

Tratamiento de aguas vía floculación usando materiales ambientalmente amigables: Ensayos en México

Water treatment via flocculation using environmentally friendly materials: Trials in Mexico

H. Mael Gálvez-Limón¹, Diana V. Félix-Alcalá¹, M. Priscila Quiñonez-Angulo², Mónica G. Aguilar-Aguirre³, Carmen Aida Ochoa-Rivera⁴, Lorenzo A. Picos-Corrales^{1,5,*}

RESUMEN

Actualmente, la contaminación de los cuerpos de agua y su relación con los riesgos de la salud humana es uno de los principales problemas alrededor del mundo. Algunos procesos industriales y la disposición inapropiada de aguas residuales han incrementado los niveles de contaminación de las fuentes de agua, depositando diferentes contaminantes (biomasas, pesticidas, fármacos residuales, iones de metales pesados). En México se descargan grandes cantidades de aguas residuales sin tratar. Relacionado con el tratamiento de aguas, la floculación es uno de los enfoques más usados para la remoción de sólidos suspendidos en el agua. Por ello, en este artículo de revisión se aborda un panorama general sobre tratamiento de aguas usando floculantes ambientalmente amigables y se resumen algunos ensayos con muestras de agua de río y aguas residuales, los cuales se han llevado a cabo en México.

ABSTRACT

Currently, the contamination of water bodies and its relationship with human health risks is one of the main problems around the world. Some industrial processes and the inappropriate disposal of wastewater have increased the contamination levels of water sources, depositing different pollutants (biomass, pesticides, residual drugs, heavy metal ions). In Mexico, large quantities of untreated wastewater are discharged. Regarding water treatment, flocculation is one of the most used approaches for the removal of suspended solids from water. Therefore, this review addresses a general overview on water treatment using environmentally friendly flocculants and summarizes some trials with samples of river water and wastewater, which have been carried out in Mexico.

Recibido: noviembre 2020

Aceptado: octubre 2021

Publicado: noviembre 2021

Palabras clave:

Tratamiento de aguas, floculación, biopolímeros, remoción de turbidez, contaminantes emergentes.

Keywords:

Water treatment, flocculation, biopolymers, turbidity removal, emerging contaminants.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la presente pandemia (COVID-19) se ha confirmado que el agua es la sustancia clave para la supervivencia de los seres humanos. La remediación y reúso del agua son de las grandes tareas a cumplir en la época actual. El aumento de la población y la falta de sustentabilidad en el manejo del agua han puesto a los recursos hídricos bajo la lupa a nivel mundial (Makarigakis y Jiménez-Cisneros, 2019). Así, la demanda de agua limpia y la generación de aguas residuales aumenta continuamente. En algunas regiones, un volumen importante de aguas residuales sin tratamiento es depositado sobre las fuentes naturales de agua (SEMARNART, 2016). Además, las actividades humanas (como la agricultura, minería, industria, entre otras) han originado la liberación de diversos contaminantes tóxicos sobre los cuerpos de agua subterráneos y superficiales (Makarigaki y Jiménez-Cisneros 2019). En años recientes, los resultados de in-

*Autor para correspondencia: Lorenzo A. Picos-Corrales

Dirección de correo electrónico: lorenzo.picos.c@uas.edu.mx

¹Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80013, Culiacán, Sinaloa, México.

²Centro de Graduados e Investigación en Química, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, 22000, Tijuana, B.C., México.

³Secretaría de Transparencia y Rendición de Cuentas del Gobierno del Estado de Sinaloa, 80000, Culiacán, Sinaloa, México.

⁴Radio Universidad Autónoma de Sinaloa, sección Nueva Cultura del Agua, 80030, Culiacán, Sinaloa, México.

⁵Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80013, Culiacán, Sinaloa, México.

investigaciones han evidenciado la importancia del monitoreo y remoción de contaminantes emergentes (fármacos, pesticidas, productos químicos industriales y de cuidado personal, otros) (Vargas-Berrones y col., 2020; Morin-Crini y col., 2021), pues su presencia en el agua superficial y subterránea ha sido tradicionalmente considerada poco significativa en términos de distribución y/o concentración, por lo que los límites permisibles no están regulados por las leyes de los gobiernos.

De acuerdo a la literatura, en el caso de los pesticidas organoclorados, su persistencia y riesgo a la salud humana han sido comprobados (Rodríguez y col., 2017). Por otra parte, para los metales pesados es muy conocido que existe un riesgo considerable para la salud asociado a la bioacumulación de estas sustancias en los seres humanos (Stuart y col., 2012). El impacto ambiental y de salud pública de los contaminantes emergentes siguen siendo exhaustivamente estudiados (Stuart y col., 2012; EPA, 2017). Lo anterior se debe a que estos compuestos residuales podrían afectar los ecosistemas y estar relacionados con problemas de salud humana graves (Bilal y col., 2019). Tal es el caso de los fármacos que llegan a los cuerpos de agua, estos pueden afectar la capacidad de los microorganismos para metabolizar las fuentes de carbono, es decir, estos químicos afectan la diversidad metabólica de la comunidad del suelo (Pino-Otín y col., 2017). Similarmente, en los cuerpos de agua, el crecimiento de la población de algunas especies de peces puede verse mermado por los contaminantes emergentes (Pérez-Coyotl y col., 2019), y como consecuencia, la salud de los seres humanos puede ser

afectada a través de la cadena alimentaria (Hermosillo-Ochoa y col., 2021).

En los últimos años se ha detectado que las plantas tratadoras de agua residual, ineficientes en la remoción de moléculas pequeñas, y los efluentes domésticos y de hospitales no tratados son los principales distribuidores de fármacos residuales y productos de cuidado personal (Li y col., 2017). Por otra parte, la agricultura es uno de los principales responsables de la propagación de contaminantes debido a los estabilizantes, pesticidas y fertilizantes empleados excesivamente, además del uso de aguas residuales para riego de cultivos (Evans y col., 2019). Mientras que la industria y minería son las principales fuentes de contaminación por metales pesados (Boamah y col., 2015). Entre los ejemplos de contaminación de cuerpos de agua en diferentes regiones del mundo está la contaminación por metales pesados en agua de río en la India (Patel y col., 2018) y Sudáfrica (Addo-Bediao y col., 2018), nutrientes en agua de río en China (Strokal y col., 2016), la presencia de fármacos y hormonas en agua de río en Brasil (Ide y col., 2017), contaminación del mar Mediterráneo por pesticidas (Novillo y col., 2017), así como la presencia de micro plástico en agua de río en Sudáfrica (Reynolds y Ryan, 2018). En el caso de México, los altos niveles de turbidez en agua de río usada en plantas potabilizadoras y las aguas residuales agrícolas no tratadas representan un gran problema (Pérez-Espejo y col., 2011), como se ilustra en la Figura 1. Existen ríos y arroyos notablemente afectados por fertilizantes y pesticidas acarreados por aguas residuales agrícolas que son producidas debido al uso descontrolado del agua en algunos sistemas de



Figura 1. Imágenes del Río Humaya (imagen superior derecha) y aguas residuales agrícolas (imagen superior izquierda) y de granjas acuícolas (imagen inferior) en el estado de Sinaloa.

riego (Picos-Corrales y col., 2020). En estudios específicos en el sur del país, se ha relacionado el padecimiento de cáncer en mujeres como resultado de las concentraciones de pesticidas en fuentes de agua (Rodríguez y col., 2017). Similarmente, el manejo inapropiado de aguas residuales domésticas ha llevado al deterioro de ecosistemas, teniendo como ejemplo la Presa Madín en el centro del país (Pérez-Coyotl y col., 2019). Por ello, se ha incrementado el monitoreo de contaminantes en fuentes de agua, evaluando la presencia de sustancias orgánicas en agua superficiales y subterráneas (Félix-Cañedo y col., 2013; Lesser y col., 2018), fármacos en aguas residuales de hospitales (Calderón y col., 2018), y disruptores endocrinos en humedales (Díaz-Torres y col., 2013). Particularmente para el estado de Sinaloa, se ha investigado los niveles de contaminación por pesticidas organoclorados y organofosforados en drenajes agrícolas (García de la Parra y col., 2012), así como el efecto de estos compuestos tóxicos cuando son bioacumulados por roedores que habitan áreas agrícolas (Pérez-González y col., 2017.). Además, un estudio sobre la laguna Navachiste-Macapule (Culiacán, estado de Sinaloa) reportó la detección de metoxicloro, endrina y heptacloro, los cuales son pesticidas organoclorados cuyo uso está prohibido en México (Montes y col., 2012). Por otra parte, en algunos estudios se han detectado niveles elevados de manganeso en agua del Río Humaya en Culiacán, estado de Sinaloa (Ruelas-Leyva y col., 2017), el cual es una fuente para plantas potabilizadoras.

En base a lo anterior y con el objetivo de divulgar los esfuerzos de grupos de investigación, en este artículo se revisan estudios de biofloculación usando muestras de agua de río y agua residual realizados en zonas diferentes de México. Para ello, se presentan resultados de experimentos usando quitosano, almidón, goma guar, mucilago de nopal y Moringa Oleífera. Principalmente, se reporta la remoción de turbidez, color y metales del agua.

2. MÉTODOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES: FLOCULACIÓN

El tratamiento de aguas se logra mediante la combinación de métodos que permiten la remoción de los contaminantes, procesos tales como la coagulación, la floculación, filtración, oxidación, la adsorción con carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, entre otros (Renault y col., 2009; Ruelas-Leyva y col., 2017). Cada metodología es distinta y permite remo-

ver diferentes tipos de contaminantes, por ejemplo: en base a las normas oficiales mexicanas (NOM-127-SSA1-1994), el intercambio iónico y ósmosis inversa permiten remover metales (Pb, Al, Cu, Cr, Fe, Mn), cloruros, sulfatos, cianuros; los métodos de oxidación suelen remover Fe y Mn, materia orgánica y compuestos fenólicos; la adsorción por carbón activado se utiliza en la remoción de As, materia orgánica, compuestos fenólicos y algunos plaguicidas; el método convencional, que involucra la coagulación-floculación y la posterior precipitación y filtración, remueve contaminantes que producen turbiedad, color y olor, además de metales como As, nitratos y nitritos, entre otros.

La coagulación-floculación convencional se destaca por su simplicidad tecnológica y un tiempo corto de proceso, de fácil control y mantenimiento, lo cual lo hace un método económicamente ventajoso; asimismo, es adaptable a diferentes formatos de tratamiento como la clarificación primaria, pretratamiento, y/o tratamiento final y a elevadas cargas de contaminantes. Dicho proceso permite la remoción de contaminantes usando sustancias coagulantes [por ejemplo, Fe_2Cl_3 o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] y floculantes [poli(cloruro de aluminio) o productos de poli(acrilamida)] (Lichtfouse y col., 2019). En la etapa de coagulación, el coagulante neutraliza las fuerzas que mantienen separadas a las partículas suspendidas en el agua, lo cual promueve la aglomeración (Andía-Cárdenas, 2000; Nharingo y Moyo, 2016). Posteriormente, se adiciona el floculante para aumentar la eficiencia del proceso, llevando a la formación de flóculos. De manera consecuente, los flóculos más pequeños colisionan entre sí aumentando su tamaño y peso, desencadenando una sedimentación rápida de las partículas (Prakash y col., 2014; Nharingo y Moyo, 2016). Actualmente, mediante el uso de floculantes poliméricos, principalmente polímeros catiónicos, es posible llevar a cabo la floculación directa. Los floculantes poliméricos poseen funciones duales de coagulación y floculación, es decir, neutralizan cargas negativas y unen las partículas desestabilizadas para formar flóculos. Así, con el uso de estos materiales se evita el uso de coagulantes inorgánicos (Lichtfouse y col., 2019). Es importante remarcar que, durante el proceso de floculación, la remoción de contaminantes puede ser conducida a través de cuatro mecanismos diferentes: adsorción y neutralización de la carga, floculación de barrido, compresión de la doble capa, y puente de adsorción. El mecanismo de adsorción y neutralización de la carga, el floculante se

une a las partículas coloidales con carga opuesta y las neutraliza llevando a la floculación. Este mecanismo depende de la cantidad estequiométrica de la concentración de coloides y la cantidad óptima de floculante, es decir se requiere una dosis óptima de floculante para evitar la redispersión (Nharingo y Moyo, 2016). En la floculación de barrido las partículas coloidales desestabilizadas pueden ser atrapadas y barridas en un precipitado amorfo; en este caso, la remoción de partículas evoluciona progresivamente con el incremento del floculante (Andía-Cárdenas, 2000). El mecanismo de compresión de la doble capa resulta de la adición de un electrolito en un sistema coloidal, lo que causa un incremento en de la fuerza iónica en la capa difusa y disminuye la influencia que ejercen las partículas entre sí, lo cual origina la desestabilización de los coloides seguido de la floculación. Este modelo no aplica para el tratamiento de aguas residuales (Andía-Cárdenas, 2000; Nharingo y Moyo, 2016). En el mecanismo del puente de adsorción, cuando se agregan pequeñas dosis de floculante a los coloides, las cadenas de polímero se adsorben en las partículas y una cadena individual se une a varias partículas formando agregados complejos de contaminantes, es decir el polímero favorece la formación del flóculo; en este mecanismo de floculación se requiere una dosis óptima de polímero para alcanzar la eficiencia máxima (Nharingo y Moyo, 2016).

Aunque los coagulantes y floculantes convencionales son productos químicos baratos, eficientes, disponibles y fáciles de usar, su utilización produce ciertos inconvenientes como la contaminación del agua por metales y la producción de grandes cantidades de lodos tóxicos (Lichtfouse y col., 2019). Esto se debe a que las sustancias comúnmente empleadas son inorgánicas y orgánicas no biodegradables (Renault y col., 2009). Por ello, en la última década ha aumentado significativamente el número de estudio sobre floculantes ambientalmente amigables (quitosano, alginato de sodio, almidón, celulosa, mucílagos, Moringa oleífera, otros) obtenidos a partir de fuentes renovables, los cuales podrían ser opciones viables para el tratamiento de aguas (Nharingo y Moyo, 2016; Crini y col., 2019; Picos-Corrales y col., 2020).

3. MATERIALES AMBIENTALMENTE AMIGABLES COMO FLOCULANTES

Los floculantes ambientalmente amigables, principalmente biopolímeros, son de gran interés por su

biocompatibilidad y biodegradabilidad, además que no producen contaminantes secundarios y los sedimentos generados en el proceso de floculación pueden ser tratados como biomasa (Renault y col., 2009; Lee y col., 2014; Liu y col., 2020). Estos floculantes ambientalmente amigables son capaces de remover diversos contaminantes por mecanismos diferentes ya que este tipo de macromoléculas poseen una variedad de grupos funcionales tales como amino, carboxilos e hidroxilos (Özacar y Şengil, 2003). A continuación se presentan las estructuras químicas relacionadas con los siguientes materiales: quitosano, almidón, Moringa oleífera, alginatos y celulosa (ver Figura 2).

3.1. Quitosano

El quitosano es un polímero lineal compuesto aleatoriamente por D-glucosamine y N-acetil-D-glucosamina unidas por un enlace glucosídico β -(1-4) (grupos funcionales $-\text{NH}_2$ y $-\text{OH}$), es derivado de la desacetilación parcial de la quitina, la cual es el segundo biopolímero natural más abundante en el planeta y su fuente principal de obtención es de crustáceos (ej. camarón y cangrejo) (Szyguła y col., 2009). El quitosano es insoluble en agua o en disolventes orgánicos pero es soluble en ácidos diluidos (ej. CH_3COOH y HCl), pues los grupos amino libres se protonan volviéndolo completamente soluble (Szyguła y col., 2009). Algunos experimentos han demostrado la alta eficiencia del quitosano en la remoción de turbidez y iones de metales pesados produciendo un sedimento más compacto (menor porcentaje de agua retenida) en comparación con floculantes comerciales (Ruelas-Leyva y col., 2017; Picos-Corrales y col., 2020).

3.2. Almidón

El almidón es un polisacárido, formado por unidades de glucosa, que se encuentra presente en vegetales, frutas y granos (ej. papa, arroz y plátano). Este polímero natural consiste en una mezcla de glucanos (grupo funcional $-\text{OH}$), ya que cada partícula de almidón involucra principalmente amilosa (fracción menor) y amilopectina, donde la amilosa es un polímero lineal [enlace glucosídico α -(1,4)], mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado [enlaces glucosídicos α -(1,4) y α -(1,6)] (Ortega-Domínguez y col., 2010). En tratamiento de aguas, se ha observado que el uso del almidón modificado es una alternativa que permite disminuir el consumo de polímeros sintéticos comúnmente utilizados en el proceso de coagulación y floculación (polielectrolitos),

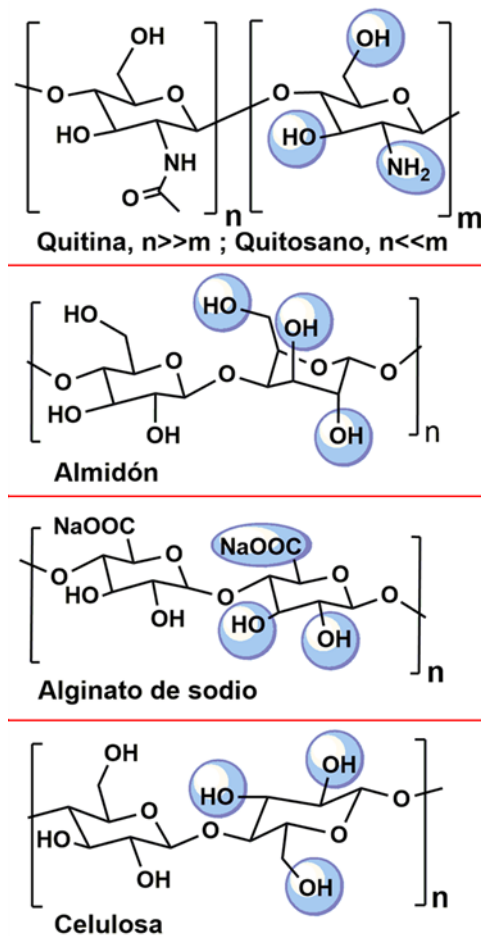


Figura 2. Unidades repetitivas de algunos polímeros ambientalmente amigables.

reduciendo así los costos en plantas tratadoras (Laines-Canepa y col., 2008). Además, el almidón y sus derivados han resultado eficientes en la floculación de partículas minerales ultrafinas e iones de hierro (Dogu y Arol, 2004)

3.3. *Moringa oleífera*

La *Moringa oleífera* es un árbol originario del Himalaya, el cual alcanza una altura de hasta 12 m. Es resistente a climas secos y de fácil adaptabilidad, lo que permite aprovechar su potencial agronómico. Esta planta ha presentado múltiples aplicaciones en áreas como la alimenticia, medicina botánica, tratamiento de aguas, entre otros (Sánchez-Peña y col., 2013). Para tratamiento de aguas, se ha observado que del proceso de extracción de aceites de las semillas de *Moringa oleífera* se obtiene una proteína

catiónica con la particularidad de tener propiedades coagulantes y floculantes. Aproximadamente, un 40% del peso de la semilla corresponde a grasas que no poseen propiedades coagulantes. Cabe señalar que dichos residuos lipídicos no resultan tóxicos para los seres humanos (Mendoza y col., 2000). Este material, además de ser amigable con el medio ambiente y tener una alta eficiencia en la etapa de clarificación del agua, presenta propiedades desinfectantes capaces de eliminar eficazmente algunos microorganismos presentes en agua como coliformes totales y fecales (Dogu y Arol, 2004).

3.4. Alginatos

El alginato es un polisacárido hidrofílico aniónico extraído de las algas pardas y es uno de los materiales naturales biosintetizados más abundantes. Este biopo-

límero está compuesto por ácido β -D-manurónico y unidades de ácido α -L-gulurónico unidas mediante enlaces $\beta(1-4)$ que puede formar hidrogeles fácilmente por simple mezcla con cationes divalentes. El alginato de sodio (SA) es un polielectrolito lineal soluble en agua (Helmiyati y Aprilliza, 2017), pues el ácido algínico contiene los grupos funcionales $-\text{COOH}$ y $-\text{OH}$ (Ikeda y col., 2000). Los hidrogeles de alginatos cuando se mezclan con cationes multivalentes mediante la generación de puentes iónicos entre las cadenas de polímero temperatura ambiente, resultando excelentes candidatos como adsorbentes de diferentes contaminantes (Al-Sakkari y col., 2020; Piras y Smith, 2020). Derivado de sus capacidades gelificantes, el SA puede utilizarse con iones de calcio para tratar aguas turbias (Devrimci y col., 2012).

3.5. Celulosa

La celulosa, generalmente sintetizada por las plantas, es el polisacárido más abundante y constituye el mayor porcentaje de los biopolímeros en la tierra. Su estructura es lineal y está formada por 2000 a 14000 unidades de glucosa unidas por enlace glucosídico $\beta(1,4)$, interactuando entre sí por enlaces de hidrógeno. Es un biopolímero insoluble en agua que posee regiones con un alto ordenamiento (cristalinas), y otras donde el grado de ordenamiento es bajo. Presenta varias formas cristalinas, dando lugar al polimorfismo de la celulosa (Gardner y col., 2008). Este polisacárido de fórmula $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_x$ presenta tres grupos $-\text{OH}$ en cada una de las unidades estructurales. Los materiales sustentables a base de derivados de la celulosa han adquirido un gran interés en su aplicación en el tratamiento de aguas (Mohammed y col., 2018; Nasrollahzadeh y col., 2020).

4. EXPERIMENTOS DE BIOFLOCULACIÓN EN MÉXICO

4.1. Tratamiento de agua de ríos

En México, los cuerpos de agua reciben aproximadamente el 70% del caudal tratado en las plantas tratadoras de aguas residuales. Dentro de todos los sitios de descarga, alrededor del 53% del agua se descarga en ríos, el 15% en arroyos, el 10% en desagües o colectores, el 9% en canales, el 4% en mares, golfos u océanos, mientras que el resto se canaliza hacia estuarios, acuíferos, embalses o represas, entre otros (Raynal-Villasenor, 2020; CONAGUA, 2015a; Anda

y col., 2016). Además de los efluentes de las plantas tratadoras convencionales, algunos efluentes de agua residual agrícola no tratada son descargados directamente en algunos ríos, los cuales suelen ser una de las principales fuentes de abastecimiento para el agua de consumo humano (Picos-Corrales y col., 2020). A pesar del proceso de potabilización, la remoción de compuestos orgánicos presentes en agua de río es un problema complejo. Para el caso de México, la NOM-127-SSA1-1994 establece los parámetros de calidad que debe reunir el agua para uso y consumo humano, donde el límite superior permisible para la turbidez y el color del agua se encuentra en 5 NTU (unidades nefelométricas de turbiedad) y 20 UC (unidades de color en la escala de platino-cobalto), respectivamente; mientras que la mayor concentración permitida para metales y compuestos orgánicos depende de la sustancia en cuestión (ej. $\text{Al}=0.2$ mg/L, $\text{Cu}=2$ mg/L, $\text{Cd}=0.005$ mg/L, $\text{DDT}=0.001$ mg/L, lindano=0.002 mg/L, entre otros). Además, el agua para uso doméstico debe presentar una ausencia de *E. coli* o coliformes fecales.

Debido a la problemática descrita anteriormente, es importante mencionar algunos estudios realizados en México sobre la eficiencia del proceso de floculación usando floculantes ambientalmente amigables que permitan una adecuada remoción de contaminantes comunes y emergentes presentes agua de río. Por ejemplo, en un estudio hecho en el estado de Tabasco se trabajó con muestras del río Carrizal (70 NTU y 85 UC). Para la prueba de jarras se usó una mezcla de almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y sulfato de aluminio grado comercial. La dosis óptima para el tratamiento fueron 2 mg/L de yuca y 28 mg/L de sulfato de aluminio, logrando una eficiencia del 94% en la remoción del color y un 97.9 % en reducción de la turbidez (Solís y col., 2012). En el caso del estado de Sinaloa, un estudio comparativo evaluó la efectividad del quitosano y la harina de semilla de Moringa Oleífera (MOSF, por sus siglas en inglés) para reducir la turbidez y concentración de metales pesados en muestras de agua del Río Humaya. Algunas muestras de agua cruda presentaron turbidez de hasta 70 NTU, además la concentración del plomo (0.0272 mg/L) y el manganeso (0.2164 mg/L) sobrepasaron los límites permisibles establecidos para el agua potable en México (NOM-127-SSA1-1994; $\text{Pb}=0.01$ mg/L y $\text{Mn}=0.15$ mg/L). Las dosis óptimas de quitosano y MOSF para disminuir la turbidez (~90%) fueron de 1 y 5 mg/L, respectivamente. Ambos biofloculantes removieron

un 95% de Pb, la MOSF fue capaz de reducir el Mn hasta en un 90%, a diferencia del quitosano que solo redujo cerca del 25% de este metal. Así, una dosificación adecuada permitió obtener niveles de contaminación por debajo de los límites establecidos por el Gobierno Mexicano (Ruelas-Leyva y col., 2017). Este mismo grupo de investigación realizó un estudio comparativo entre quitosano y harina de paja de frijol (BSF, por sus siglas en inglés) como floculantes. En dicho estudio se registraron valores de turbidez de hasta 32 NTU para el Río Tamazula y 29 NTU para el Río Humaya; donde el quitosano destacó como el biofloculante más eficaz en la remoción de sólidos para los ríos Tamazula (90%, turbidez final =3) y Humaya (76%, turbidez final =7); en cambio, la BSF redujo la turbidez en 43% y 27%, respectivamente para cada río. Por otro lado, el estudio de remoción de metales se centró en hierro y manganeso, cuya concentración era considerablemente cercana a los límites permisibles; el Río Tamazula presentaba una concentración de 0.238 mg/L de Fe y 0.095 mg/L de Mn; mientras que el Río Humaya tenía concentraciones de 0.190 mg/L de Fe y 0.080 mg/L de Mn. Nuevamente, los resultados demostraron que el quitosano fue más eficaz que el BSF, ya que para el Río Tamazula fue capaz de reducir la concentración de Fe en 78% y en 89% para el Mn; y para el Río Humaya se redujo en 74% para Fe y 81% para Mn (Picos-Corrales y col., 2020). En otro estudio realizado en el estado de Sinaloa se trató agua de río usando quitosano para la remoción de color de agua de río que contenía una concentración preestablecida del fármaco tetraciclina (10 mg/L), simulando contaminación de ríos por fármacos residuales (contaminantes emergentes). En los resultados se observó que una concentración mucho menor de quitosano (0.5 mg/L) llevó a un porcentaje de remoción de color muy comparativo (~60%) al obtenido con el floculante comercial PAC (5 mg/L). De acuerdo a los experimentos en ausencia y presencia de tetraciclina, el quitosano fue el floculante que presentó mayor interacción con el fármaco (Félix-Alcalá, 2020). En todos los casos anteriormente mencionados, donde se usó quitosano, la floculación fue conducida por el mecanismo de adsorción y neutralización de la carga.

4.2. Tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con datos presentados por la CONAGUA, en el año 2014 el volumen de aguas residuales provenientes de las descargas municipales fue de aproximadamente 7.2 miles de hectómetros cúbicos

al año (228.7 m³/s), de las cuales 6.65 miles de hectómetros cúbicos al año se colectaron en los sistemas de alcantarillado y se trataron 3.51 miles de hectómetros cúbicos. En el caso de las aguas residuales industriales en ese mismo año se tuvieron descargas correspondientes aproximadamente de 6.67 miles de hectómetros cúbicos al año, de los cuales se trataron 2.07 miles de hectómetros cúbicos al año (CONAGUA 2015b, 2015c). Como se puede observar en los datos anteriores, de la gran cantidad de agua que es descargada, solo una pequeña parte recibe tratamiento primario (no se enfoca en contaminantes emergentes), mientras que el resto de estas aguas contaminadas suelen ser depositadas directamente en el medio ambiente. Por ello, diversos estudios realizados en México han evaluado la remediación de aguas residuales empleando biofloculantes, tanto en descargas municipales como efluentes de diferentes industrias. Por ejemplo, en el estado de Jalisco se llevó a cabo un estudio de tratamiento de vinaza, efluente de la industria tequilera, evaluando diferentes biopolímeros como floculantes, entre ellos el quitosano, goma guar y compuestos de la semilla de algarrobo. En esa investigación, el quitosano a una concentración de 300 mg/L fue el biopolímero más eficiente, logrando el 75% de remoción de color, una reducción del 90% de la turbidez y un 13.55% en la demanda química orgánica (Ferral-Pérez y col., 2016). Por otra parte, en la ciudad de Tijuana, estado de Baja California, se usó quitosano para el tratamiento de agua residual proveniente de la industria productora de tortillas. Los resultados mostraron que este polisacárido fue efectivo a pH 5.5 y dosis menor a 3 g/L, teniendo eficiencias superiores al 80% en la remoción de turbidez (Suarez-Meraz y col., 2016). Para este tipo de agua residual, también se reportó un estudio usando quitosano y alginato de sodio, tanto de manera individual como secuencial. En el tratamiento independiente, el alginato fue más eficiente en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) con un 61.43%, en comparación con el quitosano que presentó un 59.74%. Con respecto al tratamiento secuencial, los mejores resultados se obtuvieron con en el tratamiento donde se utilizó primero alginato y posteriormente quitosano, con un porcentaje de remoción DQO de 70.19% (Vacío-Muro y col., 2020). La combinación de quitosano con alginato de sodio también ha sido evaluada para tratar aguas residuales provenientes de una industria harinera de pescado en la ciudad de Mazatlán, estado de Sinaloa. Para ello, con experimentos de prueba de jarras usando

300 mg/L de quitosano con 20 mg/L alginato de sodio se logró remover exitosamente el 91.84% de sólidos suspendidos totales y 90.83% de sólidos suspendidos volátiles (Arias-Lizárraga y Méndez-Gómez, 2014). Por otra parte, para las aguas residuales derivadas de una industria cosmética localizada en la Ciudad de México, se evaluó el proceso de coagulación-floculación utilizando diferentes biopolímeros (goma guar, goma garrofin y mucilago de nopal). En general, se obtuvieron resultados de remoción de 67.8% para turbidez, 20.1% para conductividad eléctrica y 38.7% de DQO, siendo el mucilago de nopal el floculante de mayor eficiencia en la remoción con 21.1 mg DQO/mg de polímero (Carpinteyro-Urban y col., 2012). En otra investigación que fue realizada en el estado de Tabasco se usó almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en combinación con sustancias inorgánicas como $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ y $Ca(OH)_2$ para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La combinación que

presentó la mayor eficiencia fue 250 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ y 750 mg/L del almidón, logrando remover 75% de la turbidez y 78% del color, resultando una turbidez final de 6 NTU (Ortiz y col. 2018). En otros estudios realizados en la Ciudad de Culiacán, estado de Sinaloa, se ha demostrado la alta eficiencia de bajas concentraciones de quitosano (5-10 mg/L), vía floculación directa, en la remediación de aguas residuales agrícolas y mezclas de efluentes (agua residuales agrícolas y domésticas), llevando la turbidez hasta un valor aceptado por las normas mexicanas para agua de uso doméstico (cerca de 5 NTU) (Ruelas-Leyva y col., 2017; Picos-Corrales y col., 2020).

En la Tabla 1 se resumen algunos datos selectos que demuestran la eficiencia de algunos materiales ambientalmente amigables estudiados como floculantes en muestras de agua tomadas de fuentes diferentes en México.

Tabla 1. Materiales ambientalmente amigables estudiados en el tratamiento de aguas vía floculación.

Material	Dosis	Muestra de agua	Eficiencia de remoción	Referencia
Almidón de yuca con sulfato de aluminio	2 mg/L y 28 mg/L	Río Carrizal (70 NTU)	98%, turbidez	(Solís y col., 2012)
<i>Moringa Oleífera</i>	5-10 mg/L	Río Humaya (70 NTU)	92%, turbidez 90%, Mn	(Ruelas-Leyva y col., 2017)
Quitosano	5 mg/L	Río Tamazula (32 NTU)	90%, turbidez 89%, Mn	(Picos-Corrales y col., 2020)
Quitosano	300 mg/L	Vinaza	90%, turbidez 13%, DQO	(Ferral-Pérez y col., 2016)
Quitosano	5 mg/L	Mezclas de agua residual (160 NTU)	96%, turbidez 80%, Fe	(Picos-Corrales y col., 2020)
Quitosano con alginato de sodio	300 mg/L y 20 mg/L	Industria harinera de pescado	92%, sólidos suspendidos totales	(Arias-Lizárraga y Méndez-Gómez, 2014)

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la literatura consultada, es necesario implementar una campaña de monitoreo exhaustivo de las aguas superficiales, así como llevar a cabo un tratamiento adecuado de las aguas residuales domésticas y agrícolas antes de ser depositadas en el medio ambiente. Los floculantes ambientalmente amigables representan una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas a nivel nacional. Dentro de este grupo de floculantes, se observó que el quitosano podría ser la opción que más ventajas ofrece en cuanto a los tipos de agua a tratar, la variedad de contaminantes que puede remover y su eficiencia de remoción, además de que este polisacárido produce un volumen de lodos menor y se puede aplicar a concentraciones más bajas (1 mg/L) comparado con el floculante comercial poli(cloruro de aluminio) (PAC) (5 mg/L). Es importante resaltar que el uso de algunos biofloculantes ha permitido obtener agua con niveles de turbidez y concentraciones de contaminantes dentro de los límites establecidos por el reglamento ambiental mexicano (NOM-127-SSA1-1194; NOM-002-SEMARNAT-1996). En el caso de biomateriales de bajo costo, que ofrecen una eficiencia menor como floculantes, éstos pueden ser utilizados en un pretratamiento de aguas para mitigar los niveles de contaminación antes de otras etapas de remediación.

Nota: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Addo-Bediako, A., Matlou, K., & Makushu, E. (2018). Heavy metal concentrations in water and sediment of the Steelpoort River, Olifants River System, South Africa. *African Journal of Aquatic Science*, 43(4), 413-416.

Al-Sakkari, E. G., Abdeldayem, O. M., Genina, E. E., Amin, L., Bahgat, N. T., Rene, E. R., & El-Sherbiny, I. M. (2020). New Alginate-Based Interpenetrating Polymer Networks for Water Treatment: A Response Surface Methodology Based Optimization Study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 772–785.

Andía-Cárdenas Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9

e-ae55-56209841d9b8&groupId=1015 (consultado el 10 de octubre de 2020).

Arias-Lizárraga, D. M. & Méndez-Gómez, E. (2014). Remoción de sólidos en aguas residuales de la industria harinera de pescado empleando biopolímeros. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 115-123.

Bilal, M., Adeel, M., Rasheed, T., Zhao, Y., & Iqbal, H. M. (2019). Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation—a review. *Environment International*, 124, 336-353.

Boamah, P. O., Huang, Y., Hua, M., Zhang, Q., Liu, Y., Onumah, J., ... & Song, Y. (2015). Removal of cadmium from aqueous solution using low molecular weight chitosan derivative. *Carbohydrate polymers*, 122, 255-264.

Calderón, A., Meraz, M., & Tomasini, A. (2019). Pharmaceuticals present in urban and hospital wastewaters in Mexico City. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 41(2), 105-112.

Carpinteyro-Urban, S., Vaca, M., & Torres, L. G. (2012). Can vegetal biopolymers work as coagulant–floculant aids in the treatment of high-load cosmetic industrial wastewaters?. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 4925-4936.

Cheng, D., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Liu, Y., ... & Wei, D. (2020). A critical review on antibiotics and hormones in swine wastewater: Water pollution problems and control approaches. *Journal of hazardous materials*, 387, 121682.

CONAGUA (2016) Manual de Agua Potable, Alcantarrillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. Comisión Nacional del Agua. Publicaciones Estadísticas y Geográficas SINA 130:92.

CONAGUA, SEMARNAT (2015a) Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Edición 2015. Conagua, Semarnat, México.

CONAGUA, SEMARNAT. (2015b) Estadísticas del Agua en México. Edición 2015. Conagua, Semarnat. México.

CONAGUA, SEMARNAT (2015c). Situación del Subsector de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2015. Conagua, Semarnat. México.

Crini G., Lichtfouse E, Wilson L.D., Morin-Crini N. 2019. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters* 17, 195-213.

Devrimci, H. A., Yuksel, A. M., & Sanin, F. D. (2012). Algal Alginate: A Potential Coagulant for Drinking Water Treatment. *Desalination*, 299, 16–21.

Díaz-Torres, E., Gibson, R., González-Farías, F., Zarco-Arista, A. E., & Mazari-Hiriart, M. (2013). Endocrine disruptors in the Xochimilco wetland, Mexico City. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(6), 1586.

Dogu, I. & Arol, A. I. (2004). Separation of Dark-Colored Minerals from Feldspar by Selective Flocculation using Starch. *Powder Technology*, 139, 258–263.

EPA, 2017. Contaminants of Emerging Concern

Evans, A. E., Mateo-Sagasta, J., Qadir, M., Boelee, E., & Ippolito, A. (2019). Agricultural water pollution: key knowledge gaps and research needs. *Current opinion in environmental sustainability*, 36, 20-27.

Félix-Alcalá D.V. (2020). Estudio comparativo usando quitosano de diferentes proveedores para la remoción de turbidez en muestras de agua cruda (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán Sinaloa.

Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C., & Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Science of the Total Environment*, 454, 109-118.

Ferral-Pérez, H., Torres Bustillos, L. G., Méndez, H., Rodríguez-Santillan, J. L., Chairez, I. (2016). Sequential treatment of tequila industry vinasses by biopolymer-based coagulation/flocculation and catalytic ozonation. *Ozone: Science & Engineering*, 38(4), 279-290.

García-de la Parra, L. M.; Cervantes-Mojica, L. J.; González-Valdivia, C.; Martínez-Cordero, F. J.; Aguilar-Zárate, G.; Bastidas- Bastidas, P.; Betancourt-Lozano, M. (2012). Distribution of Pesticides and PCBs in Sedi-

ments of Agricultural Drains in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 63, 323-336

Gardner, D. J., Oporto, G. S.; Mills, R., & Samir, M. A. S. A (2008). Adhesion and Surface Issues in Cellulose and Nanocellulose. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22, 545–567.

Helmiyati & Aprilliza, M. (2017). Characterization and Properties of Sodium Alginate from Brown Algae used as an Ecofriendly Superabsorbent. *Materials Science and Engineering Conference Series*, 188, 012019.

Hermosillo-Ochoa, E., Picos-Corrales, L.A., Licea-Claverie, A. (2021). Eco-friendly flocculants from chitosan grafted with PNVCL and PAAc: Hybrid materials with enhanced removal properties for water remediation. *Separation and Purification Technology*, 258, 118052.

Ide, A. H., Osawa, R. A., Marcante, L. O., da Costa Pereira, J., & de Azevedo, J. C. R. (2017). Occurrence of pharmaceutical products, female sex hormones and caffeine in a subtropical region in Brazil. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 45(9), 1700334.

Ikeda, A., Takemura, A., Ono, H. (2000). Preparation of Low-Molecular Weight Alginic Acid by Acid Hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 42, 421–425.

Laines-Canepa, J. R., Goñi-Arévalo, J. A., Adams Schroeder, R. H., & Camacho Chiu, W. (2008). Mezclas Con Potencial Coagulante Para Tratamiento de Lixiviados de Un Relleno Sanitario. *Interciencia*, 33, 22–28.

Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 92, 489-508.

Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlkecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510-521.

Li, N., Sheng, G. P., Lu, Y. Z., Zeng, R. J., & Yu, H. Q. (2017). Removal of antibiotic resistance genes from was-

tewater treatment plant effluent by coagulation. *Water research*, 111, 204-212.

Lichtfouse E, Morin-Crini N, Fourmentin M., Zemmouri H., do Carmo Nascimento I.O., Queiroz L.M., Mohd M., Picos-Corrales L.A., Pei H., Wilson L.D., Crini, G. 2019. Chitosan for Direct Bioflocculation Processes. En: Crini, G. y Lichtfouse. *Sustainable Agriculture Reviews 36: Chitin and Chitosan: Applications in Food, Agriculture, Pharmacy, Medicine and Wastewater Treatment*. 36. Francia: Springer. 335-380.

Liu, C., Gao, B., Wang, S., Guo, K., Shen, X., Yue, Q., & Xu, X. (2020). Synthesis, characterization and flocculation performance of a novel sodium alginate-based flocculant. *Carbohydrate Polymers*, 248, 116790.

Makarigakis, A. K., & Jimenez-Cisneros, B. E. (2019). UNESCO's contribution to face global water challenges. *Water*, 11(2), 388.

Mendoza, I., Fernández, N., Ettiene, G. (2000). Uso de La Moringa Oleifera Como Coagulante en la Potabilización de las Aguas. *Ciencia*, 8, 235-242.

Mohammed, N., Grishkewich, N., & Tam, K. C. (2018). Cellulose Nanomaterials: Promising Sustainable Nanomaterials for Application in Water/Wastewater Treatment Processes. *Environmental Science: Nano*, 5, 623-658.

Montes, A.M., González-Farías, F.A. & Botello, A.V. (2012). Pollution by organochlorine pesticides in Navachiste-Macapule, Sinaloa, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 1359-1369.

Morin-Crini N., Lichtfouse E., Liu G., Balaram V., Ribeiro A.R.L., Lu Z., Stock F., Carmona E., Teixeira M. R., Picos-Corrales L.A., Moreno-Piraján J.C., Giraldo L., Li C., Pandey A., Hocquet D., Torri G., Crini G. 2021. Emerging Contaminants: Analysis, Aquatic Compartments and Water Pollution. En: Morin-Crini N., Lichtfouse E., Crini G. *Emerging Contaminants Vol. 1. Environmental Chemistry for a Sustainable World*, 65. Switzerland: Springer, Cham. 1-111.

Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Iravani, S., & Varma, R. S. (2020). Starch, Cellulose, Pectin, Gum, Alginate, Chitin and Chitosan Derived (Nano)Materials for Sustai-

nable Water Treatment: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 251, 116986.

Nharingo T, Moyo M. (2016). Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review. *Journal of Environmental Management* 166: 55-72.

Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"

Novillo, O., Pertusa, J. F., & Tomás, J. (2017). Exploring the presence of pollutants at sea: monitoring heavy metals and pesticides in loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from the western Mediterranean. *Science of the Total Environment*, 598, 1130-1139.

Ortega-Domínguez, J. A., Laines-Canepa, J. R., & Aparicio-Trápala, M. A. (2010). Almidón Modificado de Plátano: Posible Uso En El Tratamiento de Lixiviados Provenientes de Rellenos Sanitarios. *Kuxulkab*, XVII, 87-97.

Ortiz, V., López, G., Torres, C., Pampillón, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas/Cassava Starch (*Manihot esculenta* Crantz) As a coadyuvant in the coagulation flocculation of domestic wastewater. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18-46.

Özacar, M., & Şengil, İ. A. (2003). Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 229, 85-96.

Patel, P., Raju, N. J., Reddy, B. S. R., Suresh, U., Sankar, D. B., & Reddy, T. V. K. (2018). Heavy metal contamination in river water and sediments of the Swarnamukhi River Basin, India: risk assessment and environmental implications. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(2), 609-623.

Pérez-Coyotl, I., Galar-Martínez, M., García-Medina, S., Gómez-Oliván, L. M., Gasca-Pérez, E., Martínez-Galero, E., ... & Pérez-Solsona, S. (2019). Polluted water from an urban reservoir (Madín dam, México) induces toxicity and oxidative stress in *Cyprinus carpio* embryos. *Environmental Pollution*, 251, 510-521.

Pérez-Espejo, R., Aguilar-Ibarra, A., Escobedo-Sagaz, J.L. (2011) Agriculture and Water Pollution: Farmers' Perceptions in Central Mexico, *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 263-273.

Perez-Gonzalez, E., Osuna-Martinez, U. G., Herrera-Moreno, M. N., Rodriguez-Meza, G. D., Gonzalez-Ocampo, H. A., & Bucio-Pacheco, M. (2017). Organochlorine pesticides in gonad, brain, and blood of mice in two agricultural areas of Sinaloa. *Bulletin of Environmental Contamination and toxicology*, 98(4), 454-459.

Picos-Corrales, L. A., Sarmiento-Sánchez, J. I., Ruelas-Leyva, J. P., Crini, G., Hermosillo-Ochoa, E., & Gutiérrez-Montes, J.A. (2020). Environment-Friendly Approach toward the Treatment of Raw Agricultural Wastewater and River Water via Flocculation Using Chitosan and Bean Straw Flour as Bioflocculants. *ACS omega*, 5(8), 3943-3951.

Pino-Otín, M. R., Muñiz, S., Val, J., & Navarro, E. (2017). Effects of 18 pharmaceuticals on the physiological diversity of edaphic microorganisms. *Science of The Total Environment*, 595, 441-450.

Piras, C. C. & Smith, D. K. (2020). Multicomponent Polysaccharide Alginate-Based Bioinks. *Journal of Materials Chemistry B*, 8, 8171-8188.

Prakash N.B., Sockan V., Jayakaran P. 2014. Wastewater treatment by coagulation and flocculation. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology* 3, 479-484.

Raynal-Villasenor, J. A. (Ed.). (2020). *Water Resources of Mexico*. World Water Resources, 6. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40686-8>

Renault F, Sancey B, Badot P, Crini G. (2009). Chitosan for Coagulation/Flocculation Processes – An Eco-Friendly Approach. *European Polymer Journal*, 45, 1337-1348.

Renault, F., Sancey, B., Charles, J., Morin-Crini, N., Badot, P. M., Winterton, P., & Crini, G. (2009). Chitosan flocculation of cardboard-mill secondary biological wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155, 775-783.

Reynolds, C., & Ryan, P. G. (2018). Micro-plastic ingestion by waterbirds from contaminated wetlands in South Africa. *Marine pollution bulletin*, 126, 330-333.

Rodríguez, Á. G. P., López, M. I. R., Casillas, T. A. D., León, J. A. A., Prusty, B. A. K., & Cervera, F. J. Á. (2017). Levels of persistent organic pollutants in breast milk of Maya women in Yucatan, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(2), 59.

Ruelas-Leyva, J. P., Contreras-Andrade, I., Sarmiento-Sánchez, J. I., Licea-Claverie, A., Jiménez-Lam, S. A., Cristerna-Madrigal, Y. G., & Picos-Corrales, L. A. (2017). The Effectiveness of Moringa oleifera Seed Flour and Chitosan as Coagulant-Flocculants for Water Treatment. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 45(8), 1600339.

Sánchez-Peña, Y., Martínez-Ávila, G., Sinagawa-García, S., & Vázquez-Rodríguez, J. (2013). Moringa oleifera; Importancia, Funcionalidad y Estudios Involucrados. *AQM Acta Química Mexicana*, 5, 25-30.

SEMARNART. 2016. Informe de la situación del medio ambiente. Edición 2015. Ciudad de México, México: Semarnart. 498 p.

Solís-Silvan, R., Laines-Canepa, J. R., & Hernández-Barajas, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 229-236.

Strokal, M., Ma, L., Bai, Z., Luan, S., Kroeze, C., Oenema, O., ... & Zhang, F. (2016). Alarming nutrient pollution of Chinese rivers as a result of agricultural transitions. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024014.

Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E., & Hart, A. (2012). Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *Science of the Total Environment*, 416, 1-21.

Suarez-Meraz, K. A., Ponce-Vargas, S. M., Lopez-Maldonado, J. T., Cornejo-Bravo, J. M., Oropeza-Guzman, M. T., & López-Maldonado, E. A. (2016). Eco-friendly innovation for nejayote coagulation-flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 284, 536-542.

Szyguła, A., Guibal, E., Palacín, M. A., Ruiz, M., Sastre, A. M. (2009). Removal of an anionic dye (Acid Blue

92) by coagulation–flocculation using chitosan. *Journal of Environmental Management*, 90, 2979-2986.

Vacio-Muro, K. J., Lozano-Álvarez, J. A., Sánchez-González, M. N., Vela, N. A. C., Torres-Ramírez, E., & Jáuregui-Rincón, J. (2020). Remoción de Contaminantes del Nejayote con Alginato y Quitosano. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 497-515.

Vargas-Berrones, K., Bernal-Jácome, L., de León-Martínez, L. D., & Flores-Ramírez, R. (2020). Emerging po-

llutants (EPs) in Latin América: A critical review of under-studied EPs, case of study-Nonylphenol. *Science of The Total Environment*, 726, 138493.

Yakout, A. A., El-Sokkary, R. H., Shreadah, M. A., & Hamid, O. G. A. (2016). Removal of Cd (II) and Pb (II) from wastewater by using triethylenetetramine functionalized grafted cellulose acetate-manganese dioxide composite. *Carbohydrate Polymers*, 148, 406-414.