

UTILIZACIÓN DE MORINGA OLEÍFERA COMO UN COAGULANTE-FLOCULANTE NATURAL PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUA

USE OF MORINGA OLEÍFERA AS A NATURAL COAGULANT-FLOCCULANT FOR WATER DECONTAMINATION

José J. Cedillo-Portillo(1)
Abigail Ponce-González(2)
Valeria J. González-Coronel(2)
Míriam Vega Hernández(2)
M. Teresa Zayas-Pérez(1)
Guillermo Soriano-Moro (2)

<https://orcid.org/0000-0003-0913-9394>
<https://orcid.org/0000-0002-1297-3497>
<https://orcid.org/0000-0002-9670-8876>
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9600>

Año 10 No. 28

Recibido: 12/diciembre/2023

Aprobado: 28/diciembre/2023

Publicado: 5/enero/2024

(1)Centro de Química, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria.

Av. San Claudio, Jardines de San Manuel, Puebla, Pue. México.

(2)Facultad de ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria. Av. San Claudio, Jardines de San Manuel

Correo: jjcedillo92@hotmail.com
jesus.soriano@correo.buap.mx,

Resumen

La contaminación del agua hoy en día es un problema global, por tal motivo es de suma importancia la investigación y la innovación en diferentes técnicas para el saneamiento de este vital líquido. Las semillas de Moringa oleífera han sido objeto de estudio desde hace años, debido a la facilidad que tienen para la remoción y clarificación de diversos contaminantes en agua, además de tener un efecto antimicrobiano, lo cual le confiere una propiedad interesante a la hora de emplearla dentro del tratamiento de aguas residuales. Esta revisión presenta una descripción general del uso de la Moringa oleífera como un material adsorbente natural para ser implementado en el proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de agua contaminada.

Palabras clave: Adsorbente, Agua, Coagulante, Floculante, Moringa oleífera.

ABSTRACT

Water pollution today is a global problem, for this reason research and innovation in different techniques for the sanitation of this vital liquid is of the utmost importance. Moringa oleifera seeds have been studied for years, due to the ease they have for the removal and clarification of various contaminants in water. In addition to having an antimicrobial effect, which gives it an interesting property when using it in wastewater treatment. This review presents a general description of the use of Moringa oleifera as a natural adsorbent material to be implemented in the coagulation-flocculation process for the treatment of contaminated water.

Keywords: Adsorbent, Water, Coagulant, Flocculant, Moringa oleifera.

Introducción

El agua es un recurso vital para los seres humanos, diariamente se emplea para diversos aspectos de la vida diaria, así como para la producción y preservación de bienes y servicios. Según la organización mundial de la salud (OMS), una persona requiere en promedio de 100 L de agua por día para satisfacer necesidades básicas (consumo e higiene). La contaminación de los recursos hídricos (Figura 1) es un problema global, lo cual es debido al crecimiento exponencial de la población, así como, el incremento del desarrollo industrial (textiles, cosméticas, alimentarias y de productos farmacéuticos), esto ha causado un aumento en los niveles de contaminación de agua (Mishra et al., 2021); (Rahmatpour et al., 2022). Se han identificado diversos contaminantes perjudiciales tanto para los seres humanos como para el ambiente, entre los cuales destacan: colorantes sintéticos (Pang et al., 2020), metales pesados (Abu-Danso et al., 2018), contaminantes emergentes (Cheng et al., 2021) proviniendo estos materiales tóxicos de fuentes antropogénicas y naturales (Okpara et al., 2023): El agua contaminada y el saneamiento deficiente de esta se relaciona con la transmisión de enfermedades tales como: el colera, disentería, diarreas, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis (Masumoto et al., 2022).



Figura 1. Contaminación del agua (Denchak 2023).

De acuerdo con el informe de CONAGUA en México (emitido en 2015) el consumo promedio por persona de agua al día se estima que es de 380 L, mientras que dentro del sector industrial se llegan a utilizar hasta 10 L

de agua para la fabricación de una sola hoja de papel y 91 L para la obtención de 500 g de plásticos. Además, que hasta la fecha se considera como un problema global el suministro de agua potable en diversas comunidades de países en desarrollo. Según la UNESCO, la falta de agua se debe a diversos factores, entre los cuales destaca el rápido crecimiento de la mancha urbana, así como la eliminación inadecuada de desechos tóxicos, lo cual afecta la disponibilidad del agua dulce, tan solo en México se dispone del 0.1 % del agua dulce disponible a nivel mundial. Debido a esto, cada vez se buscan más técnicas alternativas para el tratamiento de aguas contaminadas y combatir el desabasto.

Tratamiento de agua

Se han utilizado diversas técnicas para la eliminación de contaminantes tóxicos del agua (Jing et al., 2013). Dentro de los métodos fisicoquímicos, la adsorción es un método económico y efectivo para la eliminación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, sin embargo, la eficiencia de la adsorción depende completamente del adsorbente utilizado (Malaviya & Singh, 2011); (Jing et al., 2013).

Floculación-coagulación

El proceso de floculación-coagulación es uno de los procedimientos más utilizados en el tratamiento de agua, dado que su bajo costo, la simplificación y la alta eficiencia en la eliminación de contaminantes. Esta técnica se basa en la eliminación de la turbidez o el color del agua, lo cual se fundamenta en la creación de un precipitado de partículas pequeñas en el agua, y al agitarse suavemente, las partículas se unen y se forman partículas más grandes (Figura 2). Así, al incorporarse forman partículas de mayor tamaño, las cuales se sedimentan y facilitan su remoción (Tie et al., 2015); (Vasu & Joshua, 2013).



Figura 2. Proceso de Floculación-coagulación. Realizada en laboratorio

El agente coagulante utilizado es el factor más relevante, ya que este es el responsable de desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran cargadas eléctricamente y se estabilizan por una doble capa eléctrica. Uno de los coagulantes sintéticos más utilizados es el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, que a pesar de su rentabilidad y eficacia ha tenido algunas dificultades y desventajas a causa de que se puede llevar a cabo una reacción de este con la alcalinidad natural presente en el agua. Esto conduce a una reducción del pH y una baja eficacia en la coagulación en aguas frías (Vasu & Joshua, 2013). Además, estudios recientes han señalado la relación de sales de aluminio con la enfermedad de Alzheimer y demencia pre-senil. Otra desventaja de los coagulantes químicos, como las sales minerales de hierro y aluminio, es que pueden llegar a ser arrastrados durante la sedimentación de los lodos, convirtiéndolos en un problema ambiental, pues en altas dosis pueden llegar a ser tóxicos. Por lo que, se ha recurrido a la búsqueda de alternativas más amigables y seguras para la salud, así surgen la idea de utilización de coagulantes naturales, los cuales son componentes que por lo regular son sintetizados por especies vegetales, los cuales no representan un peligro ambiental o para la salud humana, un ejemplo de este tipo de especies es la semilla de *Moringa oleífera*, la cual es una opción viable y eficaz para remover los coloides de aguas crudas y contaminadas debido a que su estudio demuestra la capacidad de estas semillas para reducir los sólidos totales suspendidos, turbidez y color, que además por su origen natural no

genera residuos tóxicos en el agua tratada y es biodegradable (Vivas Saltos et al., 2022); (Azad & Hassan, 2020).

Materiales adsorbentes

Algunos de los métodos para tratamientos de aguas son los materiales adsorbentes. Estos pueden ser de origen mineral, orgánico o biológico, entre los cuales encontramos zeolitas, subproductos industriales, biomasa y materiales poliméricos. En la actualidad el estudio de materiales que no representen un riesgo para la salud humana y el ambiente es un factor muy importante a la hora de llevar a cabo el diseño de un material. Existen experimentos en torno al campo de hidrogeles aplicados al tratamiento de aguas residuales, los hidrogeles son materiales que además se han utilizado en áreas como química, salud, medicina, materiales de construcción, desarrollo de campos de petróleo y gas, agricultura y silvicultura. Además, los adsorbentes a base de hidrogeles funcionalizados con grupos hidroxilo, amino, carboxilo, etc. Han demostrado altas capacidades para eliminar contaminantes de las soluciones (Pal & Banat, 2015).

La versatilidad de los hidrogeles permite su aplicación en el campo de remediación ambiental en el tratamiento de aguas residuales y desechos acuosos de la industria contaminados con metales tóxicos. Puesto que se ha estudiado su capacidad de recuperación selectiva de metales en su forma iónica, sobre todo a bajas concentraciones del ion, ha demostrado ser un material con ventajas sobre técnicas ya existentes que además son altamente costosas y con bajo rendimiento a estas condiciones (Ramírez et al., 2016).

Moringa oleífera

La planta de *Moringa oleífera*, también llamada árbol de la vida, es actualmente conocida por sus múltiples beneficios y propiedades. La planta es

originaria del norte de la India, donde se describió por primera vez alrededor del año 2000 a.C. como hierba medicinal, actualmente es cosechada a lo largo de todo el trópico (Vasu & Joshua, 2013). La *Moringa oleifera* es una planta tropical perteneciente a la familia Moringaceae syns, que es una sola familia de arbustos con 14 especies conocidas, clasificado en el orden de los Brassicales, la especie que actualmente está bien documentada es la de *Moringa oleifera*, de acuerdo con Ndabigengesere y Narasiah, es la especie más abundante (Bhatia et al., 2007) (Ndabigengesere & Subba Narasiah, 1998). Las hojas de *Moringa oleifera* tienen grandes cualidades nutritivas. Según un estudio de la Food and Agriculture Organisation (FAO), el contenido de proteínas es del 27 % (tanto como el huevo y el doble de la leche). También tiene cantidades significativas de calcio (cuatro veces más que la leche), hierro, fósforo y potasio (tres veces más que los plátanos), así como, vitamina A (cuatro veces más que las zanahorias) y C (siete veces más que las naranjas), además sus semillas (Figura 3) son empleadas para ayudar a limpiar el agua sucia eliminando la turbidez entre un 80-99 % (Benítez, 2012). Es por ello que resulta de suma importancia el estudio de esta planta en diversas aplicaciones como en el tratamiento de aguas debido a su propiedad ya reportada como clarificante y coagulante natural (Mataka et al., 2006).

Algunos de los compuestos encontrados en el material vegetal son saponinas, flavonoides, esteroides, terpenoides, fenoles y triterpenos, así mismo, se encuentra una gran cantidad de ácidos grasos como el omega 9 (76 %) y ácidos grasos saturados (ácido palmítico, esteárico y araquídico) (12 %), se ha reportado que estos ácidos grasos no presentan toxicidad, además de que no afecta la actividad coagulante de las semillas, así mismo, se ha informado que podría traer beneficios la presencia de estos ácidos debido a que previenen significativamente la

formación de biopelículas de *S. aureus* (Villaseñor et al., 2018).



Figura 3. Semilla de *Moringa oleifera*.

Uso de la *Moringa oleifera* como coagulante

Desde principios de la década de 70's se ha evaluado la eficacia de la moringa para el tratamiento del agua (Kansal & Kumari, 2014). Por lo que, al paso de los años se ha ido utilizando este coagulante en diferentes condiciones, los mecanismos predominantes para la eliminación de contaminantes mediante *Moringa oleifera* son la adsorción, la neutralización de carga y las partículas/coloides desestabilizados (Villaseñor et al., 2018), estos son representados en la (Figura 4). Algunos estudios relacionados sobre la coagulación usando semillas de *Moringa oleifera* sugieren que el aumento de los valores de pH dentro del sistema acuoso da como resultado la liberación de grupos hidroxilo, que cambian el pH de la solución a valores alcalinos y permiten la desestabilización de coloides en algunos casos. Algunos autores han propuesto que los sitios de unión en las proteínas *Moringa oleifera* podrían estar relacionados con cambios de pH debido a la competencia entre H^+ / H_3O^+ y OH^- . En el caso de valores de pH bajos, H_3O^+ o H^+ , dependiendo del pH competirá con iones catiónicos metálicos o sitios de unión en proteínas *Moringa oleifera* o cualquier otro sitio activo disponible. Además, el efecto hidrofóbico entre las emisiones de *Moringa oleifera* y los coloides hidro-

fóbicos en las aguas residuales podría desempeñar un papel importante en los procesos de coagulación-floculación (Villaseñor et al., 2018).

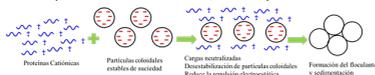


Figura 5. Ejemplos de cadenas de carbono y cianopolinos detectados en TMC-1.

La actividad de las semillas de Moringa oleifera como coagulante se debe a la presencia de proteínas catiónicas solubles en agua, dichas proteínas son dímeros catiónicos densamente cargados con un peso molecular de aproximado de 13 kDa y un valor de pH isoeléctrico de 10 y 11 (Bhatia et al., 2007). Por otra parte, Mataka et al., en 2006 sugiere que el mecanismo de coagulación puede ser mediante la adsorción y neutralización de cargas, o bien a través de la adsorción y el puente de partículas desestabilizadas entre las proteínas presentes (Camacho et al., 2017); (Mateus et al., 2018).

Efecto antimicrobiano de Moringa oleifera

Los beneficios del uso de la semilla de Moringa oleifera son múltiples, tanto que, se le ha atribuido propiedades antimicrobianas, esto debido a la presencia de la sustancia llamada "moringin" que es un isotiocianato de 4-(-L-ramnosiloxi)-bencilo (isotiocianato de glucomoringina; GMG-ITC) biológicamente activo, aunque no se puede concluir que la moringa sea el único mecanismo responsable de la actividad antimicrobiana, sin embargo, la propiedad antimicrobiana de esta planta es de suma importancia para aplicaciones en el tratamiento de agua. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el 80 % de enfermedades se trasmite principalmente por el agua (Van der Berg & Kuipers, 2022); (Zhang et al., 2023).

Un estudio recientemente (Kawabena et al., 2020) muestra la eficiencia del uso del polvo de las semillas de Moringa oleifera con filtración de arena

para el tratamiento de aguas grises; los resultados obtenidos mostraron un porcentaje de remoción de coliformes totales de 91 % y E. coli > 99 %, no obstante, el agua tratada se ha empleado en limpieza o en la descarga de inodoros (Kwabena Ntibrey et al., 2020).

Por otra parte, para algunas comunidades en desarrollo, los métodos convencionales de tratamiento de agua no son asequibles debido al alto costo y la falta de insumos, en 2019 Vunain et al., llevó a cabo el estudio de aguas residuales domésticas en la zona de Zomba en Malawi usando la semilla de Moringa oleifera, con la cual disminuyó la turbidez de 287 a 38.8 NTU (unidad nefelométrica de turbidez por sus siglas en inglés). De igual forma, se tuvo una reducción de la carga microbiana con especial potencial en especies tales como Salmonella y Shigella spp bacterias coliformes, hongos y diversas formas de microbios que se encuentran en las aguas residuales (Vunain et al., 2019).

Aplicaciones de la Moringa oleifera en el tratamiento de aguas

Mendoza et al., en 2000, reportaron el estudio comparativo de Moringa oleifera con respecto al uso de $Al_2(SO_4)_3$. Reportando que la dosis óptima para eliminar la turbidez de 49 NTU fue de 10 mg/L para la Moringa oleifera, mientras que para el $Al_2(SO_4)_3$ solo fueron necesarios 5 mg/L. Esta concentración si bien es mayor para dicha turbidez, el uso de Moringa oleifera es exitoso debido a que no genera residuos tóxicos que puedan presentar amenaza para el ser humano. Algunos autores atribuyen un mayor costo con el empleo de las semillas de Moringa oleifera debido a la utilización de éter de petróleo y alcohol isopropílico para la eliminación del aceite presente (Mendoza et al., 2000). Sin embargo, diferentes estudios demuestran que el contenido de proteínas es similar cuando se trabaja sin la extracción del aceite en comparación cuando se realiza dicho

procedimiento, es decir, el aceite no impide el proceso de floculación-coagulación (Camacho et al., 2017). La utilización de semillas de Moringa oleífera (Figura 5) dentro de los procesos de floculación-coagulación es eficaz, sin embargo, se puede dar la formación lenta de flóculos a tiempos de 60 a 90 min (Mateus et al., 2018).



Figura 5. Semilla de Moringa oleífera triturada.

Remoción de metales de aguas residuales

Otra de las aplicaciones en las que se ha involucrado el uso de la semilla de Moringa oleífera es en la remoción de metales pesados de aguas contaminadas. Uno de los metales normalmente encontrados en aguas residuales es el plomo (Pb), el cual es neurotóxico y una gran variedad de condiciones patológicas están asociadas con la intoxicación aguda por Pb, siendo la más característica el edema cerebral (Mataka et al., 2006). Si bien el uso de la semilla de Moringa oleífera presenta una eficaz utilización para la eliminación de Pb, existen otros metales pesados y metaloides peligrosos para la salud de los seres vivos, como por ejemplo: Cd, Cu, Fe, Mn y Zn. Al respecto, se ha reportado recientemente, un estudio en el que se compara el quitosano, Moringa oleífera y zeolita (coagulantes naturales) con sulfato de aluminio y cloruro férrico (FeCl₃) para la remoción de Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn de efluentes de extracción de aceite de palma (POME), mediante el proceso

de coagulación-floculación y sedimentación. En dicho estudio se empleó una concentración de 2000 mg/L de Moringa oleífera, con la cual se obtuvieron porcentajes de eliminación 86.87 % de Pb, 94.91 % de Cd y 91.31 % Mn (Jagaba et al., 2021).

Por otro lado, Hegazy et al., en 2021, realizaron un estudio para la eliminación de metales pesados presentes en agua contaminada mediante el empleo de semillas de Moringa oleífera y un subproducto de orujo de oliva, reportando la remoción de Fe²⁺ y Mn²⁺ en porcentajes de 80.5 % y 93 %, respectivamente (Hegazy et al., 2021). Remoción de colorantes de aguas residuales de la industria textil Aproximadamente entre el 10 % y el 15 % de los colorantes se liberan al ambiente durante el teñido de diferentes sustratos, tales como fibras textiles, sintéticas y naturales, plásticos, cuero, papel, aceites minerales, ceras e incluso (con tipos seleccionados) alimentos y cosméticos. Aun a concentraciones muy bajas del orden de 10 a 50 mg/L, los colorantes azoicos solubles en agua pueden hacer que las corrientes de desechos se vuelvan muy coloreadas, llegando a ser tóxicos, y en algunos casos, estos compuestos son cancerígenos y mutagénicos. Por ello, la importancia del tratamiento de aguas de la industria textil (Figura 6), ya que muchas de estas aguas desembocan en ríos o lagos locales y en algunos casos estas aguas son utilizadas como agua de riego en campos de siembra de productos de consumo humano. Uno de los tintes azoicos es el negro directo-19, en 2015, Tie et al., probaron la eficiencia de la coagulación y el rendimiento de la Moringa oleífera como coagulante y utilizó el coagulante comercial cloruro de polialuminio (PAC) con fines de comparación. Los resultados indicaron que un valor de pH más bajo en el intervalo de 5 a 9, es favorable para la eliminación. De negro directo-19 para los dos coagulantes, mientras que la temperatura óptima para los dos coagulantes es de 25 °C en el rango de temperatura de 10

a 55 °C. La eliminación de negro directo-19 aumentó con el aumento de las dosis de Moringa oleifera y PAC. Estos resultados muestran una clara eficacia de la semilla de Moringa oleifera sobre un coagulante químico comercial PAC, así mismo se destaca el uso de un coagulante natural y no tóxico como la Moringa oleifera (Tie et al., 2015).



Figura 6. Contaminación de agua por industria textil (Water Witness 2021).

Por su parte, Soliman et al., en 2019, realizaron un estudio en donde emplearon el residuo (cáscara) de semillas de Moringa oleifera como adsorbente verde, reportando que el residuo alcanzó una remoción del colorante rojo Congo del 85.3 %. Además, el residuo es viable para la remoción del colorante, considerándose como un adsorbente ecológico, económico y eficaz (Soliman et al., 2019).

Estos estudios han demostrado y brindado confianza respecto al uso de la semilla de Moringa oleifera como adsorbente natural de colorantes textiles y de otros sectores industriales, como el papel y plásticos. Esta constante búsqueda de adsorbentes más eficaces, pero sobre todo naturales o "verdes" se debe a que los efluentes coloreados de las aguas residuales de estas industrias llegan a mezclarse en los sistemas de aguas superficiales y subterráneas; pudiendo llegar a contaminar el agua potable, lo cual representa una amenaza para la salud humana, debido a que la mayoría de los tintes son tóxicos, mutagénicos y cancerígenos (Chen & Zhao, 2009), e incluso la liberación de aguas residuales en el ecosistema es una fuente alarmante de contaminación, eutrofi-

zación y de perturbaciones en la vida acuática (Lachheb et al., 2002).

Utilización de la Moringa oleifera en la BUAP

Actualmente, en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química del Instituto de Ciencias de la BUAP nos encontramos desarrollando diversos materiales del tipo hidrogel. Una vez obtenidos, añadimos el polvo de las semillas de Moringa oleifera para emplear este tipo de materiales dentro del tratamiento de aguas con diferentes contaminantes ambientales. Destacando los metales pesados y los colorantes, si bien ya se tiene conocimiento de materiales para la remoción de contaminantes, en el laboratorio de química ambiental, estamos comprometidos con el ambiente. Es por esto que trabajamos en busca de materiales que no representen un riesgo para los ecosistemas. Así mismo, estamos enfocados en la implementación de los principios de la química verde para la síntesis de nuevos materiales, además de la difusión y el impulso a la formación de vocaciones científicas, el pasado verano recibimos 3 estudiantes provenientes del Tecnológico de Matamoros, los cuales participaron en el verano de la investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2023, los estudiantes participaron en el desarrollo de hidrogeles a base de polímeros sintéticos y macromoléculas bio-basadas para la descontaminación de agua (Figura 7).

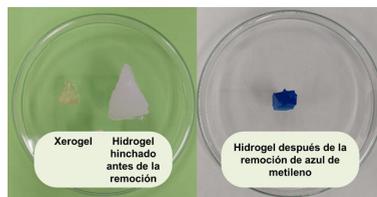


Figura 7. Hidrogeles a base de polímeros sintéticos y macromoléculas bio-basadas.

Conclusiones

El deterioro progresivo que se da en los mantos acuíferos y la contaminación del agua es un tema crítico, que los seres humanos deben afrontar. Para revertir esta amenaza es indispensable el desarrollo de materiales y metodologías eficientes, en los últimos años los métodos de coagulación-floculación, se han posicionado como técnicas fáciles de implementar, rentables y respetuosas con el medio ambiente siendo apreciados estos métodos como una forma para coadyuvar a la descontaminación del vital recurso. Se han utilizado diferentes adsorbentes, no obstante, se han destacado y preferido los obtenidos de forma natural, debido a que son ecológicos y tienen un menor costo, además de ser respetuosos con el ambiente, la Moringa oleífera es el candidato ideal en el momento de pensar en un adsorbente "verde" para el tratamiento de aguas debido a diversos aspectos como: ser biodegradable, reciclable, fácil manipulación y eficaz en la adsorción de diversos contaminantes, la semilla de Moringa oleífera ha demostrado ser un coagulante eficiente en el tratamiento de aguas residuales por el método de coagulación-floculación, acompañado de otras técnicas que ayudan en la limpieza y desinfección de las aguas, hasta llegar a un punto en que estás logran ser potables. En contraparte, su uso está limitado localmente, por lo que su potencial aplicación puede ser en países en desarrollo o zonas de alta marginación, que carecen de agua potable y que son susceptibles a enfermedades causadas por el consumo de agua, con patógenos dañinos. Lo que permite que el uso de esta semilla sea una eficiente alternativa en la eliminación de turbidez, además de llegar a hacer un agente antimicrobiano, siendo de gran ayuda en este tipo de comunidades, debido a que se trata de una planta accesible y un proceso de limpieza simple.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Química Ambiental del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por proporcionar las facilidades necesarias para la realización de la estancia posdoctoral, al CONAHCYT por la beca otorgada 863187.

Referencias

- Abu-Danso, E., Peräniemi, S., Leiviskä, T., & Bhatnagar, A. (2018). Synthesis of S-ligand tethered cellulose nanofibers for efficient removal of Pb(II) and Cd(II) ions from synthetic and industrial wastewater. *Environmental Pollution*, 242, 1988–1997. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.044>
- Azad, Md. S., & Hassan, M. S. (2020). Importance of *Moringa Oleifera* for Wastewater Treatment: A Review. *International Journal of Sustainable Energy Development*, 8(1), 415–420. <https://doi.org/10.20533/ijsted.2046.3707.2020.0049>
- Benítez, W. M. (2012). APROVECHAMIENTO POSCOSECHA DE LA MORINGA (*Moringa oleifera*). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 171–174.
- Bhatia, S., Othman, Z., & Ahmad, A. L. (2007). Coagulation–flocculation process for POME treatment using *Moringa oleifera* seeds extract: Optimization studies. *Chemical Engineering Journal*, 133, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.01.034>
- Camacho, F. P., Sousa, V. S., Bergamasco, R., & Ribau Teixeira, M. (2017). The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 313, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>
- Chen, H., & Zhao, J. (2009). Adsorption study for removal of Congo red anionic dye using organo-attapulgite. *Adsorption*, 15(4), 381–389. <https://doi.org/10.1007/s10450-009-9155-z>
- Cheng, N., Wang, B., Wu, P., Lee, X., Xing, Y., Chen, M., & Gao, B. (2021). Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. *Environmental Pollution*, 273, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116448>
- Denchak, Melissa., (2023). Water Pollution: Everything You Need to Know. [Figura] Recuperado de <https://www.nrcd.org/stories/water-pollution-everything-you-need-know#whatis>
- Hegazy, I., Ali, M. E. A., Zaghlool, E. H., & Elsheikh, R. (2021). Heavy metals adsorption from contaminated water using moringa seeds/ olive pomace byproducts. *Applied Water Science*, 11(6), 95. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01421-5>
- Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Baloo, L., Ghaleb, A. A. S., Lawal, I. M., Abubakar, S., Al-dhawi, B. N. S., Almahbashi, N. M. Y., & Umaru, I. (2021). Degradation of Cd, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn by *Moringa-oleifera*, zeolite, ferric-chloride, chitosan and alum in an industrial effluent. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.016>
- Jing, G., Wang, L., Yu, H., Amer, W. A., & Zhang, L. (2013). Recent progress on study of hybrid hydrogels for water treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 416, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.09.043>
- Kansal, S. K., & Kumari, A. (2014). Potential of *M. oleifera* for the treatment of water and wastewater. *Chemical Reviews*, 114(9), 4993–5010. <https://doi.org/10.1021/cr400093w>
- Kwabena Ntibrey, R. A., Kuranchie, F. A., & Gyasi, S. F. (2020). Antimicrobial and coagulation potential of *Moringa oleifera* seed powder coupled with sand filtration for treatment of bath wastewater from public senior high schools in Ghana. *Heliyon*, 6(8), e04627. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04627>
- Lachheb, H., Puzenat, E., Houas, A., Ksibi, M., Elaloui, E., Guillard, C., & Herrmann, J.-M. (2002). Photocatalytic degradation of various types of dyes (Alizarin S, Cro-

cein Orange G, Methyl Red, Congo Red, Methylene Blue) in water by UV-irradiated titania. *Applied Catalysis B: Environmental*, 39(1), 75–90. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(02\)00078-4](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(02)00078-4)

Malaviya, P., & Singh, A. (2011). Physicochemical Technologies for Remediation of Chromium-Containing Waters and Wastewaters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(12), 1111–1172. <https://doi.org/10.1080/10643380903392817>

Masumoto, T., Amano, H., Otani, S., Kamijima, M., Yamazaki, S., Kobayashi, Y., & Kurozawa, Y. (2022). Association between prenatal cadmium exposure and child development: The Japan Environment and Children's study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 243, 113989. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.113989>

Mataka, L. M., Henry, E. M. T., Masamba, W. R. L., & Sajidu, S. M. (2006). Lead remediation of contaminated water using *Moringa Stenopetala* and *Moringa oleifera* seed powder. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 3(2), 131–139. <https://doi.org/10.1007/BF03325916>

Mateus, G. A. P., Paludo, M. P., dos Santos, T. R. T., Silva, M. F., Nishi, L., Fagundes-Klen, M. R., Gomes, R. G., & Bergamasco, R. (2018). Obtaining drinking water using a magnetic coagulant composed of magnetite nanoparticles functionalized with *Moringa oleifera* seed extract. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4084–4092. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.050>

Mendoza, I., Fernández, N., Ettiene, G., & Díaz, A. (2000). Uso de la *Moringa Oleifera* como Coagulante en la Potabilización de las Aguas. *Ciencia*, 8(2), Article 2. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/articulo/view/9050>

Mishra, B., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., & Gautam, A. (2021). Water Security in a Changing Environment: Concept, Challenges and Solutions. *Water*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>

Ndabigengesere, A., & Subba Narasiah, K. (1998). Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, 32(3), 781–791. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00295-9)

Okpara, E. C., Olatunde, O. C., Wojuola, O. B., & Onwudiwe, D. C. (2023). Applications of Transition Metal Oxides and Chalcogenides and their Composites in Water Treatment: A review. *Environmental Advances*, 11, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100341>

Pal, P., & Banat, F. (2015). Removal of Contaminants from Industrial Lean Amine Solvent Using Polyacrylamide Hydrogels Optimized by Response Surface Methodology. *Adsorption Science & Technology*, 33(1), 9–24. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.33.1.9>

Pang, X., Sellaoui, L., Franco, D., Netto, M. S., Georgin, J., Luiz Dotto, G., Abu Shayeb, M. K., Belmabrouk, H., Bonilla-Petriciolet, Adrian., & Li, Z. (2020). Preparation and characterization of a novel mountain soursop seeds powder adsorbent and its application for the removal of crystal violet and methylene blue from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 391, 123617. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123617>

Rahmatpour, A., Soleimani, P., & Mirkani, A. (2022). Eco-friendly poly(vinyl alcohol)/partially hydrolyzed polyacrylamide/graphene oxide semi-IPN nanocomposite hydrogel as a reusable and efficient adsorbent of cationic dye methylene blue from water. *Reactive and Functional Polymers*, 175, 105290. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105290>

Ramirez, A., Benítez, J. L., Rojas de Astudillo, L., & Rojas de Gáscue, B. (2016). Ma-

teriales polimeros de tipo hidrogeles: Revisión sobre su caracterización mediante ftir, dsc, meb y met. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108–130.

Soliman, N. khamis, Moustafa, A. F., Aboud, A. A., & Halim, K. S. A. (2019). Effective utilization of Moringa seeds waste as a new green environmental adsorbent for removal of industrial toxic dyes. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1798–1808. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.010>

Tie, J., Jiang, M., Li, H., Zhang, S., & Zhang, X. (2015). A comparison between Moringa oleifera seed presscake extract and polyaluminum chloride in the removal of direct black 19 from synthetic wastewater. *Industrial Crops and Products*, 74, 530–534. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.004>

van der Berg, Jorrita, & Kuipers, S. (2022). The antibacterial action of Moringa oleifera: A systematic review. *South African Journal of Botany*, 151, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.034>

Vasu, V., & Joshua, R. (2013). Characteristics of stored rain water and its treatment technology using Moringa Seeds. *Intl. J. of Life Sciences Biotech. and Pharma Research*, 2, 155.

Villaseñor, D., Astudillo-Sanchez, P., Real, J., & Bandala, E. (2018). Wastewater treatment using Moringa oleifera Lam seeds: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.017>

Vivas Saltos, H. T., Calderón Pincay, J. M., Mendoza Cedeño, L. G., & Cedeño Zambrano, J. G. (2022). Remoción de contaminantes en aguas residuales mediante el polielectrolito catiónico extraído de las semillas de Moringa oleifera. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(2), 84–96.

Vunain, E., Masoamphambe, E. F., Mpeketula, P. M. G., Monjerezi, M., & Etale, A. (2019). Evaluation of coagulating efficiency and water borne pathogens reduction capacity of Moringa oleifera seed powder for treatment of domestic wastewater from Zomba, Malawi. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103118. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103118>

Water witness. (2021). How Fair is Fashion's Water Footprint?. [Figura] Recuperado de <https://waterwitness.org/news-events/2021/7/12/how-fair-is-fashion-water-footprint>

Zhang, L., Li, X., Chen, S., Guana, J., Guoa, Y., & Yub, W. (2023). 3D chitosan/GO/ZnO hydrogel with enhanced photocorrosion-resistance and adsorption for efficient removal of typical water-soluble pollutants. *Catalysis Communications*, 176, 106627. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106627>