

Microfluídica para la Síntesis de Nanopartículas y su Aplicación en la Remediación de Agua

Microfluidic Nanoparticle Synthesis: Advances and Applications in Water Remediation

Espinoza Zallas Edgar Alberto¹, Encinas Osuna Ilse Guadalupe¹, Miranda Castro Fabiola Carolina^{1*}

¹ Universidad Estatal de Sonora, Unidad Académica Navojoa. Blvd. Manlio Fabio Beltrones 810, Bugambillas, Navojoa, Sonora, México, 85875.

* Autor para la correspondencia: Fabiola Carolina Miranda Castro fabiola.miranda@ues.mx

Resumen

La contaminación del agua causada por metales pesados y compuestos orgánicos representa un grave problema ambiental y de salud pública, particularmente en regiones como Sonora, México. En este contexto, la síntesis de nanopartículas (NPs) ha cobrado relevancia como alternativa eficiente para la remediación del agua. Este artículo de revisión presenta los fundamentos de la microfluídica como una tecnología emergente para la síntesis de NPs, destacando sus ventajas frente a métodos tradicionales. Se discuten los principios básicos de diseño de dispositivos microfluídicos, los mecanismos de síntesis, así como los tipos de NPs obtenidas y sus características fisicoquímicas. Asimismo, se analiza la aplicabilidad de estas NPs en la adsorción y degradación de contaminantes presentes en el agua. La microfluídica permite un control preciso de parámetros como el flujo, pH y temperatura, favoreciendo la producción de NPs homogéneas y personalizadas. Finalmente, se abordan los beneficios, limitaciones y perspectivas futuras de esta tecnología en el tratamiento sostenible del agua, posicionándose como una herramienta prometedora para enfrentar los desafíos ambientales actuales.

Palabras clave: microfluídica, nanopartículas, síntesis biogénica, remediación de agua.

Abstract

Water contamination caused by heavy metals and organic compounds is a major environmental and public health concern, especially in regions such as Sonora, Mexico. In this context, the synthesis of nanoparticles (NPs) has emerged as an efficient alternative for water remediation. This review article explores the fundamentals of microfluidics as an emerging technology for NP synthesis, highlighting its advantages over conventional methods. The basic principles of microfluidic device design, synthesis mechanisms, and types of NPs produced are discussed, along with their physicochemical characteristics. Additionally, the application of these NPs for contaminant adsorption and degradation in water is analyzed. Microfluidic systems allow precise control of parameters such as flow rate, pH, and temperature, promoting the production of homogeneous and tailored NPs. The article concludes by addressing benefits, limitations, and prospects of microfluidics in sustainable water treatment, positioning it as a promising tool to address current environmental challenges.

Key words: microfluidics, nanoparticles, biogenic synthesis, water remediation.

DOI: 10.46588/invurnus.v20i1.121

Recibido 23/04/2025

Aceptado 09/06/2025

Publicado 13/06/2025

Introducción

La contaminación del agua es un problema global urgente, causado principalmente por la descarga de metales pesados y compuestos orgánicos peligrosos provenientes de actividades industriales y agrícolas. Estos contaminantes representan una amenaza significativa para la salud humana y los ecosistemas, lo que exige soluciones innovadoras y eficientes para el tratamiento de aguas residuales (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, 2020).

En Sonora, México, la escasez de agua agrava el impacto de la contaminación debido a condiciones de sequía persistente. Además, las actividades mineras y agrícolas liberan contaminantes como arsénico, plomo, pesticidas y fertilizantes, lo que compromete aún más los recursos hídricos de la región (Balderrama-Carmona et al., 2019). Uno de los principales desafíos actuales es mejorar la calidad del agua, tanto para el consumo humano como para su uso recreativo. En el Plan 2030 de la OMS, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 establece la meta de garantizar agua limpia y saneamiento para todos, sin embargo, la contaminación del agua y las enfermedades asociadas continúan representando un riesgo significativo para la salud humana, con efectos adversos en el organismo (Saez et al., 2021).

En este contexto, las nanopartículas metálicas (NPs) han surgido como una alternativa prometedora para la remediación del agua debido a su gran área superficial, capacidad de adsorción y capacidad para degradar contaminantes orgánicos (Pinto et al., 2020). Sin embargo, los métodos convencionales de síntesis presentan desafíos como baja reproducibilidad y el uso de productos químicos tóxicos. Para superar estas limitaciones, la microfluídica ofrece un control preciso sobre las condiciones de síntesis, mejorando la reproducibilidad y eficiencia del proceso. Además, la síntesis biogénica mediante extractos de plantas proporciona un enfoque ecológico y biocompatible (Magdalene, D. J., & Muthuselvam, D. 2024).

En este sentido esta revisión se enfoca en explorar los avances recientes en la síntesis de nanopartículas por microfluídica, enfatizando sus ventajas sobre los métodos convencionales y sus aplicaciones en la remediación del agua.

Este artículo de revisión se basa en una recopilación y análisis de literatura científica reciente relacionada con la microfluídica aplicada a la síntesis de nanopartículas y su uso en la remediación de agua. Se consideraron publicaciones indexadas de los últimos cinco años, con especial atención a estudios experimentales y de aplicación práctica.

Fundamentos de la Microfluídica

Definición y Principios Básicos

La microfluídica implica la manipulación de fluidos a microescala, típicamente dentro de canales que van desde decenas hasta cientos de micrómetros de diámetro. Estos sistemas permiten un control preciso del flujo de fluidos, la mezcla y las condiciones de reacción, lo que los hace ideales para la síntesis de nanopartículas (Saez et al., 2021). Los dispositivos microfluídicos se basan en el flujo laminar, donde la difusión molecular domina sobre la turbulencia, permitiendo reacciones controladas y reproducibles.

El régimen de flujo en microcanales se describe mediante el número de Reynolds ($Re = \rho v D / \mu$), el cual expresa la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas. En sistemas microfluídicos, este valor es

típicamente inferior a 100, lo que asegura condiciones de flujo laminar (Nguyen & Wu, 2005; Whitesides, 2006). Este tipo de flujo es esencial para mantener un control preciso sobre las condiciones de reacción, ya que reduce la mezcla caótica y permite la reproducibilidad en los procesos.

Bajo flujo laminar, la mezcla entre fluidos ocurre predominantemente por difusión molecular, ya que la convección turbulenta está ausente (Stone et al., 2004). Esto resulta particularmente útil en aplicaciones donde se requiere un control fino de los gradientes de concentración, como en la síntesis de nanopartículas, donde el tamaño, forma y funcionalidad dependen críticamente de las condiciones locales de reacción (Khan et al., 2004).

Los mecanismos de transporte en microfluídica incluyen no solo la difusión y la convección controlada, sino también fenómenos como la electroforesis y la ósmosis, especialmente cuando se trabaja con soluciones cargadas o en sistemas bioquímicos complejos (Nguyen & Wu, 2005). El diseño de los microcanales, que puede incluir geometrías en forma de T, Y, serpentines u otras configuraciones más avanzadas, también impacta de forma significativa en la eficiencia de mezcla y en la cinética de las reacciones (Karnik, 2015).

Ventajas Sobre los Métodos Convencionales

En los últimos años, la microfluídica ha emergido como una nueva tecnología con diversas aplicaciones, en comparación con la síntesis tradicional de NPs, los sistemas microfluídicos proporcionan un control mejorado sobre las tasas de flujo y los parámetros de reacción, lo que garantiza una mayor reproducibilidad y uniformidad en el tamaño y morfología de las nanopartículas (Chhetri et al., 2022; Nti et al., 2023).

Además, la microfluídica mejora la eficiencia al acelerar la cinética de reacción y optimizar la transferencia de masa, lo que reduce el consumo de reactivos y acorta el tiempo de reacción (Shi, H et al., 2019). Otra ventaja significativa es la integración de los principios de la síntesis biogénica, ya que las plataformas microfluídicas facilitan el uso de agentes reductores y estabilizantes naturales provenientes de extractos vegetales, minimizando así el impacto ambiental (Magdalene, D. J., Muthuselvam, D., & Pravinraj, T. 2021).

Las nanopartículas cuentan con propiedades únicas específicas como tamaño reducido, mayor área superficial, y una alta relación superficie-volumen, estas son características esenciales para diversas aplicaciones entre las que destaca la remediación de agua. La producción de nanomateriales mediante técnicas convencionales como el secado por pulverización, la polimerización en emulsión y la polimerización en dispersión da lugar a posibles partículas con una polidispersidad drástica, poca diversidad funcional, escasa reproducibilidad y forma irregular (Kumari, 2023).

Por otra parte, la síntesis química de NPs se caracteriza por su alta eficiencia y versatilidad, pero implica el uso de reactivos tóxicos y desechos contaminantes. Por último, la síntesis “verde” (biogénica) de las NPs ha sido de gran interés en los últimos años debido a que emplea extractos naturales de plantas, hongos o bacterias como agentes reductores y/o estabilizadores, lo que reduce la toxicidad y favorece la biocompatibilidad, sin embargo, puede presentar desafíos en la estabilidad y escalabilidad. Dado que cada enfoque tiene ventajas y desventajas, los sistemas microfluídicos surgen como una solución innovadora, permitiendo la producción de NPs más pequeñas, homogéneas y personalizadas. En la Tabla 1 se muestran

los resultados comparativos al utilizar métodos de síntesis de nanopartículas convencionales vs microfluídica.

Tabla 1. Comparación entre la síntesis de nanopartículas por métodos tradicionales y microfluídica

Criterio	Síntesis tradicional	Síntesis por Microfluídica	Referencias
Tamaño de partícula (nm)	30-100	10-50	Kulkarni & Goel, 2020; Chhetri et al., 2022
Polidispersidad	Alta	Baja	Gimondi et al., 2023; Shi et al., 2019
Tiempo de reacción	Minutos a horas	Segundos a minutos	Magdalene et al., 2024; Shi et al., 2019
Control de parámetros	Limitado (mezcla por difusión natural)	Alto (flujo, temperatura, pH controlados con precisión)	Saez et al., 2021; Kulkarni & Goel, 2020
Reproducibilidad	Baja	Alta	Gimondi et al., 2023
Consumo de reactivos	Mayor	Menor por volúmenes reducidos	Chen et al., 2021; Garzón-Cucaita & Carriazo, 2022
Escalabilidad	Alta (pero menos control de calidad)	Media-baja (requiere integración paralela)	Kulkarni & Goel, 2020; Ren et al., 2013
Eficiencia de remoción	Moderada a alta dependiente del control del proceso	Alta por NPs más homogéneas y funcionales	Garzón-Cucaita & Carriazo, 2022; Pinto et al., 2020
Impacto ambiental	Mayor debido a más residuos y uso de solventes tóxicos	Menor ya que es compatible con síntesis verde y volúmenes mínimos	Magdalene et al., 2021; Mohammed et al., 2024
Ejemplos típicos	AgNPs, ZnO, TiO ₂ por reducción química o coprecipitación	AgNPs, ZnO, Fe ₃ O ₄ por flujo continuo y síntesis biogénica	Magdalene et al., 2024; Agha et al., 2023

NPs: Nanopartículas; **AgNPs:** Nanopartículas de plata (Silver nanoparticles); **ZnO:** Óxido de zinc; **TiO₂:** Dióxido de titanio; **Fe₃O₄:** Óxido de hierro (magnetita).

Diseño y Materiales de los Sistemas de Microfluídica

Los sistemas microfluídicos son eficientes porque pueden producir partículas más pequeñas y homogéneas. Esta precisión se consigue mediante una cuidadosa regulación de los fluidos que pasan por los conductos en el método de síntesis. El diseño de la estructura del dispositivo microfluídico, el control de los fluidos, la manipulación de la composición del material y la selección de la viscosidad del fluido pueden utilizarse para variar el tamaño de las partículas con mayor precisión, además de la estructura, la función y la distribución de las partículas (Kucukturkmen et al., 2023). Gracias a este grado de control y precisión es posible la creación eficiente de una amplia variedad de partículas con diferentes composiciones y propiedades. Fundamentalmente, las tecnologías microfluídicas han transformado la producción de nanopartículas, permitiendo el desarrollo de partículas altamente personalizadas y fabricadas con precisión para una gran variedad de aplicaciones (Forigua, 2021).

Los dispositivos microfluídicos pueden diseñarse y producirse para adaptarse a diferentes patrones de flujo para diferentes aplicaciones. En los inicios de la microfluídica, los dispositivos se fabrican con silicio o vidrio mediante técnicas de micromecanizado como el grabado húmedo/seco, fotolitografía, litografía por haz de electrones, entre otros. Estas técnicas permiten construir microestructuras grabando el patrón deseado en el material, sin embargo, se requiere el uso de un cuarto limpio y equipos costosos (Ren, K., Zhou, J., & Wu, H. 2013).

Los sistemas microfluídicos para la síntesis de nanopartículas se construyen típicamente utilizando materiales como polidimetilsiloxano (PDMS), vidrio o termoplásticos, seleccionados por su estabilidad química y facilidad de fabricación. El diseño de estos dispositivos varía según las necesidades específicas, incluyendo la geometría del canal, que influye en la mezcla de fluidos y la eficiencia de la reacción. Los mecanismos de control de flujo pueden ser pasivos, dependiendo del diseño del canal, o activos, utilizando fuerzas externas como campos eléctricos o magnéticos para dirigir el movimiento del fluido. Una técnica emergente que ha ganado relevancia en este contexto es la fabricación de microreactores mediante impresión 3D, la cual permite producir dispositivos personalizados de forma rápida, económica y adaptable a diferentes geometrías. Al aprovechar estos elementos de diseño, la síntesis por microfluídica emerge como un enfoque escalable y sostenible para producir nanopartículas adaptadas a las aplicaciones de remediación del agua.

Además de la impresión 3D, utilizada por su accesibilidad y versatilidad, existen otras técnicas que permiten la fabricación precisa de microreactores con diferentes materiales y aplicaciones. Entre las más relevantes se encuentran fotolitografía, ablación láser, ataque por plasma (plasma etching), microcutting (micromecanizado), moldeo por inyección (injection molding) y hot embossing (estampado térmico). Cada una de estas técnicas presenta ventajas específicas en cuanto a costo, precisión, escalabilidad, compatibilidad de materiales y tiempo de fabricación. La elección depende del tipo de aplicación, el número de dispositivos requeridos y el entorno de desarrollo (laboratorio o industria) (Ren et al., 2013; Mata et al., 2005).

La fotolitografía es una técnica basada en el uso de luz UV para transferir un patrón sobre una capa fotosensible depositada en sustratos como silicio o vidrio, es ampliamente utilizada en la microfabricación electrónica y permite obtener canales con alta resolución y repetibilidad (Ren, Zhou, & Wu, 2013). La ablación láser, consiste en utilizar pulsos láser para eliminar material con gran precisión, permitiendo la fabricación rápida de canales en polímeros, vidrio o metal, es una técnica sin contacto y adecuada para geometrías complejas (Mata, Fleischman, & Roy, 2005).

El ataque por plasma (plasma etching), emplea gases ionizados para grabar o modificar químicamente la superficie de un sustrato, ofrece excelente control de profundidad y resolución, ideal para sistemas de silicona o vidrio (Ren et al., 2013). El microcutting (micromecanizado), usa herramientas mecánicas en miniatura para fresar canales en termoplásticos o metales, aunque es más lenta, permite fabricar microcanales en materiales no convencionales y sin necesidad de limpieza química posterior (Ng, Gitlin, Stroock, & Whitesides, 2002).

El moldeo por inyección (injection molding), es una técnica industrial que permite la fabricación en masa de chips microfluídicos en polímeros como PMMA o COC, su principal ventaja es la escalabilidad, aunque requiere moldes maestros costosos (Ren et al., 2013). Por último, el hot embossing (estampado térmico) consiste en presionar un molde sobre un polímero calentado para transferir el patrón, es económico y ofrece buena resolución, siendo adecuado para prototipos y producción limitada (Ng et al., 2002).

Parámetros Clave en Sistemas Microfluídicos

En los dispositivos microfluídicos, el comportamiento del fluido y la eficiencia de la síntesis están determinados por parámetros fundamentales como el número de Reynolds (Re), Peclet (Pe) y Damköhler (Da). El número de Reynolds indica la naturaleza del flujo (laminar o turbulento) y en microcanales suele ser <1 , garantizando un régimen laminar. El número de Peclet representa la relación entre transporte convectivo y difusión molecular; valores altos (>100) implican dominancia convectiva. Por su parte, el número de Damköhler relaciona la velocidad de reacción con el transporte de masa, siendo útil para estimar si la síntesis está limitada por la cinética química o por difusión. La Tabla 2 muestra un ejemplo con valores típicos calculados para un microcanal rectangular de $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, utilizando agua a $25\ ^\circ\text{C}$ y un caudal de $10\ \mu\text{L}/\text{min}$ (Campbell, Z. S., et al., 2020).

Tabla 2. Parámetros para microcanal rectangular utilizando agua a $25\ ^\circ\text{C}$

Parámetro	Valor reportado	Fórmula	Referencia
Dimensión del canal	$100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$	Experimental	Kulkarni & Goel, 2020
Caudal	$10\ \mu\text{L}/\text{min}$	Experimental	Gimondi et al., 2023
Viscosidad	$0.89\ \text{mPa}\cdot\text{s}$	Agua a $25\ ^\circ\text{C}$	Agua a $25\ ^\circ\text{C}$ (DIN 51562)
Densidad	$997\ \text{kg}/\text{m}^3$	Agua a $25\ ^\circ\text{C}$	Agua a $25\ ^\circ\text{C}$ (IAPWS, 1997)
Velocidad promedio	$\sim 3.3\ \text{mm}/\text{s}$	$v=Q/A$	Cálculo donde $A \approx 5 \times 10^{-9}\ \text{m}^2$
Re	~ 0.37	$\text{Re} = \rho \cdot v \cdot D_h / \mu$	Gimondi et al., 2023
Pe	~ 330	$\text{Pe} = v \cdot L / D$ ($D \sim 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$)	$\approx 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$ para iones en agua (Shi et al., 2019)

Nota: Estos valores provienen de estudios experimentales de síntesis de NPs en microreactores con configuraciones estándar.

Re: Número de Reynolds; **Pe:** Número de Peclet; **Dh:** Diámetro hidráulico; **v:** Velocidad media del fluido; **Q:** Caudal volumétrico; **A:** Área de sección transversal; **D:** Coeficiente de difusión molecular.

Mecanismos de Síntesis y Control de Parámetros

La síntesis de NPs llevada a cabo en sistemas microfluídicos está basada en la manipulación detallada de fluidos a escalas micrométricas, lo que permite tener un control preciso sobre el tamaño y la morfología de las NPs. Los principales mecanismos que influyen en el resultado final de la síntesis incluyen el control de reactivos en microcanales, la precipitación controlada y el uso de reacciones por reducción de precursores metálicos. Factores como el caudal, concentración, pH y temperatura desempeñan un papel fundamental en el proceso de nucleación y crecimiento de las NPs (Gimondi, S., et al., 2023). En la Figura 1 se presentan las etapas para la síntesis de nanopartículas mediante microfluídica.

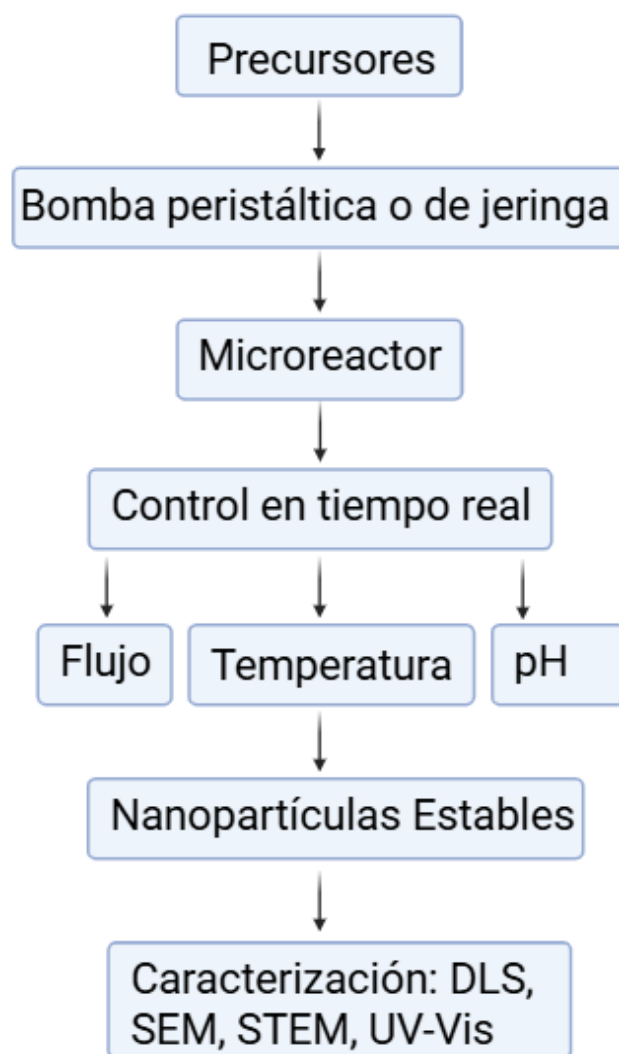


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de síntesis de nanopartículas mediante microfluídica.

NPs: Nanopartículas; **DLS:** Dynamic Light Scattering; **SEM:** Scanning Electron Microscopy; **STEM:** Scanning Transmission Electron Microscopy; **UV-Vis:** Espectroscopía ultravioleta-visible.

Sistemas de flujo Monofásico y Bifásicos.

Por otra parte, en microfluídica los sistemas de flujo también influyen considerablemente en el resultado final de la síntesis de NPs, estos se pueden clasificar en monofásico y bifásico (Figura 2). El flujo monofásico se caracteriza por el movimiento uniforme de una fase fluida a través del reactor, permitiendo un control preciso de la reacción y una distribución homogénea de los precursores mediante difusión. Una de las principales ventajas que ofrece un reactor de microfluídica de flujo continuo es el ajuste preciso de las tasas de flujo de los reactivos, lo que junto con una solución uniforme eficiente minimiza los gradientes de concentración y proporciona un entorno químico homogéneo con la concentración adecuada para la nucleación. Al mismo tiempo, el proceso de crecimiento de las NPs se puede controlar modificando los tiempos de reacción en el reactor determinado por su geometría (Zardi, P., Carofiglio, T., & Maggini, M. 2022).

Sin embargo, una de las principales limitaciones que tiene la síntesis mediante flujo monofásico es el ensuciamiento de los canales del reactor, para mitigar esta problemática se utilizan sistemas de flujo bifásico, ya que han demostrado tener mayor éxito en la síntesis continua de NPs. El flujo bifásico evita la interacción entre el producto y las paredes del canal (Dong, J., et al., 2022). Además, el uso de sistemas bifásicos acuosos en microfluídica se puede obtener mediante un flujo laminar cuando el número de Reynolds es bajo. Es importante tomar en cuenta que el volumen que ocupa cada fase se ajusta cambiando la relación de velocidad de flujo entre los líquidos, además también podemos obtener un flujo bifásico utilizando gotas microfluídicas, donde se requiere de dos fluidos inmiscibles conocidos como fase continua y fase dispersa (Xiang, L., et al., 2021).

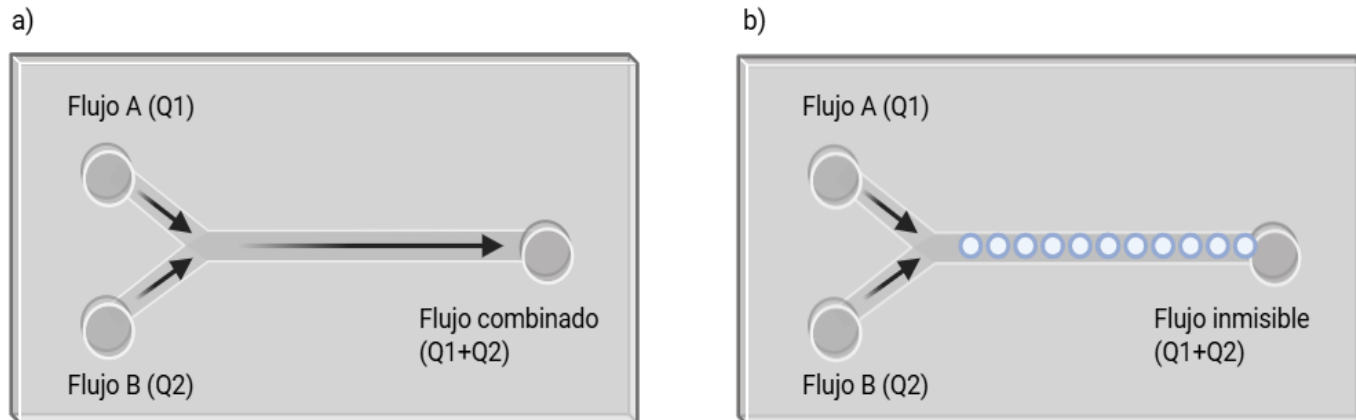


Figura 2. Esquema representativo de microreactores **a)** flujo monofásico con mezcla laminar en unión en Y; **b)** flujo bifásico tipo gota-a-gota, donde se generan microgotas de un fluido inmiscible. Este tipo de configuraciones se utiliza comúnmente para la síntesis controlada de nanopartículas. **Q1:** Flujo A; **Q2:** Flujo B; **Q1+Q2:** Flujo combinado o Flujo inmiscible

Tipos de Nanopartículas Sintetizadas mediante Microfluídica

En los últimos años, los sistemas microfluídicos han permitido la síntesis de diversas NPs, incluyendo las basadas en lípidos, como liposomas o emulsiones, que son utilizadas principalmente para la liberación controlada de fármacos, NPs poliméricas, sintetizadas a partir de polímeros sintéticos o naturales que se

utilizan para la administración de fármacos y el contraste de imágenes entre otros. Además, en la tabla 3 podemos observar que se han sintetizado NPs inorgánicas mediante microfluídica, entre las que destacan las NPs de oro (AuNPs), NPs de plata (AgNPs) y NPs de óxidos metálicos y semiconductores (ZnO NPs, TiO₂ NPs y Fe₃O₄ NPs), que se utilizan como portadores de fármacos, agentes de contraste de imágenes o degradación de compuestos debido a sus propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas únicas (Agha, A., et al., 2023).

Tabla 3. Estudios reportados de síntesis de NPs por microfluídica

Tipo de NP	Método de síntesis	Tamaño / forma	Aplicación	Referencia
AgNPs	Microfluídica con síntesis verde	10-20 nm / esféricas	Antibacteriano / tratamiento de agua	Magdalene et al., 2021; 2024
ZnO	Microfluídica con extractos vegetales	30-50 nm / semiesféricas	Fotocatálisis / Degradación de azul de metileno	Chen et al., 2021
Fe ₃ O ₄	Precipitación asistida por microcanales	50-80 nm / cúbicas	Adsorción de metales pesados	Mohammed et al., 2024
AuNPs	Flujo laminar monofásico	15-25 nm / esféricas	Diagnóstico / biosensores	Gimondi et al., 2023
TiO ₂	Síntesis sol-gel en microfluídica	25–40 nm / irregulares	Fotocatálisis / Remoción de colorantes	Garzón-Cucaita & Carriazo, 2022
Liposomas	Autoensamblaje controlado	100–200 nm vesiculares	100–200 nm / vesiculares	Saez et al., 2021
AgNPs	Flujo bifásico con gota a gota	~15 nm, distribución estrecha	Biocompatibilidad / Agua potable	Dong et al., 2022

NPs: Nanopartículas; **AgNPs:** Nanopartículas de plata (Silver nanoparticles); **ZnO:** Óxido de zinc; **Fe₃O₄:** Óxido de hierro (magnetita); **AuNPs:** Nanopartículas de oro (Gold nanoparticles); **TiO₂:** Dióxido de titanio; **nm:** Nanómetros.

Caracterización y optimización de nanopartículas

La caracterización de las NPs sintetizadas mediante microfluídica es esencial para garantizar su funcionalidad en aplicaciones específicas. Las técnicas comúnmente utilizadas incluyen Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) que permite observar la morfología y el tamaño de las NPs a nivel nanométrico, Difracción de Rayos X (DRX), que nos proporciona información sobre la estructura cristalina y la fase de las nanopartículas, Espectroscopía Raman utilizada para identificar las vibraciones moleculares y por ende, la composición química de las NPs y Espectroscopía de Absorbancia UV-Vis que evalúa las propiedades ópticas y la estabilidad coloidal de las NPs en solución. La optimización de las nanopartículas implica ajustar parámetros de síntesis como la concentración de precursores, la temperatura, el pH y el tiempo de reacción para obtener las propiedades deseadas. Además, la funcionalización superficial de las

nanopartículas puede realizarse para mejorar su biocompatibilidad o para conferirles propiedades específicas, como la capacidad de dirigirse a células o tejidos particulares.

Discusión

La remediación del agua trata del proceso de eliminar, reducir o neutralizar contaminantes como metales pesados, contaminantes orgánicos, patógenos, entre otros de las fuentes de agua (suministros de agua potable, lagos, ríos, entre otros) para que sean seguras en el consumo humano, la agricultura o la industria (Perera et al., 2024).

Existen diversos métodos para la remediación del agua, en la Tabla 4 se muestran los más comunes, sin embargo, estos métodos no siempre son eficaces y requieren una gran inversión financiera inicial (Rathod et al., 2024).

Tabla 4. Estudios reportados para remediación de agua

Método	Cómo funciona	Ejemplos de aplicaciones	Referencias
Físico	Filtra o atrapa los contaminantes mecánicamente.	Filtración con arena entre otros minerales, adsorción con carbón activado.	(Lotha et al., 2024), (Ahmed et al., 2021)
Químico	Utiliza reacciones para neutralizar los contaminantes.	Precloración, aereación, coagulación-floculación, desinfección.	(Nyabadza et al., 2023), (Ahmed et al., 2021)
Biológico	Los microbios/plantas degradan los contaminantes orgánicos.	Biorremediación bacteriana, humedales artificiales.	(Basar, 2024), (Nyabadza et al., 2023)
Electroquímico	Aplica corrientes eléctricas para eliminar iones/metales.	Electrocoagulación, electrooxidación.	(Jin et al., 2024), (Najafinejad et al., 2023)

De acuerdo con la literatura analizada, se identificaron ventajas al utilizar nanopartículas para el tratamiento de aguas debido a que demuestran estabilidad estructural al ser materiales cristalinos y una alta durabilidad en condiciones de funcionamiento adversas como altas temperaturas y entornos oxidantes (Santhosh et al., 2016). En este trabajo se realizó un estudio exhaustivo donde se identificaron las principales aplicaciones, beneficios y limitaciones de la microfluídica en la síntesis de nanopartículas con enfoque en el tratamiento de aguas residuales.

Aplicación en Remediación de Agua

La síntesis de nanopartículas puede realizarse mediante diversas metodologías, incluyendo métodos físicos, químicos, biogénicos y microfluídicos. Dependiendo del método de síntesis, las nanopartículas presentan diferentes propiedades que influyen en su eficiencia para la remediación de agua.

Los métodos físicos, como la evaporación-condensación y la ablación con láser, permiten la obtención de nanopartículas altamente puras sin el uso de reactivos químicos. Estos métodos son efectivos para la producción de nanopartículas metálicas como oro y plata, utilizadas en la remediación de agua mediante adsorción y catálisis avanzada, sin embargo, su alto consumo energético limita su escalabilidad. Los métodos químicos, como la coprecipitación y la reducción química, son ampliamente utilizados debido a su simplicidad y control sobre la morfología de las nanopartículas. Nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) y dióxido de titanio (TiO_2) obtenidas por estos métodos han demostrado alta eficiencia en la adsorción de contaminantes y la fotocatalisis en la remediación de agua, sin embargo, el uso de reactivos tóxicos puede representar un desafío ambiental.

La síntesis biogénica de nanopartículas emplea extractos vegetales, microorganismos o biopolímeros como agentes reductores y estabilizantes. Este enfoque es ecológico y biocompatible, reduciendo la toxicidad de los materiales resultantes, aunque una de sus principales desventajas es el control en el tamaño y morfología. Nanopartículas de plata (AgNPs) y óxidos metálicos sintetizados biológicamente han mostrado aplicaciones prometedoras en la desinfección de agua (Gutierrez Sierra, N., & Mesco Aquise, N. J., 2023). Por último, la microfluídica permite una síntesis precisa de nanopartículas con tamaño y forma controlados, optimizando su rendimiento en la remediación de agua. Se ha demostrado que nanopartículas de ZnO , TiO_2 y Fe_3O_4 obtenidas por microfluídica presentan una mayor eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos debido a su morfología uniforme y mayor área superficial. Además, este método reduce el consumo de reactivos y minimiza la generación de residuos químicos, haciéndolo una alternativa sostenible (Garzón-Cucaita, V., & Carriazo, J. G., 2022).

Beneficios y limitaciones

La síntesis de nanopartículas mediante microfluídica es un método ideal para la depuración de aguas, permitiendo la producción controlada de óxidos metálicos como el óxido de hierro, dióxido de titanio y óxido de zinc, los cuales pueden adsorber metales pesados y degradar contaminantes orgánicos. Este método ofrece ventajas en términos de escalabilidad y producción continua (Chen, 2021). Sin embargo, presenta limitaciones como la obstrucción de los microcanales debido a la acumulación de partículas y restricciones en la producción a gran escala.

Eficiencia y selectividad

La microfluídica permite un control preciso del tamaño y morfología de las nanopartículas, lo que influye directamente en su capacidad de adsorción y reactividad catalítica. Ajustes en el caudal, proporciones de mezcla y temperatura facilitan la producción de nanopartículas homogéneas y optimizadas para la remediación de agua (Kulkarni, 2020). Esta alta selectividad mejora la eficiencia del proceso en comparación con métodos tradicionales.

Escalabilidad y costos

A pesar de sus ventajas, la escalabilidad de la microfluídica sigue siendo un desafío debido a las dimensiones reducidas de los microcanales. Aunque se pueden diseñar sistemas en paralelo para aumentar la producción, la inversión inicial en tecnología microfluídica puede ser elevada. No obstante, la eliminación de equipos voluminosos y la reducción de tiempos de reacción hacen que esta tecnología sea competitiva en comparación con métodos convencionales (Gimondi, 2023).

Impacto ambiental

Los procesos microfluídicos requieren menores volúmenes de reactivos en comparación con la síntesis tradicional por lotes, lo que reduce la generación de residuos químicos minimizando el impacto ambiental. Además, la optimización de los parámetros de síntesis permite un uso más eficiente de los recursos, contribuyendo a la sostenibilidad de las aplicaciones en tratamiento de agua (Chen, 2021). Esto resulta beneficioso para aplicaciones industriales en el tratamiento de aguas.

Futuras aplicaciones e investigaciones.

El avance en la integración de microfluídica con otras tecnologías, como la nanotecnología, abre nuevas oportunidades para la optimización de procesos de síntesis. Investigaciones futuras se centran en el desarrollo de microreactores avanzados capaces de producir nanopartículas funcionalizadas para aplicaciones específicas, como la detección y eliminación de contaminantes emergentes (Gimondi, 2023).

Desafíos en la aplicación a gran escala

A pesar de su potencial, la implementación de la microfluídica a nivel industrial enfrenta obstáculos como la obstrucción de microcanales, la necesidad de dispositivos de mayor capacidad y la integración con procesos de tratamiento de agua ya existentes. Otra desventaja es que, aunque los sistemas microfluídicos pueden ampliarse, están intrínsecamente limitados por el pequeño tamaño de sus canales, lo que puede restringir el volumen de nanopartículas producidas en una sola serie. Es importante mencionar que algunas nanopartículas que requieren condiciones de alta temperatura o alta presión pueden no ser adecuadas para la síntesis en sistemas microfluídicos debido a las limitaciones del dispositivo. La investigación en materiales más resistentes y en estrategias para evitar la formación de depósitos en los canales será clave para superar estos desafíos (Kulkarni, 2020).

Conclusiones

La microfluídica ha demostrado ser una tecnología versátil y prometedora para la síntesis controlada de nanopartículas con aplicaciones en la remediación de agua. A diferencia de los métodos convencionales, este enfoque permite un control más preciso sobre los parámetros de reacción, lo cual se traduce en una mayor uniformidad en el tamaño y morfología de las nanopartículas, optimizando así su funcionalidad en procesos de adsorción, catálisis y desinfección.

La integración de la síntesis biogénica en plataformas microfluídicas representa un avance significativo hacia una producción más sostenible y ecológica, reduciendo la dependencia de reactivos tóxicos y minimizando la generación de residuos químicos. Además, las características de los sistemas

microfluídicos, como la escalabilidad mediante integración paralela y la compatibilidad con tecnologías emergentes como la impresión 3D, abren nuevas posibilidades para la producción a mayor escala.

No obstante, persisten desafíos importantes que deben abordarse, como la obstrucción de microcanales, la necesidad de materiales más resistentes para dispositivos duraderos y la adaptación de estos sistemas a las condiciones requeridas por ciertos tipos de nanopartículas. También es fundamental mejorar los mecanismos de control y automatización del proceso para facilitar su implementación industrial.

En conjunto, el desarrollo de sistemas microfluídicos representa una herramienta poderosa para la ingeniería de materiales con aplicaciones ambientales. Su potencial para contribuir a la sostenibilidad y eficiencia de los tratamientos de agua lo posiciona como un campo estratégico que merece ser explorado a profundidad en futuras investigaciones, con miras a su implementación en contextos reales, especialmente en regiones con problemas de escasez y contaminación del agua como Sonora.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Estatal de Sonora por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Este trabajo forma parte de las actividades de investigación relacionadas con el Diseño de sistemas de Microfluídica para síntesis biogénica de NPs Metálicas utilizadas para degradación y/o adsorción de contaminantes en agua.

Referencias

1. Ahmed, S., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., Inayat, A., Mahlia, T., Ong, H. C., Chia, W. Y., & Show, P. L. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal Of Hazardous Materials*, 416, 125912. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>
2. Ayangbenro, A. S. & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
3. Balderrama-Carmona, A. P., Bisher-Alvarez, Y., Silva-Beltrán, N. P., Ayala-Parra, P. A., & Felipe-Ortega-Fonseca, X. (2019). Estimación del riesgo a la salud por consumo de *Oreochromis niloticus*, agua de grifo, agua superficial y sedimentos de presa, contaminados con metales pesados en comunidades cercanas a una mina de cobre ya la presa Adolfo Ruiz Cortines, Sonora, México. *Revista Bio Ciencias*, 6, 12-pág. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.nesp.e522>
4. Basar, I. A. (2024). Evaluation of on-site biological treatment options for hydrothermal liquefaction aqueous phase derived from sludge in municipal wastewater treatment plants. UBC Library Open Collections. <https://doi.org/10.14288/1.0442271>
5. Campbell, Z. S., Bateni, F., Volk, A. A., Abdel-Latif, K., & Abolhasani, M (2020). Microfluidic synthesis of semiconductor materials: Toward accelerated materials development in flow. *Particle & Particle Systems Characterization*, 37(12), <https://doi.org/10.1002/ppsc.202000256>
6. Chen, Z., Song, Q., Ni, L., Jiang, J., & Yu, Y. (2021). Microfluidic synthesis of ZnWO₄ nanoparticles and its performance in DMSO-containing wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106528. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106528>

7. Chhetri, T., Cunningham, G., Suresh, D., Shanks, B., Kannan, R., Upendran, A. & Afrasiabi, Z. (2022). Wastewater Treatment Using Novel Magnetic Nanosponges. *Water (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/w14030505>
8. DIN 51562. Viskosität – Kinematische Viskosität und Berechnung der dynamischen Viskosität.
9. Dong, J., Svoronos, S. A., Lau, J. C., & Moudgil, B. (2022). Effects of fluid film properties on fouling in biphasic flow systems. *Chemical Engineering Science*, 249, 117293. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117293>
10. Garzón-Cucaita, V., & Carriazo, J. G. (2022). Óxidos de hierro como catalizadores de procesos tipo Fenton con potencial aplicación en tecnologías de remoción de contaminantes. *Tecnológicas*, 25(55), e2143. <https://doi.org/10.22430/22565337.2143>
11. Gimondi, S., Ferreira, H., Reis, R. L., & Neves, N. M. (2023). Microfluidic Devices: A Tool for Nanoparticle Synthesis and Performance Evaluation. *ACS Nano*, 17(15), 14205-14228. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c01117>
12. Gutierrez Sierra, N., & Mesco Aquise, N. J. (2023). Biosíntesis de nanopartículas de plata con extracto de queñua y su aplicación antibacteriana en el afluente de la PTAR–Cusco. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n3.111932>
13. IAPWS (1997). Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use.
14. Jin, H., Yu, Y., & Chen, X. (2024). Electrochemical precipitation for water and wastewater treatment. *Process Safety And Environmental Protection*, 184, 1011-1016. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.044>
15. Karnik, R. (2015). Microfluidic Mixing. En *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics* (pp. 1969–1979). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5491-5_939
16. Khan, S. A., Gunther, A., Schmidt, M. A., & Jensen, K. F. (2004). Microfluidic synthesis of colloidal silica. *Langmuir*, 20(20), 8604–8611. <https://doi.org/10.1021/la0499012>
17. Kumari, S., Raturi, S., Kulshrestha, S., Chauhan, K., Dhingra, S., András, K., Thu, K., Khargotra, R., & Singh, T. (2023). A comprehensive review on various techniques used for synthesizing nanoparticles. *Journal Of Materials Research And Technology*, 27, 1739-1763. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.291>
18. Kulkarni, M. B., & Goel, S. (2020). Microfluidic devices for synthesizing nanomaterials—a review. *Nano Express*, 1(3), 032004. <https://doi.org/10.1088/2632-959x/abcca6>
19. Lotha, T. N., Sorhie, V., Bharali, P., & Jamir, L. (2024). Advancement in Sustainable Wastewater Treatment: A Multifaceted Approach to Textile Dye Removal through Physical, Biological and Chemical Techniques. *ChemistrySelect*, 9(11). <https://doi.org/10.1002/slct.202304093>
20. Magdalene, D. J., & Muthuselvam, D. (2024). Microfluidics assisted green synthesis of copper oxide nanoparticles from the aqueous leaf extract of *Ipomoea quamoclit* L. with its antimicrobial and antioxidant activity. *Journal of Herbal Medicine*, 48, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2024.100940>
21. Mata, A., Fleischman, A. J., & Roy, S. (2005). Characterization of polydimethylsiloxane (PDMS) properties for biomedical micro/nanosystems. *Biomedical Microdevices*, 7, 281–293. <https://doi.org/10.1007/s10544-005-6070-2>
22. Microfluidics for Pharmaceutical Applications. (2019). <https://doi.org/10.1016/c2016-0-03449-6>
23. Mohammed, I., Mahmoud, M., Al Shehri, D. & Bello, A. (2024). A complementary eco-friendly approach to heavy metal removal from wastewater/produced water streams through mineralization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113939>

24. Najafinejad, M. S., Chianese, S., Fenti, A., Iovino, P., & Musmarra, D. (2023). Application of Electrochemical Oxidation for Water and Wastewater Treatment: An Overview. *Molecules*, 28(10), 4208. <https://doi.org/10.3390/molecules28104208>
25. Ng, J. M., Gitlin, I., Stroock, A. D., & Whitesides, G. M. (2002). Components for integrated poly(dimethylsiloxane) microfluidic systems. *Electrophoresis*, 23(20), 3461–3473. [https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1522-2683\(200210\)23:20%3C3461::AID-ELPS3461%3E3.0.CO;2-8](https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1522-2683(200210)23:20%3C3461::AID-ELPS3461%3E3.0.CO;2-8)
26. Nguyen, N.-T., & Wu, Z. (2005). Micromixers—a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(2), R1–R16. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/15/2/R01>
27. Nti, E. K., Cobbina, S. J., Attafuah, E. E., Senanu, L. D., Amenyeku, G., Gyan, M. A., Forson, D. & Safo, A. R. (2023). Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. *Heliyon*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18170>
28. Nyabadza, A., McCarthy, É., Makhesana, M., Heidarinassab, S., Plouze, A., Vazquez, M., & Brabazon, D. (2023). A review of physical, chemical and biological synthesis methods of bimetallic nanoparticles and applications in sensing, water treatment, biomedicine, catalysis and hydrogen storage. *Advances In Colloid And Interface Science*, 321, 103010. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103010>
29. Perera, H., Gurunathanan, V., Singh, A., Mantilaka, M., Das, G., & Arya, S. (2024). Magnesium oxide (MgO) nanoadsorbents in wastewater treatment: A comprehensive review. *Journal Of Magnesium And Alloys*, 12(5), 1709-1773. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2024.05.003>
30. Pinto, M., Ramalho, P. S. F., Moreira, N. F. F., Gonçalves, A. G., Nunes, O. C., Pereira, M. F. R. & Soares, O. S. G. P. (2020). Application of magnetic nanoparticles for water purification. *Environmental Advances*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100010>
31. Rai, P. K., Islam, M., & Gupta, A. (2022). Microfluidic devices for the detection of contamination in water samples: A review. *Sensors And Actuators A Physical*, 347, 113926. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113926>
32. Rathod, S., Preetam, S., Pandey, C., & Bera, S. P. (2024). Exploring synthesis and applications of green nanoparticles and the role of nanotechnology in wastewater treatment. *Biotechnology Reports*, 41, e00830. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00830>
33. Ren, K., Zhou, J., & Wu, H. (2013). Materials for microfluidic chip fabrication. *Accounts of chemical research*, 46(11), 2396-2406. <https://doi.org/10.1021/ar300314s>
34. Saez, J., Catalan-Carrio, R., Owens, R. M., Basabe-Desmonts, L. & Benito-Lopez, F. (2021). Microfluidics and materials for smart water monitoring: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338392>
35. Santhosh, C., Velmurugan, V., Jacob, G., Jeong, S. K., Grace, A. N., & Bhatnagar, A. (2016). Role of nanomaterials in water treatment applications: A review. *Chemical Engineering Journal*, 306, 1116-1137. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.053>
36. Shi, H., Nie, K., Dong, B., Long, M., Xu, H., & Liu, Z. (2019). Recent progress of microfluidic reactors for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal*, 361, 635-650. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.104>
37. Stone, H. A., Stroock, A. D., & Ajdari, A. (2004). Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 381–411. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122124>

38. Sugioka, K., Cheng, Y. Fabrication of 3D microfluidic structures inside glass by femtosecond laser micromachining. *Appl. Phys. A* 114, 215–221 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8107-3>
39. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. (2020). The united nations world water development report 2020: Water and climate change. United Nations Educational Scientific and Cultural.
40. Whitesides, G. M. (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442(7101), 368–373. <https://doi.org/10.1038/nature05058>
41. Xiang, L., Kaspar, F., Schallmey, A., & Constantinou, I. (2021). Two-phase biocatalysis in microfluidic droplets. *Biosensors*, 11(11), 407. <https://doi.org/10.3390/bios11110407>
42. Zardi, P., Carofiglio, T., & Maggini, M. (2022). Mild microfluidic approaches to Oxide nanoparticles synthesis. *Chemistry—A European Journal*, 28(9), e202103132. <https://doi.org/10.1002/chem.202103132>