a partir del siguiente cálculo:

$$BAC = \frac{\left[\frac{\text{mg metal pesado}}{\text{kg de biomasa}} \right]}{\left[\frac{\text{mg de metal pesado}}{\text{L de H}_2\text{O}} \right]}$$

Ecuación 1 Cálculo para obtener el factor de bioacumulación para metales en biomasa de planta.

Si el valor obtenido a partir de este cálculo es >1 entonces quiere decir que la planta analizada se puede clasificar como hiperacumuladora, si el valor es <1 entonces quiere decir que la capacidad de exclusión de la planta es mayor (Medina & Montaña). En la siguiente tabla se muestran los factores de bioacumulación referentes a los metales de interés para cada parte analizada.

Tabla 3. Factor de bioadsorción para cada metal analizado en cada parte de la planta.

Metal	Hoja	Tallo	Raíz
Cr (VI)	114.29	28.57	228.57
Hg	66.67	66.67	100.00
As	ND	ND	62.50
Al	120.00	253.33	66.67
Mn	ND	ND	ND
Fe	ND	ND	ND
Pb	172.45	12.83	2479.81
Ni	134.06	67.85	78.25

*N/D: No detectable, el equipo utilizado no detectó el parámetro a analizar.

El factor de translocación es el resultado de la división de la concentración de los metales en los componentes aéreos de la planta (tallos y hojas) y la concentración presente en la raíz de esta. Este valor nos permite conocer la capacidad de la planta de transportar los metales de la raíz hacia los otros componentes de las plantas. Un valor >1 significa que existe una capacidad de transportar los metales de las raíces a los componentes aéreos, además de que la planta también puede clasificarse como hiperacumuladora. Valores <1 sugiere que la capacidad de hiperacumulación de la planta no es significativa, por lo que no puede clasificarse como tal (Medina & Montaña).

$$TF = \frac{[\text{] metales en hoja o tallo}}{[\text{] metales en raíz}}$$

Ecuación 2 Cálculo para obtener el factor de translocación para metales distintas partes de planta.

En la tabla 4 se muestran el factor de translocación para cada uno de los metales de interés tanto para hoja como para tallo de las muestras de planta analizadas.

Tabla 4. Factor de translocación para cada metal analizado calculado para hoja y tallo

Metal	Hoja	Tallo
Cr (VI)	0.50	0.13
Hg	0.67	0.67
As	ND	ND
Al	1.80	3.80
Mn	ND	ND
Fe	ND	ND
Pb	0.07	0.01
Ni	1.71	0.87

*N/D: No detectable, el equipo utilizado no detectó el parámetro a analizar.

Los valores obtenidos de bioacumulación para los metales analizados y detectados (Cr (VI), Hg, Al, Pb y Ni) fueron por mucho mayores a uno lo que nos indica que la especie *Eichhornia crassipes* cuenta con un gran potencial de hiperacumulación, resultados que concuerdan con estudios hechos anteriormente por (Kumar et al., 2020) y por (Weis & Weis, 2004), por mencionar algunos. Podemos destacar la afinidad del lirio acuático por bioacumular Plomo (Pb), tanto en hoja como en raíz, mientras que mostró mayor afinidad por bioacumular Aluminio (Al) en el tallo; esto sugiere que la planta presenta diferente comportamiento de bioacumulación de un mismo metal en sus distintos componentes debido probablemente a la diferencia de composición de dichos componentes (Eid et al., 2021). Para el caso de las raíces, la tendencia de bioacumulación fue en el orden Pb > Cr > Hg > Ni > Al > As; mientras que para el tallo fue de Al > Ni > Hg > Cr > Pb; por último, para las hojas fue de Pb > Ni > Al > Cr > Hg. En cuanto a los valores obtenidos para el factor de translocación, si bien sugieren que, si hay un traslado eficiente de los metales presentes en las raíces hacia los tallos y hojas, también es notorio que la mayoría de los valores están por debajo de 1 (excepto para el Aluminio en hoja y tallo, y el Ni en hoja), sin embargo, no podemos descartar la capacidad acumuladora del Lirio Acuático basándonos en los factores de bioacumulación obtenidos anteriormente. Los valores bajos obtenidos para los factores de translocación se pueden atribuir a una posible estrategia de exclusión desarrollada por la planta que le permite trasladar los metales a sus componentes activos sin ponerlos en riesgo (Eid et al., 2021).

Conclusiones

Los factores de bioacumulación y translocación obtenidos a partir del análisis del lirio acuático resaltan su capacidad hiperacumuladora, esta información abre camino para desarrollar biotecnologías fundadas en el aprovechamiento sustentable de esta especie donde se pueda potencializar aspectos positivos de la especie o que se puedan manipular o controlar los factores no tan deseables que conlleva el crecimiento y desarrollo natural del lirio acuático, como pueden ser posibles problemas de eutrofización. Algunas posibles opciones de este tipo de tecnologías involucran el uso de biomasa proveniente del lirio acuático como materia prima para la elaboración de pellets que pueden usarse de manera controlada y en sitios específicos. Por lo que este trabajo contribuye dentro del desarrollo de técnicas sustentables o desarrollo de prototipos de innovación tecnológica con la utilización de la biomasa del lirio acuático como material de insumo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al comité de Veranos UG 2022 y a la DAIP-UG por el apoyo otorgado, así como a la Secretaría del Edo de Guanajuato IdeaGTO, ya que este producto forma parte del proyecto Guanajuato Rumbo al Desarrollo Sustentable: Caso de Estudio Comunidades Sostenibles Etapa 2.0, (070/2021); 2021-2022.

Referencias Bibliográficas

- Anand, S., Bharti, S. K., Kumar, S., Barman, S., & Kumar, N. (2019). Phytoremediation of heavy metals and pesticides present in water using aquatic macrophytes. *Phyto and rhizo remediation*, 89-119.
- Du, Y., Wu, Q., Kong, D., Shi, Y., Huang, X., Luo, D., . . . Leung, J. Y. (2020). Accumulation and translocation of heavy metals in water hyacinth: Maximising the use of green resources to remediate sites impacted by e-waste recycling activities. *Ecological Indicators*, 115, 106384.
- Eid, E. M., Shaltout, K. H., Almuqrin, A. H., Aloraini, D. A., Khedher, K. M., Taher, M. A., . . . Barcelo, D. (2021). Uptake prediction of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* grown in irrigation canals: A biomonitoring approach. *Science of the Total Environment*, 782
- González Arévalo, A. L. (2021). La contaminación por desechos industriales en la Laguna de Yuriria, ubicada en la Región Centro de México. In I. d. I. E. y. A. M. d. C. p. e. D. R. Universidad Nacional Autónoma de México (Ed.), *Aproximaciones teórico-metodológicas para el análisis territorial y el desarrollo regional sostenible*. (Vol. I).
- Hernández, J. A., Torres-García, A., Conejo-Moreno, F. B., Oliva-González, A. S., & Ardila, A. N. (2015). Aprovechamiento de *Eichhornia crassipes* (lirio acuático) proveniente de la zona de Yuriria, Guanajuato, como fuente de Lignina, Celulosa y Hemicelulosa. *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL*, 7.
- Kumar, V., Singh, J., & Kumar, P. (2020). Regression models for removal of heavy metals by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) from wastewater of pulp and paper processing industry. *Environmental Sustainability*, 3, 35–44 <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42398-019-00093-x>
- Medina, K. D., & Montaña, Y. N. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN Y TRASLOCACIÓN DE METALES PESADOS EN EL *Juncus arcticus* Willd. Y *Cortaderia rudiusscula* Stapf, DE ÁREAS CONTAMINADAS CON EL PASIVO AMBIENTAL MINERO ALIANZA - ANCASH 2013 Universidad Nacional "Santiago Antúnez]. Perú. https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Medina_y_Montano_2014.pdf
- Quesada Camargo, R. (2010). Yuriria 1540 - 2010 Una Mirada a su Evolución en el Bicentenario de la Independencia Nacional y en el Centenario de la Revolución Mexicana (R. A. Isauro, Ed. Primera Edición ed.).
- SMAOT. (2016). Laguna de Yuriria y su Zona de Influencia. <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/areas-naturales- protegidas/10/Laguna-de-Yuriria-y-su-Zona-de-Influencia>
- Tovar-Jiménez, X., Favela-Torres, E., Volke-Sepúlveda, T. L., Escalante-Espinosa, E., Díaz-Ramírez, I. J., Córdova-López, J. A., & Téllez-Jurado, A. (2019). Influence of the geographical area and morphological part of the water hyacinth on its chemical composition. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(1). <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.10.013>
- Ungureanu, E. L., & Mustatea, G. (2022). Toxicity of Heavy Metals In Environmental Impact and Remediation of Heavy Metals (pp. 316). Intachopen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.97895>

Weis, J. S., & Weis, P. (2004). Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environmental International*, 30, 685-700.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.002>