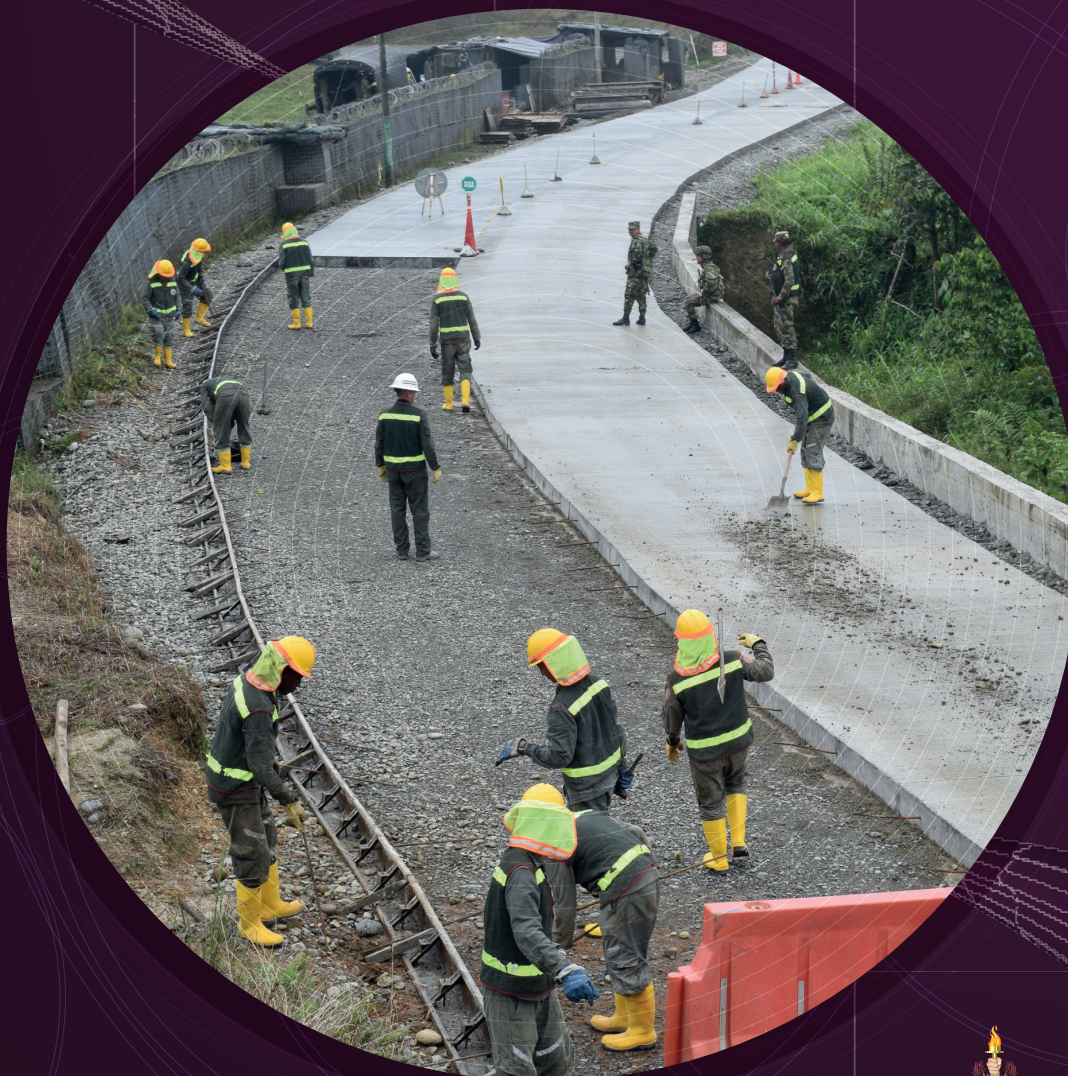


INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA MILITAR



ESING

REVISTA INGENIEROS MILITARES
Edición No. XV -2020- ISSN 21453144

Los suelos diatomáceos: estudios en cuanto eficiencia en la remoción de metales pesados mediante filtros y revisión sistemática de la literatura

Diatomaceous soils: studies on efficiency in the removal of heavy metals through filters and systematic review of the literature

Edwin Alexander Anaya Jerez¹, Daniel Alberto Zuluaga Astudillo², Henry Alberto Córdoba Romero³, Angélica Johanna Rodríguez Reyes⁴

¹ Ingeniero Civil, Estudiante Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D. C. A.), Bogotá, Colombia.
alanaya@udca.edu.co

² Ingeniero Civil, Docente Escuela de Ingenieros Militares Especialización en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas, Bogotá, Colombia.
daniel.zuluaga@esing.edu.co

³ Ingeniero Civil, Docente Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. hacordoba@ucatolica.edu.co

⁴ Ingeniera Química, Coordinadora de investigación y desarrollo de Concrelab S.A.S, Candidata a magister en ingeniería química, Bogotá, Colombia
investigacionydesarrollo@concrelab.com

Página
100

ESING

REVISTA INGENIEROS MILITARES
número 15, Año 2020, ISSN 2145-3144 / BOGOTÁ-COLOMBIA

RESUMEN

La aparición de metales pesados en los cuerpos de agua ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías para su tratamiento y la remoción de estas sustancias tóxicas. Tecnologías que pueden llegar a ser efectivas en la eliminación de metales pesados, pero a unos costos elevados. Es por esta razón que se están desarrollando nuevos procesos a partir de los suelos diatomáceos, teniendo en cuenta su disponibilidad y la facilidad para su explotación en todo el mundo. El desarrollo de esta investigación se centró en la realización de una búsqueda sistemática de información sobre la implementación de los suelos diatomáceos como filtros, y su eficiencia en la remoción de sustancias contaminantes para el hombre y los ecosistemas. Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que los suelos diatomáceos tienen un gran potencial, pues su material poroso permite su modificación a través de diferentes procesos, con los cuales se puede obtener una diatomita con mejores propiedades de adsorción y con un alto porcentaje de remoción de metales pesados.

PALABRAS CLAVE

Suelos diatomáceos, filtros, metales pesados, adsorción, aguas residuales.

ABSTRACT

The appearance of heavy metals in water bodies has led to the development of new technologies for their treatment and the removal of these toxic substances. These technologies can be effective in removing heavy metals, but at high costs. It is for this reason that new processes are being developed based on diatomaceous soils, taking into account their availability and ease of exploitation worldwide. The development of this research focused on conducting a systematic search for information on the implementation of diatomaceous soils as filters, and their efficiency in the removal of pollutants for man and ecosystems. Based on the results obtained, it can be concluded that diatomaceous soils have great potential, since their porous material allows their modification through different processes, getting a diatomite with better adsorption properties and a high percentage of heavy metal removal.

KEYWORDS

Diatomaceous soils, filters, heavy metals, adsorption, wastewater.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, el aumento de las industrias y la expansión de la agricultura son factores que aumentan la contaminación del agua,

esto hace que aquella que llega a los efluentes contenga alta carga contaminante y que no todas las sustancias tóxicas reciban el tratamiento adecuado en las plantas que se dedican, mediante métodos convencionales, a este fin. Es por esta razón que se están desarrollando investigaciones, con el propósito específico de encontrar métodos eficaces, capaces de lograr porcentajes de remoción altos de sustancias tan tóxicas como, por ejemplo, los metales pesados. En este orden de ideas, y en virtud de las investigaciones que se han desarrollado, se adelantó de una búsqueda sistemática de las últimas tecnologías utilizadas para la remoción de agentes contaminantes en aguas residuales e industriales y que utilizan los suelos diatomáceos como medio filtrante. Las bases de datos consultadas fueron Scielo, Google Scholar y Scopus.

ESTADO DEL ARTE

La consulta de las fuentes bibliográficas se realizó a partir de una revisión sistemática de artículos científicos, con el fin analizar las diferentes tecnologías enfocadas en tratamientos de aguas residuales. Para esta labor se llevó a cabo la revisión de artículos encontrados mediante los siguientes operadores booleanos: “diatoms”, “filter”, “residual water” y “sewage treatment”. Finalmente, se obtuvo la siguiente ecuación de búsqueda: (diatomite OR “soil diatoms” OR “diatom species”) AND (filter OR “residual water” OR “heavy metals” OR tannery OR “sewage treatment”) AND (“wastewater”).

Búsqueda que se realizó, principalmente, con el fin obtener un conocimiento más amplio sobre las nuevas tecnologías aplicadas a filtros de suelos diatomáceos para la remoción de metales pesados en aguas residuales, en segundo término, para poder desarrollar una nueva tecnología a partir del uso de un filtro que resulte ser eficiente para la remoción de metales pesados y, en tercer lugar, para reducir los costos de implementación y operación utilizando los suelos diatomáceos.

GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DE AGUA

El rápido aumento de la población, el crecimiento industrial y agrícola, trae como consecuencia que los niveles de contaminación en las aguas residuales además de ser mayor, contenga mayor contenido de sustancias tóxicas para el ser humano [1]. Siendo el agua, un elemento tan importante para ser humano, hace que en la actualidad se estén desarrollando diferentes estudios sobre cómo mejorar la calidad del agua desarrollando tecnologías menos abrasivas con el medio ambiente; en lo que tiene que ver propiamente con las aguas residuales producto de la industria textil, curtiembres y agrícolas [2].

Es así como en la literatura se encuentra una gran gama de alternativas dirigidas a la investigación en pro de la eliminación de los metales pesados en los cuerpos de agua. Entre ellas se encuentran la precipitación química, la filtración por membranas, el intercambio de iones, la coagulación con alumbre, la adsorción [3], la coagulación-floculación y métodos electroquímicos [4].

Industria de curtiembres y sus efectos en la salud

El proceso del curtido del cuero genera grandes volúmenes de agua residual siendo, esto le convierte en una fuente primaria de contaminación, pues conduce a que el efluente de las curtiembres se convierta en una amenaza para los ecosistemas, debido a sus altos niveles de salinidad, la alta carga orgánica —Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)—, materia inorgánica, sólidos disueltos y en suspensión, y otros contaminantes como el sulfuro, y el cromo (Cr).

El objeto del proceso de cromación es obtener un cuero duradero, proceso mediante el cual el cuero absorbe entre el 60 y el 80% del cromo (Cr), el resto de la sustancia es vertido al alcantarillado [5]. En las aguas residuales producto de la industria de las curtiembres se encuentran sustancias tóxicas como son el cromo hexavalente (Cr VI), aril-aminas, pentaclorofenol (PCP), formaldehído; productos con contenido de tributilestano (TBT) y metales

pesados como mercurio (Hg), cadmio (Cd) y zirconio (Zr) [6]. Siendo el cromo(VI) 500 veces más tóxico que el cromo(III) [5].

Efectos en la salud asociados a los metales pesados

El uso incontrolado de los metales pesados en los procesos industriales lleva a la degradación del ambiente debido a su acumulación, poniendo en riesgo a los seres vivos. Lo que hace que se encuentren trazas de metales pesados como Pb (II), Cu (II), Cd (II), Ni(II) y Zn (II) en las aguas residuales. Sustancias tóxicas que en altas concentraciones pueden generar trastornos funcionales en los seres vivos [7].

Los metales pesados pueden permanecer fácilmente en los ríos y suelos e incorporarse a las plantas y animales, por supuesto, también pueden llegar a hombre mediante la cadena trófica, lo que pone en riesgo la salud humana [8]. Su alta toxicidad ocasiona un desorden en la fisiología humana, otros sistemas biológicos, en las plantas y en los animales [9] Zn, Cu, Pb, Ni, Cd, etc.. Por eso resulta de suma importancia implementar nuevas tecnologías para el tratamiento de las aguas contaminadas, desarrollando procesos más efectivos para la remoción de sustancias contaminantes que sean, a su vez, económicamente más viables en lo que respecta a su ejecución y mantenimiento.

Producto de las aguas residuales de uso industrial, el contenido de cromo hexavalente (Cr VI) en alta concentración en los efluentes puede ocasionar daños al ser humano y el ambiente. Los altos costos en los tratamientos a estos tipos de agua [6], la poca eficacia, además de los subproductos no deseados, imposibilitan la implementación de esta tecnología en países en desarrollo [10].

Con respecto al mercurio (Hg), entre los procesos de eliminación disponibles en el mercado se encuentran: la adsorción de carbón activado impregnado por azufre, la separación por membranas líquidas de microemulsión, el intercambio iónico y la precipitación coloidal. Pero se trata de procesos costosos y poco eficientes,

debido a la cinética lenta y la escasa selectividad por el mercurio [11].

Por otra parte, el cadmio (Cd), muy utilizado en la fabricación de pinturas, pilas, baterías, farmacéutica y fotografía, entre otros campos, es otro metal pesado que representa alto riesgo para el hombre, pues puede llegar a este a través de alimentos y fuentes de agua. Una exposición crónica a este elemento puede generar anemia, disfunción renal, cálculos renales y cáncer [8].

De otro lado, el plomo (Pb) en altas concentraciones es considerado uno de los contaminantes más tóxicos y duraderos que puede generar aumento en la presión arterial, daño renal, abortos involuntarios y hasta daño cerebral [7].

Finalmente, el arsénico (As), una sustancia altamente tóxica que causa muchas enfermedades, es considerado un metal cancerígeno que, además, genera un problema en el tratamiento del agua y pasa fácilmente a suelo penetrando las aguas subterráneas. La contaminación por esta sustancia se ha incrementado a raíz del incremento en las actividades agrícolas e industriales [12].

ANTECEDENTES DE FILTRACIÓN EN SUELOS DIATOMÁCEOS

Los suelos diatomáceos están compuestos por restos fosilizados de las diatomeas, pequeñas algas que pertenecen al filo Bacillariophyta, organismos unicelulares conformados por una pared celular compuesta casi en su totalidad por sílice (SiO₂). Los suelos diatomáceos se caracterizan por tener propiedades físicas como alta permeabilidad y porosidad, así como baja conductividad térmica y densidad; dentro de sus propiedades de superficie se destacan su hidrofobia, solubilidad, carga, acidez e intercambio iónico [9] Zn, Cu, Pb, Ni, Cd, etc..

La filtración es el método tradicional para tratar las aguas residuales, las cuales son conducidas por un medio poroso, el cual puede ser un filtro de arena o tierra de diatomeas, con el fin de lograr la eliminación de la mayor cantidad de sólidos en suspensión. Por otro lado, para la remoción de

metales se han desarrollado nuevas tecnologías conocidas como “de membranas”, las cuales han demostrado ser más eficientes en lo que se refiere a la remoción de sustancias tóxicas. El único inconveniente que presentan estas tecnologías es su alto costo, en especial la nanofiltración y la ultrafiltración [13].

La importancia de los suelos diatomáceos radica en que proveen un material poroso, el cual está formado por los restos de rocas diatomeas sedimentarias de tipo silíceas de origen biogénico [14]. Es por ello que los suelos diatomáceos son identificados como un material que puede ser usado para la remoción de sustancias no deseadas en las aguas residuales a través de su adsorción. A lo que se suma la ventaja que representan su gran disponibilidad a nivel mundial y su bajo costo [15]. A este respecto, se estima la existencia de 2000 millones de toneladas en el planeta de este material, siendo Asia el continente con la mayor cantidad de reserva —con cerca de 1000 toneladas—, le sigue Europa —con 500 millones de toneladas— y luego América, África y Oceanía —con 500 millones de toneladas de suelo— [16]small density, large specific surface area, good adsorptive property, acid resistance, alkali resistance, and insulation. As a new kind of coagulant material, diatomite has characteristics of wide range of resource, good sewage treatment effect, and simple equipment for later sludge treatment, so its application prospect is broad. This paper introduced the basic conception and properties, and adsorption mechanism of diatomite, summarized the modification method of diatomite, its research and application status of water treatment, as well as its future development trends. © (2014). Este tipo de suelo es reconocido como un nanomaterial natural, caracterizado por tener peso ligero, fuerte adsorción, resistencia al desgaste y a la corrosión [17]. Todas estas propiedades, a pesar de las impurezas que poseen, hacen que los suelos diatomáceos sean un material apto para ser empleado como adsorbente y como medio filtrante.

Teniendo en cuenta que se desea aumentar la adsorción en los suelos diatomáceos, es necesario

considerar la realización de su modificación debido a las impurezas que poseen, ya que estas reducen la adsorción de iones de metales pesados [9]Zn, Cu, Pb, Ni, Cd, etc.. Por esta razón, se han estudiado diferentes métodos de modificación de la diatomita para mejorar su adsorción y lograr obtener resultados muy eficaces.

Uno de los métodos utilizados para la modificación de la diatomita son el óxido de manganeso y el óxido de hierro, con los cuales se logró una remoción de metales pesados con altos porcentajes de eficiencia. Para ello se empleó la diatomita modificada con óxido de manganeso, logrando una tasa de adsorción de los iones de Pb^{2+} del 94,42% y para los iones del Zn^{2+} una adsorción del 86,3%. Para el caso de la oxidación con hierro (Fe^{3+}) se logró la remoción de plomo (Pb^{2+}) en aguas residuales, obteniendo un aumento en la adsorción del 32 al 65%.

También se realizaron modificaciones a partir de ácido-base, logrando un aumento en la porosidad y el área de superficie específica. Se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) para la adsorción de Cu^{2+} , alcanzando una remoción del 80%. Se realizó también una modificación a partir de una mezcla de diatomita con acticarbonado, con el fin de adsorber iones de Fe^{3+} , logrando una tasa de eliminación de 97,51%. Finalmente, se realizó una modificación con carbonato de calcio, obteniendo una mayor remoción para iones de Cu^{2+} en la diatomita modificada a una temperatura de 25 oC, con un tiempo de reacción de 60 minutos, pH de 4 y remoción del 88,15%.

Mediante un orgánico se logró mejorar la adsorción con quitosano. En este caso se observó que la capacidad de adsorción fue más alta que la diatomita original, logrando una eficiencia en la eliminación del cromo (Cr VI) de un 92.6% y para el plomo del 99.8% [18]. Se evaluó la capacidad de adsorción de la diatomita para la remoción de iones de plomo (Pb^{II}) en soluciones acuosas, contemplando diferentes variables como masa adsorbente, tiempo de contacto, temperatura y pH, con el fin encontrar las condiciones óptimas. Para

el caso del plomo (Pb), las condiciones óptimas fueron un tiempo de 2 minutos a una temperatura de 25 oC y un pH de 6. [7].

Con el fin de lograr una remoción más eficiente de metales pesados en los efluentes de las aguas producto de las industrias, se han realizado pruebas mediante diferentes filtros utilizando diatomeas en su estado natural o aplicando algún procedimiento de tipo térmico o químico, o la combinación de ambos, con el propósito de mejorar su capacidad de adsorción de los metales pesados.

La adsorción es una de las técnicas más utilizadas para la remoción de metales pesados en aguas residuales; se trata de un proceso de transferencia de masa en donde una sustancia se transfiere de una fase líquida a la superficie de un sólido, a través de interacciones físicas o químicas [19]Cr(III). La adsorción se puede realizar a partir de cualquier material sólido que tenga una estructura porosa [3] y ha demostrado su mayor eficacia en la remoción de trazas de metales pesados.

En este orden de ideas, con el fin de reducir la contaminación de los cuerpos de agua, se trabajó a nivel de laboratorio en un filtro con diatomita activada a partir de quitosano a través de un proceso térmico a 580 oC; posteriormente, con una segunda muestra se realizó una activación combinando dos procesos, uno químico mediante ácido clorhídrico (HCL) y uno térmico. De igual forma, se trabajaron diferentes parámetros como el porcentaje de peso del quitosano y el tamaño de partículas. Se llevó a efecto la caracterización del agua contaminada y se realizaron las pruebas de laboratorio con los diferentes suelos. De este modo, se consiguió la reducción de la turbidez, el plomo (Pb) y el Cromo (Cr), además, con la adición de quitosano, se logró eliminación de la *Escherichia coli* en un 100% [20]. En cuanto a la remoción de cromo (Cr), plomo (Pb), y arsénico (As) la mejor eficiencia se obtuvo a partir de la modificación térmica.

Dentro del tratamiento que se realiza con la diatomita como adsorbente para el tratamiento de

arsénico (As), se desmagnetizó la diatomita natural obtenida en la provincia de Lam Dong, Vietnam, con el fin de eliminar el hierro como impureza. Luego se activó, a partir de una solución de (HCL) al 10% de concentración, durante un tiempo de 90 minutos a temperatura ambiente. Los resultados mostraron una capacidad de adsorción tres veces mayor que la diatomita original. De esta manera se logró un aumento en la superficie de adsorción del 47%. Las condiciones más óptimas para la activación se realizaron a temperatura ambiente, con un tiempo de activación de 90 minutos, con una concentración de HCL al 10% (en peso), con una relación de diatomita y solución de HCL 1:10. Se probó la capacidad de adsorción con agua contaminada con arsénico (As), con ello se obtuvo una eliminación del 69% utilizando la diatomita modificada, luego se comparó esta con la diatomita original y se halló una remoción del 22,6% [12]. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la remoción de metales al realizar alguna modificación a los suelos diatomáceos.

Tabla 1. Porcentajes de remoción obtenidos de metales pesados

Tipo de modificación		
Óxido de manganeso		
	Metal a remover	Porcentaje de remoción obtenido (%)
Óxido de hierro	Pb ²⁺	94.42
Hidróxido de sodio (NaOH)	Zn ²⁺	86.3
Acticarbonado	Pb ²⁺	65
Carbonato de calcio	Cu ²⁺	80
Quitosano	Fe ³⁺	97.51
	Cu ²⁺	88.15
	Cr (VI)	92.6
	Pb ²⁺	99.8

Fuente: elaboración propia.

OTROS FILTROS

Se han adelantado estudios con el fin de realizar la eliminación de tintes presentes en el agua, producto de residuos textiles (CRD), a partir del uso de la adsorción. Para ello, nanopartículas de piroxeno y magnética se sintetizaron, funcionalizaron y se incrustaron en la diatomita D4500. Se realizaron pruebas de columna de flujo continuo con el propósito de eliminar un tinte rojo textil comercial (CRD) que fue utilizado como adsorbato; pruebas que se realizaron a una temperatura de 298 K con un pH de 8,10. Los resultados permitieron demostrar la alta capacidad de adsorción que tienen las nanopartículas, lo que también se hizo evidente por la mejora que se obtuvo en el área de superficie. Estos estudios permiten concluir que es posible realizar procesos combinados de adsorción y filtración [21]polyethylenimine-functionalized pyroxene nanoparticles (PEI-PNPs).

Con el fin de lograr una mayor eficiencia en la remoción de metales pesados por medio del método de adsorción, se han adelantado diferentes estudios mediante el uso de la diatomita y se han realizado

ensayos para obtener una diatomita modificada. Proceso que se hace a partir del metal pesado que se desea remover, midiendo los parámetros iniciales, como concentración del metal, pH, tiempo de absorción y temperatura, puesto que se ha demostrado que estas características influyen en la eficiencia del proceso de adsorción.

Continuando con la identificación de filtros con diatomitas para la mejora en la calidad del agua que sale de los procesos agroindustriales, se adelantó un estudio con el fin de reducir las concentraciones de arsénico (As) presente en aguas subterráneas, a partir de un proceso de adsorción-filtración. Una vez realizada la caracterización físico-química del agua a tratar, se realizó un filtro con diatomitas cuya granulometría era de 20,50 y 70 mesh, considerando alturas de lecho de 10 y 15 cm. Se logró así un porcentaje de reducción del arsénico (As) del 97.43%, a una altura de lecho de 15 cm y para una granulometría de 70 mesh. La concentración del arsénico (As) se redujo en 0.00386 ppm, logrando cumplir el parámetro máximo permitido por la norma, establecido en 0,01 ppm. [22]

Mediante un filtro de diatomita y la incrustación de nanopiroxeno para la eliminación del cromo (Cr VI), se modificó la carga a partir de una fracción de nanopartículas de piroxeno con polietilenimina (PEI-PN), todo ello con el objeto de mejorar sus propiedades de adsorción. Inicialmente se probó con una solución de dicromato y posteriormente en aguas residuales de una curtiembre. Se realizaron pruebas con un filtro con diatomita modificada y sin modificar; como resultado se obtuvo que el rendimiento de la adsorción en la columna de lecho fijo dependía del flujo del caudal, la altura del lecho y la concentración inicial del cromo, obteniéndose mejores resultados en la diatomita modificada [5].

Para la eliminación del mercurio (Hg) se analizó el rendimiento de la diatomita como sorbente en matrices acuosas u oleosas. Se colocaron 100 miligramos del absorbente diatomita en 100 ml de una solución acuosa con una concentración de 8600 partes por billón (ppb) (g/L), después de agitar la mezcla se filtró y se realizó el análisis de la muestra. Se logró reducir la concentración del mercurio a 12 ppb, logrando una eliminación del 99.9% en un tiempo de 30 minutos. De igual forma, se realizaron pruebas en una solución acuosa con una concentración que contenía 8100 ppb y, mediante el uso de la diatomita como absorbente, la concentración se redujo a 260 ppb en 5 minutos, logrando una eliminación del 96.8%. Finalmente, se aumentó el tiempo a 20 minutos y se obtuvo una reducción de 190 ppb, lo que equivale a una remoción del 97.8% [11].

En otro estudio se realizó la modificación de la diatomita con el uso de 0.35 gramos de óxido de manganeso por cada gramo de diatomita. Con ello se logró un aumento del área de superficie de 2,2 veces, mejorando la capacidad de filtración de la diatomita [23]. También se llevó a cabo un estudio con un biorreactor de membrana, a partir de una membrana no tejida con diatomita modificada y óxido de hierro, el cual se utilizó para el recubrimiento de la diatomita en la superficie de la membrana no tejida para poder ser utilizada en el reactor. Los resultados de las pruebas a nivel de laboratorio se compararon con los de un reactor

con tejido original, dando como resultado que la membrana no tejida modificada sumergida en aguas residuales sintéticas presentaba un mayor flujo crítico, mayor periodo de funcionamiento, menor presión de membrana de funcionamiento y menor índice de volumen de lodos. Además, las Concentraciones de DBO y amoníaco (NH₄) se redujeron en los dos reactores y mostraron resultados similares. Concluyendo que los resultados obtenidos podrían cumplir con la norma para la recuperación de aguas residuales [24].

CONCLUSIONES

A partir de todas las pruebas realizadas con la diatomita modificada y al comparar los resultados con la diatomita natural, la diatomita modificada siempre presentó mejor eficiencia en la remoción de metales pesados [18].

Es necesario realizar una caracterización físico química, previo a alguna modificación de la diatomita, para lograr obtener una buena eficiencia en la remoción de metales pesados, ya que la remoción de sustancias no deseables depende de la concentración del metal pesado, del pH y de la temperatura del proceso.

Las pruebas de laboratorio realizadas a los filtros a partir de suelos diatomáceos modificados arrojaron como resultado buenos porcentajes de eficiencia para la remoción de sustancias tóxicas, lo que los hace potencialmente útiles en el tratamiento de aguas residuales y podría reducir los costos en los tratamientos de las aguas residuales de uso industrial.

Es necesario continuar al desarrollo de este tipo de investigaciones para que puedan ser implementadas en los países en desarrollo, para reducir costos en los tratamientos de las aguas de uso industrial y mejorar las condiciones en los ecosistemas.

REFERENCIAS

- [1] D. Vashisht, A. Kumar, S. K. Mehta y A. Ibhaddon, "Analysis of emerging contaminants: A case study of the

- underground and drinking water samples in Chandigarh, India,” *Environ. Adv.*, vol. 1, May. 2020, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100002.
- [2] M. Bravo, “Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales,” *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), pp. 951–952, 1967.
- [3] M. A. M. Khraisheh, Y. S. Al-degs y W. A. M. McMinn, “Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite,” *Chem. Eng. J.*, vol. 99, no. 2, pp. 177–184, 2004, doi: 10.1016/j.ccej.2003.11.029.
- [4] W. Liu, J. Zhang, N. Li y Q. Ping, “Adsorption of heavy metal ions with modified diatomite from effluent,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 103, pp. 216–220, 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.21990.
- [5] A. Hethnawi, W. Khderat, K. Hashlamoun, A. Kanan y N. Nassar, “Enhancing Chromium (VI) removal from synthetic and real tannery effluents by using diatomite-embedded nanopyroxene,” *Chemosphere*, vol. 252, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126523.
- [6] S. Martínez y J. Romero, “Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad,” *Rev. Fac. Ciencias Económicas*, vol. 26, no. 1, pp. 113–124, 2017, doi: 10.18359/rfce.2357.
- [7] M. Bilgin and Ş. Tulun, “Use of diatomite for the removal of lead ions from water: thermodynamics and kinetics,” vol. 2818, 2015, doi: 10.1080/13102818.2015.1039059.
- [8] L. F. Londoño Franco, P. T. Londoño Muñoz y F. G. Muñoz, “Los Riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal,” *Bioteconología en el Sect. Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 14, no. 2, p. 145, 2016, doi: 10.18684/bsaa(14)145-153.
- [9] O. S. Bello, K. A. Adegoke y R. O. Oyewole, “Insights into the Adsorption of Heavy Metals from Wastewater using Diatomaceous Earth,” *Sep. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 12, pp. 1787–1806, 2014, doi: 10.1080/01496395.2014.910223.
- [10] F. Yuan, Z. Sun, C. Li, Y. Tan, X. Zhang y S. Zheng, “Multi-component design and in-situ synthesis of visible-light-driven SnO₂/g-C₃N₄/diatomite composite for high-efficient photoreduction of Cr(VI) with the aid of citric acid,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 396, no. February, p. 122694, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122694.
- [11] B. Wang y T. R. Smith, “Performance of a diatomite-based sorbent in removing mercury from aqueous and oil matrices,” *J. Environ. Eng. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 469–476, 2007, doi: 10.1139/S07-002.
- [12] H. T. Nguyen y T. P. Dang, “Using activated diatomite as adsorbent for treatment of arsenic contaminated water,” *Key Eng. Mater.*, vol. 850 KEM, pp. 16–21, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.850.16.
- [13] J. J. Sadhwani y B. del R. Gamero, “Sostenibilidad hídrica y ambiental en la eliminación de contaminantes emergentes mediante tecnologías de membrana,” pp. 1–22, 2018, [En línea]. Disponible: www.conama2018.org. Consultado: julio 31, 2021.
- [14] H. Li, Q. Xie, N. Chen, H. Xu y L. Ma, “Research progress of adsorption on heavy metals from aqueous solutions by modified diatomite,” 2015.

- [15] H. He, Y. Luo, Z. Luo y C. Yu, "Diatomite-Based Material as an Adsorbent or Photocatalyst for Water Treatment," *Prog. Chem.*, vol. 31, no. 4, pp. 561–570, 2019, doi: 10.7536/PC180919.
- [16] D. G. Ri, S. Z. Qiu y W. J. Bin, "Diatomite modification and its application in wastewater treatment," *Adv. Mater. Res.*, vol. 850–851, pp. 1355–1359, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.850-851.1355.
- [17] H. Y. Cheng, A. L. Yang, Y. T. Zhang, and X. M. Kong, "Adsorption Properties of Microwave Modified Diatomite on Heavy Metals in Landfill Leachate," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 146, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/146/1/012019.
- [18] H. Li, Q. Xie, N. Chen, H. Xu y L. Ma, "Research progress of adsorption on heavy metals from aqueous solutions by modified diatomite," *Key Eng. Mater.*, vol. 697, pp. 766–770, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.697.766.
- [19] T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W. H. Lo y S. Babel, "Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals," *Chem. Eng. J.*, vol. 118, no. 1–2, pp. 83–98, 2006, doi: 10.1016/j.cej.2006.01.015.
- [20] C. Melgar, P. Gregory, Z. Rosado y D. Enrique, *Elaboración de filtros de diatomita activada con adición de quitosano para la descontaminación de las aguas del río Chili a nivel de laboratorio*. Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2017.
- [21] A. Hethnawi, N. N. Nassar, A. D. Manasrah y G. Vitale, "Polyethylenimine-functionalized pyroxene nanoparticles embedded on Diatomite for adsorptive removal of dye from textile wastewater in a fixed-bed column," *Chemical Engineering Journal*, vol. 320, pp. 389–404, 2017.
- [22] D. Estrada, "Disminución de arsénico mediante un filtro de diatomita del agua de afloramiento subterráneo en el campamento Cedro-Pataz," *Univ. César Vallejo*, pp. 1–46, 2016.
- [23] P. Moslehi y P. Nahid, "Heavy metal removal from water and wastewater using raw and modified diatomite," *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, vol. 20, no. 2, pp. 141–146, 2007.
- [24] H. Yueling, Z. Wenqi, R. Pinhua y J. Peng, "Performance of diatomite / iron oxide modified nonwoven membrane used in membrane bioreactor process for wastewater reclamation Yueling He , Wenqi Zhang , Pinhua Rao and Peng Jin," pp. 533–539, 2014, doi: 10.2166/wst.2014.254.