



Nanoremediación, **una alternativa en** **el tratamiento** de aguas residuales



Andrés
Camilo
Hernández
**Ingeniero
químico**

Asesor Técnico de
CISPROQUIM®/
Gerencia Técnica.

E

n Colombia, según el Informe Nacional del Registro Único Ambiental Manufacturero - RUA MF, se estima que, durante el 2017, los establecimientos del sector manufacturero que hicieron parte del estudio consumieron más de 370,7 millones de metros cúbicos (m³) de agua, principalmente, en actividades como la fabricación de pulpa de papel y cartón, abonos y compuestos nitrogenados, productos de la refinación de petróleo, entre otras.

Por otro lado, teniendo en cuenta que cada etapa productiva de las diferentes actividades económicas puede generar contaminantes en esta fuente, se calcula que alrededor del 40 % del agua consumida terminó convertida en agua residual, lo que equivale a 148,41 millones de metros cúbicos de agua vertida. No obstante, de esta cantidad de efluente, se identificó que un 88,3 % ha sido tratada (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2018).

A su vez, dado que la Resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible “establece los parámetros y los valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales...”, las empresas deben incluir etapas adicionales dentro de sus procesos, con el fin de realizar un tratamiento adecuado a sus aguas residuales y, de esta forma, cumplir con los parámetros fisi-

coquímicos exigidos según el tipo de actividad económica a la cual pertenece (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Debido a lo anterior, en el tratamiento de agua se emplean varios procesos para la eliminación de contaminantes y la adecuación del agua que va a ser vertida. Algunos de estos son: pretratamiento (mecánico), tratamiento primario (físicoquímico), tratamiento secundario (biológico) y tratamiento terciario (físicoquímico o biológico).

Ahora bien, a pesar de que existe una normatividad que define las condiciones de los vertimientos, se ha establecido que, en promedio, el 1,5 % del agua tratada proveniente de las aguas residuales recibe apenas un pretratamiento, el 20 % pasa por tratamiento primario y el 74 % por un tratamiento secundario (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2017). Estos indicadores reflejan que los cuerpos de agua donde se descargan dichas corrientes como ríos, lagos, suelos y alcantarillados siguen siendo contaminados, una problemática que perturba el ciclo natural de los recursos naturales y, a su vez, afecta la fauna y flora de los ecosistemas.

A nivel industrial, dentro de cada actividad económica aparecen involucradas diferentes materias primas, insumos y/o productos finales que pueden llegar a contaminar el agua. Por ejemplo, en el sector textil, específicamente en el de curtiembres, los contaminantes que pueden generarse son hidrocarburos, colorantes, grasas, iones (cloruros, sulfuros, sulfatos, nitratos) y cromo hexavalentes (Urrego, 2021).

De igual manera, dentro del sector minero, una de las grandes preocupaciones derivadas de esta actividad es la contaminación por mercurio. Para la muestra, en 2012 se calculó que más de 205 toneladas de ese metal fueron vertidos al suelo y al agua, lo que contribuye a que “entre 11,8 y 19 millones de personas en Colombia estén expuestas a riesgos muy altos por la calidad del agua” (El Tiempo, 2021).

Estos escenarios, sumados a otros impactos ambientales de carácter histórico, como lo han sido los derrames de hidrocarburos en fuentes de agua o, recientemente, el análisis de la contaminación de la Bahía de Cartagena, donde se encontraron concentraciones elevadas de metales pesados como mercurio, plomo y níquel, invitan a reflexionar acerca de la urgencia de establecer controles en el vertimiento de aguas residuales, así como de implementar nuevas técnicas y tecnologías que permitan fortalecer y optimizar los procesos de tratamiento de aguas.

¿Cómo funciona la nanoremediación?

La implementación de nanotecnología para la remediación de vertimientos de aguas residuales consiste en el uso de nanomateriales, caracterizados por tener un



tamaño inferior a los 100 nanómetros y que, gracias a propiedades como la selectividad, el grado de absorción y/o adsorción, la reactividad, la disponibilidad de área superficial y la estabilidad, entre otras, permiten optimizar los procesos de tratamiento de agua.

Dentro de sus beneficios se encuentran la remoción de material orgánico e inorgánico, la eliminación de metales presentes, la oxidación y reducción de contaminantes, la

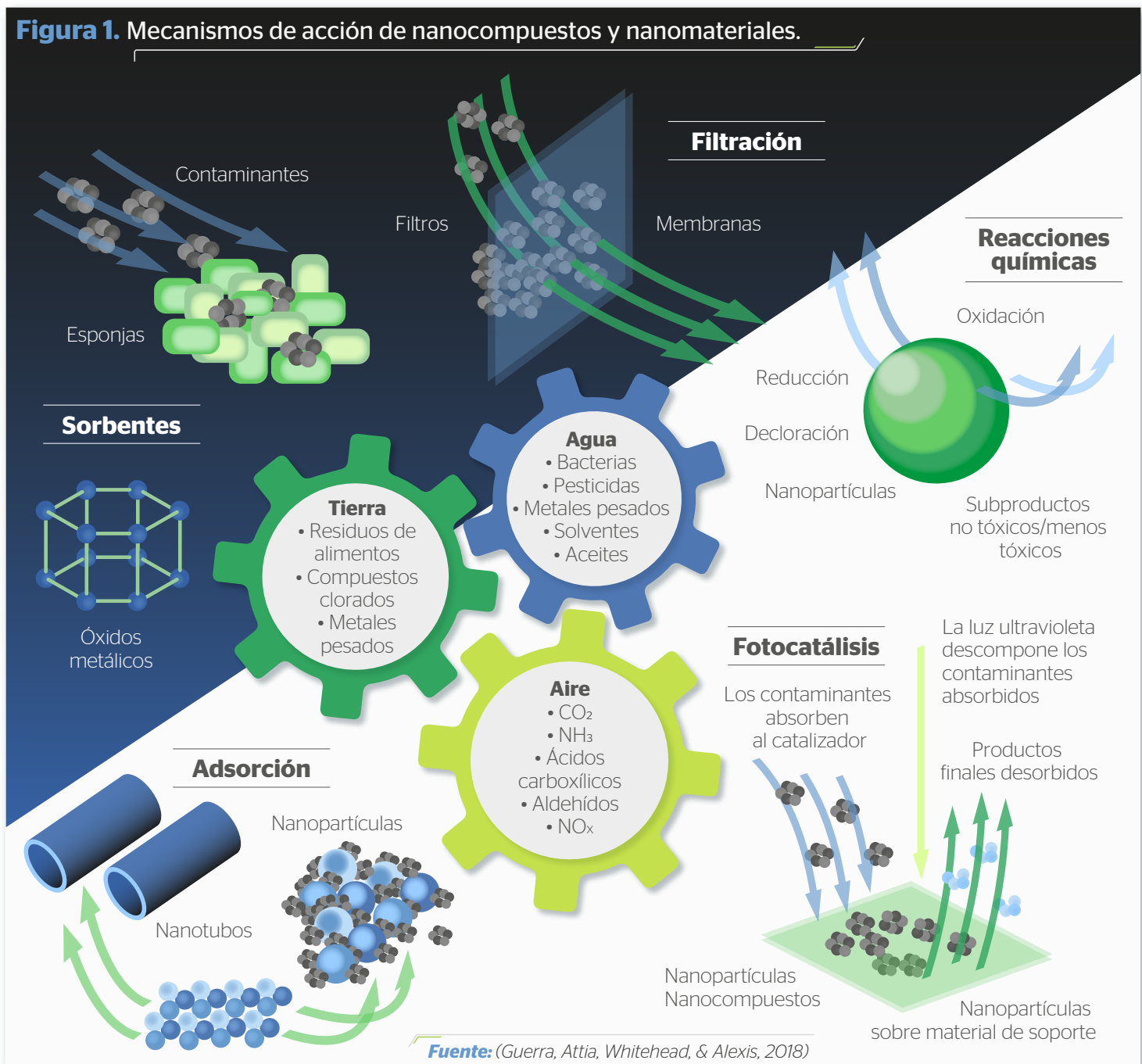
inactivación y eliminación de virus y bacterias, así como el monitoreo de la calidad del agua a través de nanosensores. De igual forma, a nivel operativo, la nanotecnología es una alternativa que permite simplificar los procesos, reducir los costos a largo plazo, incrementar la efectividad de remoción y tener una mayor aplicabilidad en lugares con escasos o deficientes sistemas de tratamiento de agua (Corporación Ruta N, 2016).

Según el tipo de nanomaterial, estos se clasifican en nanopartículas y en nanoestructuras. Las nanopartículas son partículas a nivel nanoscópico con una forma definida. Por su parte, las nanoestructuras son partículas a nivel macros-

cópico que cuentan con propiedades a escala nanométrica como porosidad o topografía superficial, características que permiten que estos sean funcionales para la nanoremediación (Boyd et al., 2013). A su vez, los nanomateriales se pueden dividir según su procedencia: por un lado, están los de origen natural y, por otro, los de origen sintético o nanomateriales diseñados con el objetivo de mejorar sus propiedades para incrementar su rendimiento en el proceso de remoción de contaminantes.

Existe gran variedad de nanomateriales que se pueden emplear en el tratamiento del agua. Sin embargo, dependiendo del tipo de contaminantes presentes en el efluente –factor

Figura 1. Mecanismos de acción de nanocompuestos y nanomateriales.



directamente ligado al tipo de industria que los genera—, y del mecanismo de acción con el cual desempeña el proceso, se puede realizar una selección adecuada del tipo de nanomaterial a utilizar. En la figura 1 se exponen los mecanismos de acción que emplean los nanomateriales para hacer la remediación de los contaminantes en las fuentes de agua.

A continuación se presentan algunos ejemplos de la implementación de nanomateriales para la remediación de vertimientos industriales.

Remoción de tintes orgánicos y cromo hexavalente en agua

Dentro de los procesos industriales de elaboración de productos textiles, así como en el curtido de cueros, se emplean diferentes compuestos químicos encargados de brindar el acabado deseado a las prendas. Por esta razón, en las aguas residuales de estas industrias se encuentran, entre otras, concentraciones elevadas de diversos tintes

orgánicos y de sales de cromo utilizadas en las etapas de teñido de fibras y pieles.

Para el tratamiento de los vertimientos mencionados anteriormente se han investigado varias alternativas. Ejemplo de ello es el estudio de la Escuela de Química y Ciencia de Materiales de la Universidad Ludong (China). En este se desarrollaron nanotubos de dióxido de titanio (TiO₂) con nanopartículas de Bi₂WO₆, dopadas de iones de antimonio (Sb³⁺) por síntesis solvotermal. A su vez, se evaluó la remoción de tintes orgánicos (rodamina, naranja de metilo, azul de metileno) y de moléculas de cromo hexavalente Cr(VI) por medio de reacciones de fotocatalisis. Como resultado, se estimó que los porcentajes alcanzados de remoción fueron del 80,58 % para rodamina, del 77,23 % para el naranja de metilo, del 99,06 % para el azul de metileno y del 93,84 % para los iones de cromo hexavalente (Q. Wang et al., 2020).

Otros ejemplos de nanocompuestos utilizados para la remoción de tintes orgánicos son:

Tabla 1. Nanocompuestos para la remoción de tintes

Nanocompuesto	Porcentaje de remoción	Bibliografía
Carbón activado cargado de nanopartículas de magnetita (Fe ₃ O ₄)	69,9 % (azul de metileno) y 83,8 % (verde brillante o zelyonka)	(Joshi, Garg, Kataria & Kadirvelu, 2019)
Nanopartículas de alúmina (Al ₂ O ₃) modificadas con dodecil sulfato de sodio	>95 % (rodamina)	(Chu et al., 2019)
Nanotubos de carbono multipared revertidos de óxido de zinc (ZnO)	99,8 % (rojo Congo)	(Seyed Arabi, Lalehloo, Olyai, Ali & Sadegh, 2019)
Nanopartículas de óxido de cobre (Cu ₂ O) sobre nanofibras de celulosa oxidada	>98 % (azul de metileno) (8 minutos). Incremento del 60 % frente a nanofibras de celulosa pura	(Valencia, Kumar, Nomena, Salazar-Álvarez & Mathew, 2020)
Nanopartículas de tetraóxido de cobalto (Co ₃ O ₄)	99 % (naranja de metilo)	(Uddin & Baig, 2018)
Nanopartículas de oro-arilo (Au-COOH) recubiertas de polianilina	85 % (azul de metileno)	(AlMashrea et al., 2020)

Remoción de metales pesados en agua

Los metales pesados comúnmente se definen como un grupo de elementos químicos relacionados entre sí por su potencial de contaminación, su toxicidad o por su daño ambiental. Dentro de esta categoría se encuentra el mercurio, el plomo, el cromo, el arsénico, el cadmio, entre otros elementos que han adquirido gran relevancia dado que la exposición a

estos y su bioacumulación puede generar diversas afectaciones a la salud, entre ellas, cáncer, daños neurológicos, alteraciones en el sistema nervioso central, distrofia muscular o enfermedades como la esclerosis múltiple o el Parkinson (Marimon Bolivar, 2018).

A nivel de contaminación de los cuerpos de agua, el mercurio es el metal pesado que mayor relevancia presenta en

Colombia. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), "Colombia es el cuarto país con más emisiones de este metal tóxico y el 94 % de este mercurio es emitido por el sector de la pequeña minería" (Naciones Unidas Colombia, 2020). Por consiguiente, se ha estudiado la implementación de nanopartículas para la recuperación y tratamiento de las aguas residuales en las cuales este metal se halla presente.

Algunos avances en este sentido son:

- Nanoestructuras de magnetita (Fe_2^+ , Fe_3^+) - Glutación que, gracias a

sus propiedades magnéticas, permite la adsorción de las moléculas de mercurio presentes en los efluentes. Según Marimon, los resultados de la implementación de esta técnica permiten reducir en más del 85 % la concentración inicial del mercurio luego de una hora de tratamiento (Marimon Bolívar, 2018).

- Nanotubos de carbono multipared magnéticos revestidos de azufre. De igual forma que en el caso anterior, usa la adsorción superparamagnética para retener las partículas de mercurio. A nivel experimental, se logró la remoción de alrededor del 90 % de este metal luego de tres

horas de ensayo a un pH de 4,5 (Fayazi, 2020).

- Nanopartículas de plata (Ag) ancladas en marcos orgánicos covalentes (COFs), las cuales mostraron un excelente desempeño de absorción de mercurio al tener un porcentaje de recuperación del 99 % luego de 10 minutos de tratamiento en aguas residuales ácidas, alcanzando su adsorción total a los 30 minutos (L. Wang et al., 2020).

Eliminación de arsénico en agua

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), a nivel industrial, el arsénico se encuentra en procesos de fabricación de textiles, pigmentos, vidrios, adhesivos metálicos, aleaciones, entre otros. Dentro de los efectos sobre la salud que genera la exposición a este elemento, dado su alto grado de toxicidad, están las lesiones cutáneas, el cáncer, los problemas en el desarrollo, la neurotoxicidad y las enfermedades pulmonares y/o cardiovasculares (Organización Mundial de la Salud - OMS, 2018).

En este sentido, para el tratamiento de agua contaminada con arsénico se han desarrollado nanocompuestos de bentonita-quitosano los cuales, a través de un proceso de adsorción, retienen las moléculas de tal elemento para disminuir la concentración en las aguas residuales.

Experimentalmente, según el estudio realizado por Ponce et al., – en el cual determinó el porcentaje de remoción de arsénico utilizando bentonita, quitosano y el nanocompuesto de bentonita-quitosano– se concluyó que al emplear únicamente bentonita se llegó al 70 % de remoción en 60 minutos, con quitosano la remoción fue del 97 % luego de 180 minutos; y utilizando el nanocompuesto de bentonita-quitosano el porcentaje de remoción fue de 86,5 % al transcurrir 15 minutos (Ponce, Cano, & Alvarez, 2021).



Remoción de pesticidas en agua

En el sector agroindustrial, la implementación de plaguicidas (insecticidas, herbicidas, fungicidas, entre otros) para el control de plagas y de fertilizantes para potenciar el crecimiento de los cultivos, hace que en el mercado exista gran variedad de productos con diferentes componentes o ingredientes activos.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), Colombia se encuentra dentro de los cinco países del mundo que tienen una mayor intensidad en el uso de este tipo de

productos. Al mismo tiempo, factores como la contaminación cruzada, el vertimiento accidental, la disposición de productos o envases, la escorrentía, las aguas residuales industriales, entre otros, son causantes de que se presenten concentraciones elevadas de plaguicidas en el agua, cuya exposición puede generar intoxicaciones, afectaciones a la salud y enfermedades crónicas en los seres humanos (Sagasta, Zadeh, & Turral, 2017).

En la tabla 2 se presentan algunos ejemplos de nanocompuestos empleados para la remoción de diferentes tipos de plaguicidas, junto con el porcentaje de remoción logrado durante el estudio.

Tabla 2. Nanocompuestos para la remoción de pesticidas

Nanocompuesto	Porcentaje de remoción	Tipo de plaguicida	Bibliografía
Nanopartículas de quitosano - óxido de zinc (ZnO)	99 %	Permetrina (Piretroide)	(Moradi Dehaghi, Rahmanifar, Moradi & Azar, 2014)
Palygorskita recubierta con nanopartículas de óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	92 %	Fenarimol (Pirimidina)	(Quali, Belaroui, Bengueddach, Galindo & Peña, 2015)
Nanopartículas de hierro cero-valente (Fe)	99,8 % (rojo Congo)	DDT (Organoclorado)	(Rani, Shanker & Jassal, 2017)
Nanopartículas recubiertas de sílice a base de óxido de grafeno funcionalizadas con 2-feniletilamina (Fe ₃ O ₄ -SiO ₂ -GO-PEA)	86,9 %	Clorpirifos, Malatión, Paratión (Organofosforados)	(Wanjeri, Sheppard, Prinsloo, Ngila & Ndungu, 2018)
Nanopartículas de hexacianoferrato de Zn, Cu, Co y Ni	Zn (91-98 %); Cu (85-91 %); Ni (73-85 %); Co (70-83 %)	Clorpirifos (Organofosforado) - Tiametoxam (Neonicotinoide) - Tebuconazol (Triazol)	(Rani & Shanker, 2018)
Nanopartículas de óxido de titanio (TiO ₂) recubiertas de espumas alveolares de carburo de silicio (β-SiC)	43 %	Paraquat (Bipiridilo)	(M'Bra et al., 2019)
Nanopartículas de quitosano recubiertas con dodecilsulfato de sodio	96 % - 98 %	Diazinón, Fosalona, Clorpirifos (Organofosforado)	(Ranjbar Bandforuzi & Hadjmohammadi, 2019)
Nanopartículas de óxido de titanio (TiO ₂) dopado con hierro (Fe)	64 % - 72 %	2,4-D Amina (Fenoxicético)	(AlMashrea et al., 2020)

Referencias

AlMashra, B. A., Abla, F., Chehimi, M. M., Workie, B., Han, C., & Mohamed, A. A. (2020). Polyaniline coated gold-aryl nanoparticles: Electrochemical synthesis and efficiency in methylene blue dye removal. *Synthetic Metals*, 269, 116528. <https://doi.org/10.1016/J.SYNTHMET.2020.116528>

Boyd, G. R., Tuccillo, M. E., Sandvig, A., Pelaez, M., Han, C., & Dionysiou, D. D. (2013). Nanomaterials: Removal processes and beneficial applications in treatment. *Journal - American Water Works Association*, 105(12), E699–E708. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2013.105.0154>

Chu, T. P. M., Nguyen, N. T., Vu, T. L., Dao, T. H., Dinh, L. C., Nguyen, H. L., ... Pham, T. D. (2019). Synthesis, characterization, and modification of alumina nanoparticles for cationic dye removal. *Materials*, 12(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma12030450>

Corporación Ruta N. (2016). Observatorio CT+i: Informe No.1 Área de oportunidad - Nanotecnología para el tratamiento de aguas. Retrieved October 26, 2021, from https://www.rutanmedellin.org/images/biblioteca/observatoriocti/05_TECNOLOGIAS_HABILITANTES/VT_NANOTECNOLOGIA-AGUAS_ITM.pdf

Ebrahimi, R., Maleki, A., Rezaee, R., Daraei, H., Safari, M., McKay, G., ... Jafari, A. (2020). Synthesis and Application of Fe-Doped TiO₂ Nanoparticles for Photodegradation of 2,4-D from Aqueous Solution. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2020 46:7, 46(7), 6409–6422. <https://doi.org/10.1007/S13369-020-05071-8>

El Tiempo. (2021, May 10). Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia - Medio Ambiente - Vida - ELTIEMPO.COM. Retrieved October 21, 2021, from <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-en-colombia-587364>

Fayazi, M. (2020). Removal of mercury(II) from wastewater using a new and effective composite: sulfur-coated magnetic carbon nanotubes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12270–12279. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07843-z>

Guerra, F. D., Attia, M. F., Whitehead, D. C., & Alexis, F. (2018). Nanotechnology for environmental remediation: Materials and applications. *Molecules*, 23(7), 1–23. <https://doi.org/10.3390/molecules23071760>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2017). Informe Nacional del Registro Único Ambiental Manufacturero – RUA MF 2009 a 2016. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023768/RUA_2016.pdf

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2018). Informe Nacional del Registro Único Ambiental Manufacturero – RUA MF 2017. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023852/Informe_RUAMF_2017.pdf

Joshi, S., Garg, V. K., Kataria, N., & Kadirvelu, K. (2019). Applications of Fe₃O₄@AC nanoparticles for dye removal from simulated wastewater. *Chemosphere*, 236, 124280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.011>

M'Bra, I. C., Atheba, G. P., Robert, D., Drogui, P., Trokourey, A., M'Bra, I. C., ... Trokourey, A. (2019). Photocatalytic Degradation of Paraquat Herbicide Using a Fixed Bed Reactor Containing TiO₂ Nanoparticles Coated onto - SiC Alveolar Foams. *American Journal of Analytical Chemistry*, 10(5), 171–184. <https://doi.org/10.4236/AJAC.2019.105015>

Marimon Bolivar, W. (2018). Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. Diario Oficial No. 49.486 de 18 de Abril de 2015, 2015(49), 73. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

Moradi Dehaghi, S., Rahmanifar, B., Moradi, A. M., & Azar, P. A. (2014). Removal of permethrin pesticide from water by chitosan-zinc oxide nanoparticles composite as an adsorbent. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(4), 348–355. <https://doi.org/10.1016/J.JSCS.2014.01.004>



Referencias



Naciones Unidas Colombia. (2020, June 4). Unidos por la naturaleza para una Colombia libre de mercurio - Naciones Unidas Colombia | CINU. Retrieved October 25, 2021, from <https://nacionesunidas.org.co/noticias/actualidad-colombia/unidos-por-la-naturaleza-para-una-colombia-libre-de-mercurio/>

Organización Mundial de la Salud - OMS. (2018, February 15). Arsénico. Retrieved October 26, 2021, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

Ouali, A., Belaroui, L. S., Bengueddach, A., Galindo, A. L., & Peña, A. (2015). Fe₂O₃-palygorskite nanoparticles, efficient adsorbates for pesticide removal. *Applied Clay Science*, 115, 67-75. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2015.07.026>

Ponce, J. A., Cano, L. A., & Alvarez, V. A. (2021). Desarrollo de nanocompuestos matriz polimérica / bentonita para la eliminación de arsénico en aguas (Universidad Nacional de Mar de Plata). Retrieved from <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/508/JAPONce-TFG-IM-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rani, M., & Shanker, U. (2018). Removal of chlorpyrifos, thiamethoxam, and tebuconazole from water using green synthesized metal hexacyanoferrate nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research* 25:11, 25(11), 10878-10893. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-1346-2>

Rani, M., Shanker, U., & Jassal, V. (2017). Recent strategies for removal and degradation of persistent & toxic organochlorine pesticides using nanoparticles: A review. *Journal of Environmental Management*, 190, 208-222. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.068>

Ranjbar Bandforuzi, S., & Hadjmohammadi, M. R. (2019). Modified magnetic chitosan nanoparticles based on mixed hemimicelle of sodium dodecyl sulfate for enhanced removal and trace determination of three organophosphorus pesticides from natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 1078, 90-100. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2019.06.026>

Sagasta, J. M., Zadeh, S. M., & Turrall, H. (2017). Water pollution from agriculture: a global review - Executive summary. 35. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i7754e.pdf>

Seyed Arabi, S. M., Lalehloo, R. S., Olyai, M. R. T. B., Ali, G. A. M., & Sadegh, H. (2019). Removal of congo red azo dye from aqueous solution by ZnO nanoparticles loaded on multi-wall carbon nanotubes. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 106, 150-155. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSE.2018.10.030>

Uddin, M. K., & Baig, U. (2018). Synthesis of Co₃O₄ nanoparticles and their performance towards methyl orange dye removal: Characterisation, adsorption and response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.232>

Urrego, A. (2021, March 30). Curtiembres actualizan sus plantas de tratamiento para mitigar el impacto ambiental. Retrieved from <https://www.larepublica.co/especiales/rse-y-sostenibilidad/curtiembres-actualizan-sus-plantas-de-tratamiento-para-mitigar-el-impacto-ambiental-3146305>

Valencia, L., Kumar, S., Nomena, E. M., Salazar-alvarez, G., & Mathew, A. P. (2020). In-Situ Growth of Metal Oxide Nanoparticles on Cellulose Nano fibers for Dye Removal and Antimicrobial Applications. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01511>

Wang, L., Xu, H., Qiu, Y., Liu, X., Huang, W., Yan, N., & Qu, Z. (2020). Utilization of Ag nanoparticles anchored in covalent organic frameworks for mercury removal from acidic waste water. *Journal of Hazardous Materials*, 389(October), 121824. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121824>

Wang, Q., Li, H., Yu, X., Jia, Y., Chang, Y., & Gao, S. (2020). Morphology regulated Bi₂WO₆ nanoparticles on TiO₂ nanotubes by solvothermal Sb³⁺ doping as effective photocatalysts for wastewater treatment. *Electrochimica Acta*, 330, 135167. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135167>

Wanjeri, V. W. O., Sheppard, C. J., Prinsloo, A. R. E., Ngila, J. C., & Ndungu, P. G. (2018). Isotherm and kinetic investigations on the adsorption of organophosphorus pesticides on graphene oxide based silica coated magnetic nanoparticles functionalized with 2-phenylethylamine. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1333-1346. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2018.01.064>