

Nanotecnología al rescate del agua: innovación en el tratamiento de aguas residuales

Mtra. Gerdany Zúñiga Verdugo

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

Dra. Mirella Gutiérrez Arzaluz

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e
Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

**Dra. Alejandra Montserrat Navarrete
López**

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

20 μm



EHT = 15.00 kV

WD = 8.7 mm

Signal A

Mag = 5

Abstract

Many innovative techniques have been developed to tackle the detrimental impacts of pollutants on the environment and human health. Among these, nanomaterials emerge as particularly remarkable due to their unique properties. Defined by their minuscule size, a carbon nanotube measuring just 1 nanometer in diameter would require 100,000 lined up to match the width of a single human hair. This tiny size confers remarkable properties upon nanomaterials, including high reactivity and efficiency, cost-effectiveness, straightforward synthesis, non-toxicity, biodegradability, and recyclability. Harnessing these exceptional properties, nanomaterials are making significant strides across various fields such as agriculture, electronics, medicine, sensors, and, notably, environmental remediation. Nanomaterials shine in the crucial wastewater treatment and recovery area by effectively eliminating various pollutants, including organic compounds, heavy metals, salts, and fine suspended particles. This fact positions them as a revolutionary solution for cleaning wastewater without resorting to harmful chemicals or excessive energy consumption. The transformative potential of nanomaterials will continue to expand as we tailor their applications to meet specific treatment needs, paving the way for a cleaner, healthier future.

Keywords: Emerging contaminants, Nanomaterials, Environmental remediation, Wastewater treatment.

Resumen

Se han desarrollado numerosas técnicas para mitigar los efectos perjudiciales de los contaminantes en el medio ambiente y la salud humana. Entre ellas, los nanomateriales resultan especialmente

destacables por sus propiedades únicas. Definidos por su minúsculo tamaño, se requerirían 100,000 nanotubos de un nanómetro de diámetro alineados para igualar el grosor de un cabello humano. Este diminuto tamaño confiere a los nanomateriales propiedades sobresalientes, como alta reactividad y eficiencia, rentabilidad, síntesis sencilla, no toxicidad, biodegradabilidad y reciclabilidad. Gracias a estas propiedades, la nanotecnología está logrando avances significativos en diversos campos, como la agricultura, la electrónica, la medicina, los sensores y, en particular, la remediación ambiental. Los nanomateriales destacan en el ámbito del tratamiento y la recuperación de aguas residuales, eliminando eficazmente diversos contaminantes, como compuestos orgánicos, metales pesados, sales y partículas finas en suspensión. Esto los posiciona como una solución revolucionaria para la depuración de aguas residuales sin recurrir a productos químicos nocivos ni a un consumo excesivo de energía. El potencial transformador de los nanomateriales seguirá expandiéndose a medida que adaptemos sus aplicaciones para satisfacer necesidades de tratamiento específicas, allanando el camino para un futuro más limpio y saludable.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, Nanomateriales, Remediación ambiental, Tratamiento de aguas residuales.

**PEQUEÑA PERO PODEROSA...
CÓMO LA NANOCIENCIA ESTÁ
TRANSFORMANDO EL AMBIENTE**

Para entender cómo funcionan los nanomateriales es necesario adentrarnos en el asombroso mundo de la nanociencia, la cual se ocupa del estudio de la materia en tamaño

nanométrico, donde el nanómetro representa la mil millonésima parte de un metro... Si tuviéramos un nanotubo de carbono de 1 nanómetro de diámetro,

necesitaríamos 100,000 unidades para llegar al espesor de un cabello humano (Figura 1).

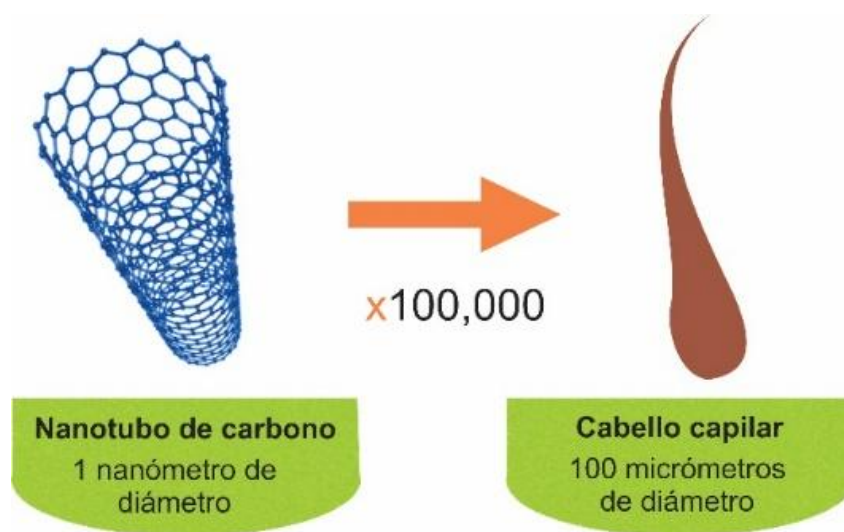


Figura 1: Diferencia de dimensiones entre un nanotubo de carbono y un cabello humano.

La nanotecnología se enfoca en la investigación de la manipulación de estos materiales para obtener propiedades de interés y los nanomateriales son aquellos que tienen tamaños menores a 100 nm (Tripathy *et al.*, 2024). Estos pueden tener diferentes formas y se pueden clasificar

por su dimensión: Los de dimensión cero, 0D, son las nanopartículas (NP); los unidimensionales, 1D, son las nanobarras o nanotubos; los bidimensionales, 2D, son las películas y finalmente, los tridimensionales, 3D, son aglomeraciones en masa, como se ilustra en la Figura 2.

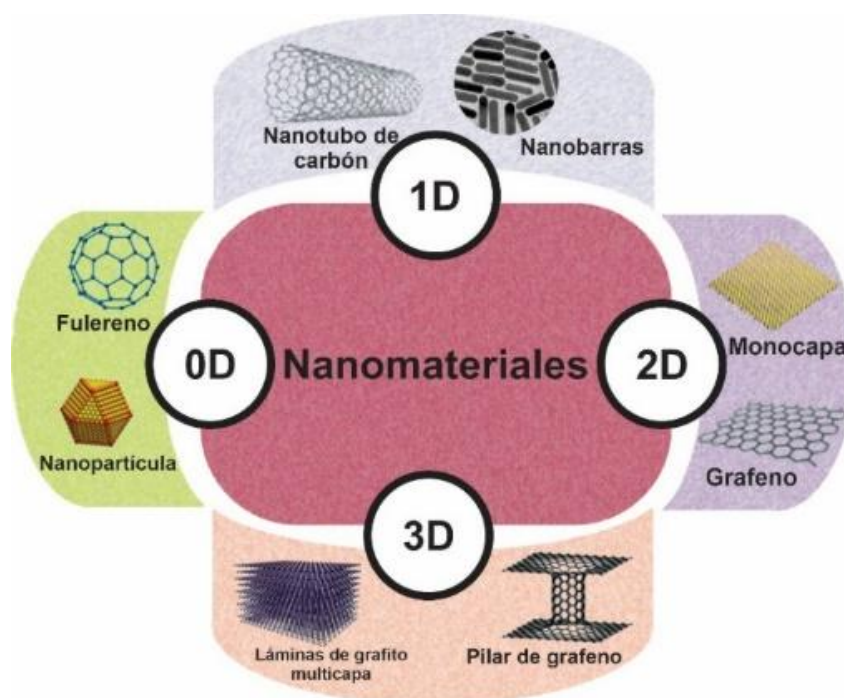


Figura 2: Nanomateriales clasificados por su dimensión

En general, al disminuir el tamaño de partícula se propicia el aumento de la cantidad de partículas en la superficie, promoviendo una mayor área de contacto (Altammar, 2023). Esta característica es importante porque las nanopartículas (NP) tienen una gran

relación superficie-volumen, obteniendo diferentes propiedades. Además de esta relación, sus propiedades varían dependiendo de su tamaño, composición química, morfología, porosidad, tamaño y estructura (Figura 3) (Ghongade & Vitthal, 2022).

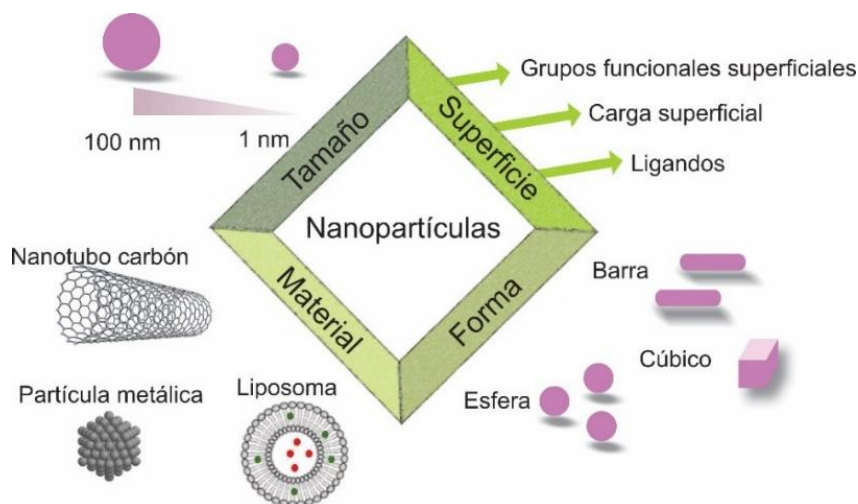


Figura 3: Propiedades de las nanopartículas

Teniendo en cuenta estas propiedades únicas de los nanomateriales, se han podido aplicar a diversas áreas como la agricultura, la electrónica, la medicina, los sensores y la remediación ambiental (Figura 4) (Singh *et al.*, 2020). Algunos ejemplos incluyen la liberación controlada de medicamentos

(medicina), pantallas flexibles y sensores (electrónica), generación de celdas solares y almacenamiento de energía (energía y sensores), pesticidas y fertilizantes (agricultura) purificación y tratamiento de aguas residuales (remediación ambiental) (Ghongade & Vitthal, 2022; Singh *et al.*, 2020).

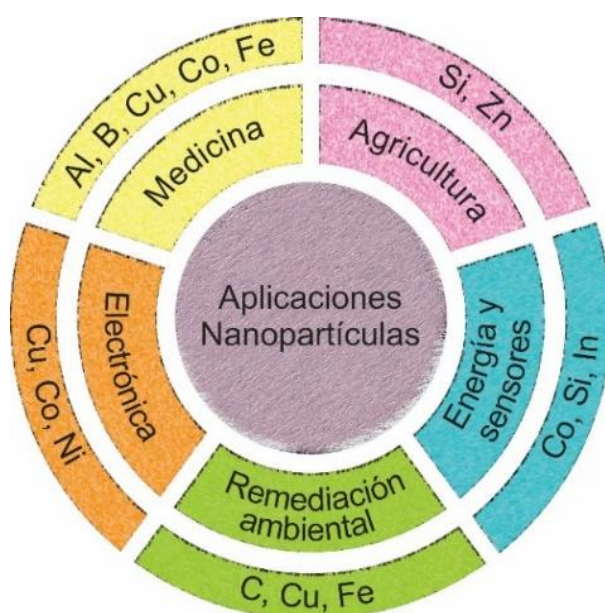


Figura 4: Áreas de aplicación con nanopartículas

Esta última aplicación es de gran importancia, ya que uno de los problemas principales para la humanidad es la contaminación ambiental, donde continuamente se buscan nuevas tecnologías para afrontar esta problemática. Las partículas en suspensión, los metales pesados, los pesticidas, los herbicidas, los fertilizantes, los derrames de petróleo, los gases tóxicos, los efluentes industriales, las aguas residuales y los compuestos orgánicos son solo algunos ejemplos de los muchos contaminantes preocupantes y que se pueden tratar con NP (Guerra *et al.*, 2018).

Con respecto a la remediación ambiental, el tratamiento del agua es el área con mayor aplicación de nanomateriales. Esto se debe a la gran variedad de posibilidades que brindan, como la remoción de compuestos orgánicos disueltos, metales pesados, sales y partículas finas suspendidas. La nanoingeniería de materiales se puede

aplicar a todas las áreas de tratamiento del agua; sin embargo, se sigue explorando cómo disminuir sus costos (Tripathy *et al.*, 2024; Altammar, 2023).

REMEDIACIÓN AMBIENTAL CON NANOTECNOLOGÍA: PEQUEÑAS SOLUCIONES PARA GRANDES PROBLEMAS

Los contaminantes pueden originarse por diversas actividades humanas o por desastres naturales y en muchas ocasiones representan una amenaza para el ambiente y la salud humana. Para mitigar sus efectos se han desarrollado diversas técnicas de remediación ambiental, cuyo objetivo no solo es restaurar los ecosistemas afectados, sino también prevenir la propagación de la contaminación y frenar la degradación ambiental (Ugrina y Jurić, 2023). Las técnicas convencionales para dicha remediación ambiental incluyen métodos biológicos, químicos y físicos (Figura 5).

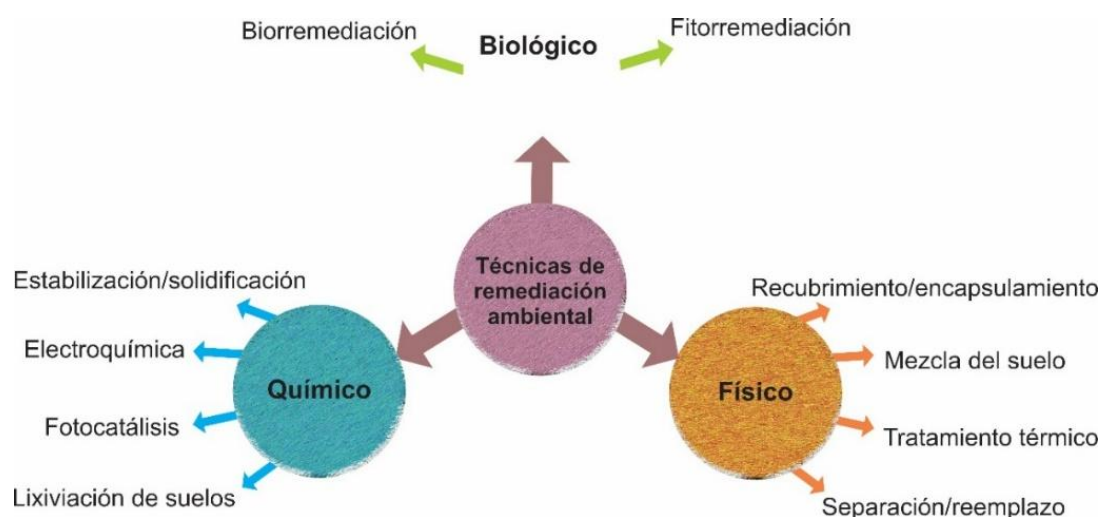


Figura 5: Técnicas de remediación ambiental.

La remediación biológica emplea agentes biológicos, como plantas o microorganismos, para reducir, eliminar o inmovilizar contaminantes mediante procesos como la fitorremediación y biorremediación. La remediación

química, por su parte, se aplica a suelos, cuerpos de agua y aire contaminados, utilizando agentes químicos y sustancias activas capaces de descomponer contaminantes. Entre sus principales técnicas se incluyen la

lixiviación de suelos, la electroquímica, la estabilización/solidificación y la fotocatalisis. Por último, la remediación física se emplea con mayor frecuencia a suelos contaminados y consiste en la eliminación de contaminantes a través de mecanismos físicos, como el recubrimiento/encapsulamiento del suelo, la separación/reemplazo, la mezcla y el tratamiento térmico (Ugrina y Jurić, 2023).

Si bien existen diversas técnicas de remediación para la remediación de entornos contaminados, la elección de la técnica adecuada es compleja y depende de múltiples factores, como la composición y concentración de contaminantes, los costos operativos, la eficiencia, la viabilidad, la aplicabilidad y el impacto ambiental final (Tripathy *et al.*, 2024; Ugrina y Jurić, 2023).

Recientemente ha surgido un interés en el uso de nanopartículas como nueva

tecnología de remediación química. Esto debido a que presentan una gran reactividad y eficacia, en comparación con otros materiales. Propiedades de los nanomateriales como la rentabilidad, la síntesis sencilla, la química ecológica, la no toxicidad, la biodegradabilidad, la reciclabilidad y su potencial reúso son claves para su aplicación en la remediación ambiental (Guerra *et al.*, 2018).

La nanotecnología tiene una amplia gama de aplicaciones para resolver los problemas involucrados en la remediación ambiental, debido a sus diferentes propiedades, como las ya mencionadas, que permiten su uso en el tratamiento de agua, suelo y aire, donde comúnmente se pueden usar en diferentes procesos como la adsorción o reacciones de reducción/oxidación, por mencionar algunos (Figura 6) (Singh *et al.*, 2020).

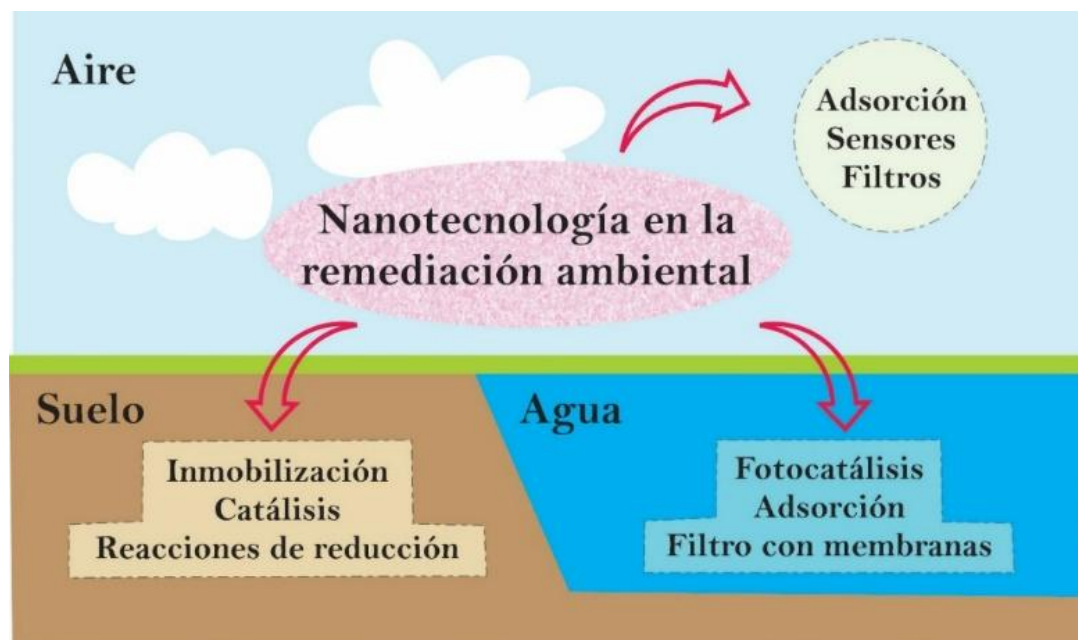


Figura 6: Aplicaciones de la nanotecnología en la remediación ambiental.

Dentro del área de aplicación de las NP en la remediación ambiental existen 3 categorías: 1) productos respetuosos con el medio ambiente, 2) remediación de

materiales contaminados con sustancias peligrosas y 3) sensores (Altammar, 2023).

En el caso de la categoría 1, se trata de la química verde. Pero ¿a qué nos referimos con este término? La química verde implica la elaboración de nanomateriales utilizando compuestos no tóxicos, sostenibles y que no representen un riesgo para el medio ambiente ni agraven los problemas ecológicos existentes. Se promueve el uso de recursos naturales renovables, minimizando al máximo el impacto ambiental relacionado a su producción (Altammar *et al.*, 2023).

En cuanto a la categoría 2, esta se enfoca en utilizar nanomateriales para la degradación eficiente y acelerada de contaminantes. Un ejemplo común es la remoción de metales pesados en agua o suelos, los cuales son difíciles de remover mediante tratamientos convencionales. En estos casos, los nanomateriales son una gran alternativa para este desafío (Altammar, 2023; Ghongade & Vitthal, 2022).

Por último, en la categoría 3 se encuentran los sensores, que son

dispositivos capaces de detectar estímulos en el entorno y responder de manera eficiente a ellos. Estos pueden estar diseñados para medir parámetros como temperatura, humedad o presión, así como para identificar la presencia de sustancias de interés como, por ejemplo, los contaminantes. El desarrollo de sensores nanotecnológicos busca mejorar significativamente la detección oportuna y, con esto, facilitar acciones rápidas para la remediación del medio ambiente (Zhang *et al.*, 2021).

Existen diversos nanomateriales que se han utilizado en los campos de la remediación ambiental como aquellos basados en nanotubos de carbono, materiales magnéticos o metales y sus óxidos como, por ejemplo, el hierro cero valente (Figura 7). Una aplicación frecuente de este último nanomaterial es la remoción de metales pesados, tales como mercurio, plomo y cadmio, en agua para consumo humano (Altammar, 2023; Ghongade & Vitthal, 2022).

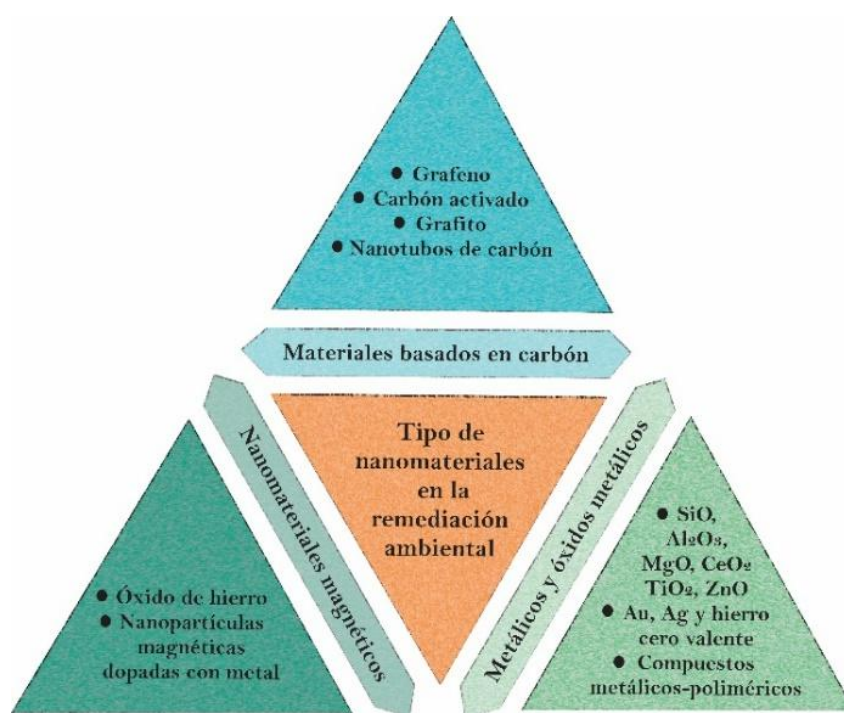


Figura 7: Tipos de nanomateriales en la remediación ambiental.

Otros nanomateriales sobresalientes son las NP de magnetita, debido a su alta capacidad de adsorción, gran estabilidad, fácil recuperación y bajo costo, lo que las convierte en una opción prometedora para la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales (Tripathy *et al.*, 2024).

En el caso de remediación del suelo, los nanomateriales se han llegado a utilizar para remover contaminantes como metales pesados, herbicidas y compuestos orgánicos persistentes. Todas estas sustancias químicas se caracterizan por que no se degradan fácilmente, permaneciendo por largos periodos en el ambiente y llegando inclusive a acumularse en los tejidos de los seres vivos, causando enfermedades cardiovasculares, inmunológicas y endocrinas (Guerra *et al.*, 2018).

Los procesos más comúnmente utilizados para el manejo de contaminantes ambientales son la inmovilización y la adsorción, empleando, por ejemplo, nanomateriales basados en carbón, óxidos metálicos y compuestos de diversos materiales. Usando NP de óxido de hierro se puede inmovilizar y adsorber cadmio y arsénico del suelo. Otro ejemplo, son las NP que utilizan procesos de oxidación avanzada, los cuales emplean diversos oxidantes para la descomposición de contaminantes orgánicos en suelos contaminados (Altammar, 2023).

Compuestos gaseosos como los óxidos de nitrógeno y de azufre, el monóxido de

carbón y el ozono, compuestos orgánicos volátiles y material particulado, importantes contaminantes del aire, también pueden ser removidos con nanomateriales mediante fotocátalisis con dióxido de titanio (Ghongade & Vitthal, 2022).

Con ayuda de la nanotecnología es posible hacer una remoción efectiva de sustancias orgánicas, inorgánicas, patógenos y metales tóxicos en el agua, con beneficios tales como eficiencia operativa, bajos costos y disposición de reutilización (Tripathy *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2020).

De esta manera, el tratamiento y recuperación del agua es importante puesto que es un recurso esencial que hoy enfrenta grandes retos. ¿Cómo pueden ayudarnos estas nanopartículas en la descontaminación de aguas residuales? Lo exploraremos a continuación.

NANOPARTÍCULAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: INNOVACIÓN PARA UN RECURSO ESENCIAL

El tratamiento que comúnmente se da a las aguas residuales (AR) puede ser físico, químico o biológico, aunque, por lo general se aplica una combinación de estos. Los métodos fundamentales de tratamiento consisten en 4 pasos: tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario (Figura 8) (Epelle *et al.*, 2022).

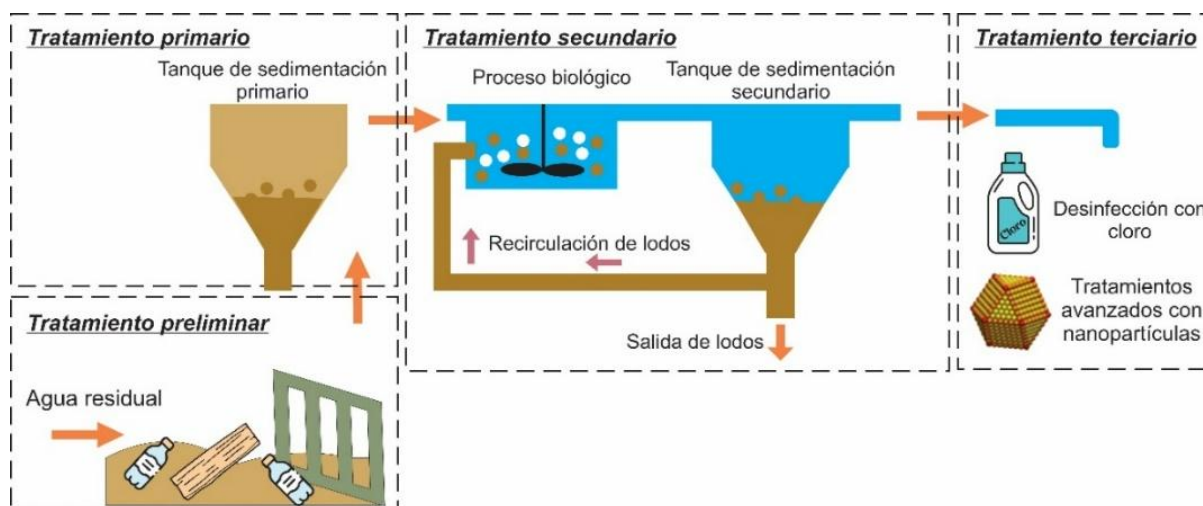


Figura 8: Etapas del tratamiento de las aguas residuales

Tratamiento preliminar: consiste en eliminar los materiales de mayor tamaño mediante rejas metálicas para retener materiales como plásticos, papel, madera, etc.

Tratamiento primario elimina una cantidad significativa de sólidos suspendidos y flotantes mediante sedimentadores, los cuales utilizan la acción de la gravedad para separar estos materiales del agua. Para mejorar la sedimentación, en ocasiones, se utilizan coagulantes que suelen ser costosos y tienen propiedades corrosivas.

Tratamiento secundario: se enfoca en la eliminación de contaminantes mediante procesos biológicos, es decir, que emplean microorganismos que utilizan los contaminantes como alimento, removiéndolos del agua. Este proceso genera nuevos microorganismos, también llamados biomasa, la cual se remueve en otro sedimentador, también por acción de la gravedad. Una desventaja de este tratamiento es que no eliminan de manera efectiva los contaminantes emergentes, como medicamentos y productos de limpieza doméstico.

Tratamiento secundario: por último,

se eliminan los nutrientes, patógenos, olores o contaminantes que no se removieron en los tratamientos anteriores. Así, se utilizan técnicas fisicoquímicas, como la desinfección, la adsorción con carbón activado o la ósmosis inversa. Además, tecnologías de oxidación avanzada, como la fotocatalisis y la fotoelectrocatalisis, son enfoques nanotecnológicos prometedores para la remediación del agua, ya que usan catalizadores semiconductores en forma de nanomateriales.

A pesar de que las plantas de tratamiento de AR están diseñadas para eliminar una gran variedad de contaminantes, como partículas suspendidas y coloidales, nutrientes, patógenos y materia orgánica, suelen ser ineficaces frente a los contaminantes emergentes (CE). Esto provoca que el agua tratada no siempre cumpla con los estándares internacionales, ya que los CE representan un riesgo para la salud humana y los ecosistemas, ya pesar de encontrarse en concentraciones tan pequeñas como ng/L o $\mu\text{g/L}$ (Mahmood *et al.*, 2022).

Los CE están constituidos por lo que queda en el agua residual después del uso de productos de cuidado

personal, medicamentos, colorantes, microorganismos, pesticidas, hormonas y metales pesados. Algunos también pueden acumularse en los tejidos, afectando el desarrollo y crecimiento (Solcova *et al.*, 2024; Mahmood *et al.*, 2022). Además, se han asociado con la resistencia antimicrobiana, efectos neurotóxicos y la posible generación de tumores (Mahmood *et al.*, 2022).

Debido a sus concentraciones tan pequeñas, representan un enorme reto tratarlas con los sistemas convencionales de tratamiento, como

los que ya describimos.

Por esta razón, los nanomateriales se han convertido en una alternativa excelente para su remoción, y recientemente han comenzado a aplicarse para el tratamiento de diversos CE. Gracias a la gran área superficial y capacidad de adsorber diferentes contaminantes (Figura 9), los nanomateriales son ideales para enfrentar este desafío (Solcova *et al.*, 2024).

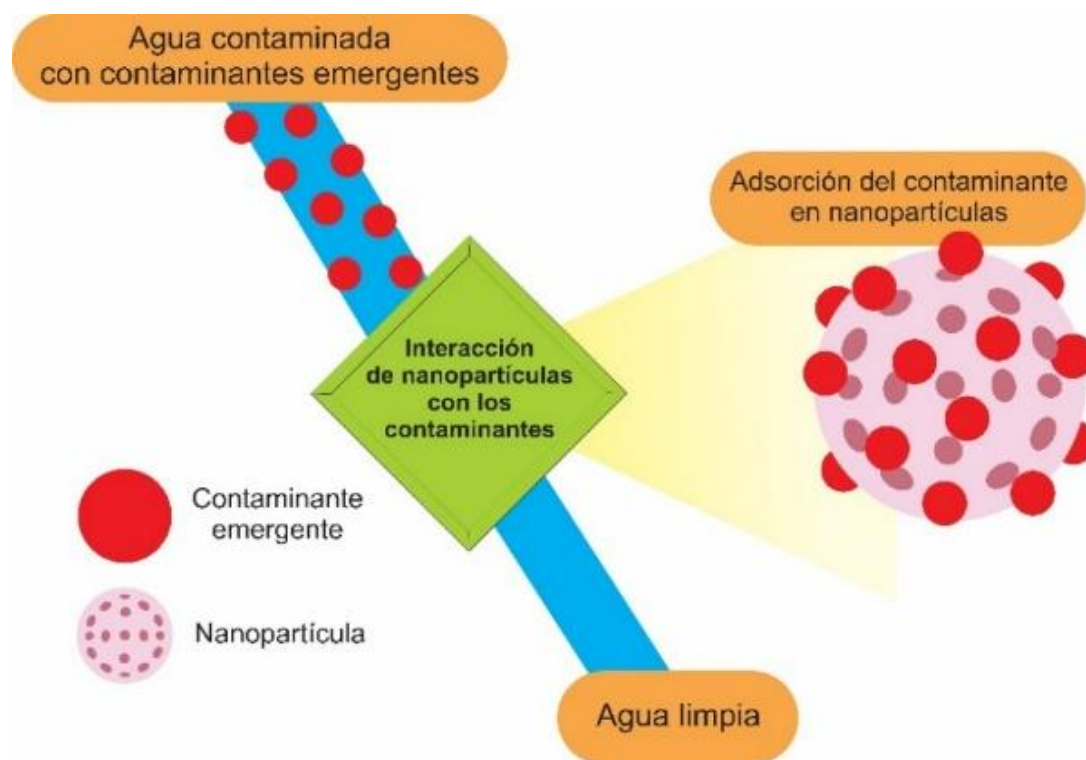


Figura 9: Interacción de nanopartículas usados en la etapa terciara para remover contaminantes emergentes.

El tratamiento de las AR con NP para remover CE incluye diferentes técnicas como procesos con membranas, fotocatalisis y adsorción, en las cuales se incorporan nanopartículas para mejorar su eficiencia en la remoción de diversos CE, como se muestra en la Tabla 1 (Tripathy *et al.*, 2024; Epelle

et al., 2022; Guerra *et al.*, 2018). Cada una de estas técnicas está orientada a eliminar grupos específicos de CE. Además, la combinación de técnicas y de diferentes nanomateriales puede mejorar significativamente la eficiencia de la remoción (Mahmood *et al.*, 2022).

Tabla 1. Aplicaciones de diferentes materiales de NP para la remoción de CE.

Técnica	Material	Aplicación
Adsorción	Nanotubos de carbono	Remoción de medicamentos como diclofenaco y amoxicilina
	Óxidos metálicos	Remoción de colorantes, pesticidas y medicamentos
Procesos con membranas	Nanofibras con plata	Actividad antimicrobiana y remoción de colorantes
Fotocatálisis	ZnO	Remoción de pesticidas, medicamentos y colorantes
	TiO ₂	Remoción de pesticidas y medicamentos

Gracias a sus propiedades, tales como su pequeño tamaño y gran relación superficial, los nanomateriales son candidatos prometedores para eliminar contaminantes en los tratamientos de las AR, sin la dependencia de utilizar productos químicos nocivos ni de uso excesivo de energía. Cada una de las diferentes aplicaciones de los nanomateriales dependerá del tratamiento que se quiera realizar para la remediación del agua (Ugrina y Jurić, 2023).

Diversos estudios han demostrado la efectividad de las NP en la eliminación de contaminantes en aguas residuales e industriales. Por ejemplo, las NP de CuO han mostrado una capacidad antimicrobiana notable, logrando eliminar el 92% de *Eenterococcus faecalis* y también una degradación fotocatalítica del 76% del tinte negro reactivo 5. Por su parte, en el caso de antibióticos, como la oxitetraciclina, se ha reportado una remoción del 96% mediante el uso de $MnFe_2SO_4$ soportado en bentonita bajo irradiación con luz visible (Epelle *et al.*, 2022).

En cuanto a metales pesados, las NP de óxido de hierro han sido eficaces para

la adsorción de cromo (VI), alcanzando una eficiencia del 98.1%. Para colorantes como el azul de metileno, se ha logrado una remoción del 90% utilizando hidrogeles con NP de magnetita. Además, las NP de plata integradas en membranas han demostrado ser altamente eficientes en la eliminación de bacterias como *Escherichia coli*, con porcentajes de remoción cercanos al 99%, lo que las convierte en una alternativa prometedora para el tratamiento de AR (Guerra 2018).

Sin embargo, los nanomateriales enfrentan diversos desafíos para su implementación en el tratamiento de AR, siendo el principal obstáculo los costos asociados cuando se utilizan elementos de tierras raras para su creación. Por tanto, algunos nanomateriales son costosos para producirlos, lo que limita su uso a nivel escala industrial, sobre todo en regiones con recursos limitados. Es por ello que en el campo de la nanotecnología un área importante a explorar son síntesis rentables, sustentables y escalables (Tripathy *et al.*, 2024; Ugrina y Jurić, 2023).

A pesar de que los nanomateriales con frecuencia tienen altas capacidades

de adsorción, su eficiencia se puede ver afectada por otros compuestos que pueden competir con los contaminantes que se desean remover. Por tanto, aquí hay otro desafío que se debe de enfrentar, buscar materiales que tengan una gran afinidad con el contaminante objetivo, sin que se vea gravemente afectada por otros compuestos presentes en el AR. Esto puede implicar el desarrollo de nanomateriales diseñados específicamente para la remoción de un contaminante en particular o la integración de nanocompuestos con propiedades de adsorción selectiva (Tripathy *et al.*, 2024).

CONCLUSIONES

Con este artículo se ha evidenciado que la nanotecnología está logrando avances significativos en la remediación ambiental, pues el uso de nanomateriales permite recuperar eficazmente las aguas contaminadas eliminando sustancias como compuestos orgánicos, metales pesados, sales y partículas diminutas. Esto los posiciona como una opción prometedora para el tratamiento de las aguas residuales sin el uso de productos químicos dañinos ni consumo excesivo de energía, allanando el camino hacia un futuro más limpio. Además, la aplicación de las nanopartículas todavía es un campo con muchas áreas de oportunidad y de exploración para su aplicación en diversos campos, tales como la agricultura, la electrónica y la medicina, entre otras.

Referencias

- [1] Altammar, K. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 14, 2023.
- [2] Epelle, E., Okoye, P., Roddy, S., Gunes, B., Okolie, J. Advances in the Applications of Nanomaterials for Wastewater Treatment. *Environments*, 9, 2022.
- [3] Guerra, F.D., Attia, M.F., Whitehead, D.C., Alexis, F. (2018). Nanotechnology for Environmental Remediation: Materials and Applications. *Molecules*, 23, 2018
- [4] Ghongade, H.P., Vitthal, D.S. A review on nanoparticles – Classifications, synthesis and applications. *Int. J. Creat. Res. Thoughts*, 10[2], 2022.
- [5] Mahmood, T., Momin, S., Ali, R., Naeem, A., Khan, A. Technologies for removal of emerging contaminants from wastewater. *IntechOpen*, pp.1-20, 2022.
- [6] Singh, V., Chauhan, V., Singh, S., Shukla, S., Vishnolia, K.K., *Applications of Nanoparticles in Various Fields, Diagnostic Applications of Health Intelligence and Surveillance Systems*, IGI Global, 2020, pp.221–236. DOI: 10.4018/978-1-7998-6527-8.ch011.
- [7] Solcova, O., Dlaskova, M., Kastanek, F. Challenges and advances in tertiary wastewater treatment for municipal treatment plants. *Processes*, 12[10], 2024.
- [8] Tripathy, J., Mishra, A., Pandey, M., Thakur, R.R., Chand, S., Rout, P.R., Shahid, M.K. Advances in Nanoparticles and Nanocomposites for Water and Wastewater Treatment: A Review. *Water*, 16, 2024.
- [9] Ugrina, M., Jurić, A. Current Trends and Future Perspectives in the Remediation of Polluted

- Water, Soil, and Air: A Short Review. *Processes*, 11, 3270, 2023.
- [10] Zhang, Y., Zhu, Y., Zeng, Z., Zeng, G., Xiao, R., Wang, Y., Hu, Y., Tang, L., Feng, C. Sensors for the environmental pollutant detection: Are we already there? *Coordination Chemistry Reviews*, 431, 2021.