
AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE SENSORES NANOESTRUCTURADOS PARA APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES: UNA REVISIÓN EXHAUSTIVA

JUAN MANCILLA GAMBOA, CAROLINA MEDALLA Y JORGE BERNAL

RESUMEN

Los sensores nanoestructurados han surgido como una herramienta prometedora para enfrentar desafíos ambientales, gracias a sus capacidades de detección altamente sensibles y selectivas. En este artículo de revisión examina en detalle el papel de los sensores nanoestructurados en aplicaciones medioam-

bientales, destacando sus beneficios, limitaciones y perspectivas futuras. Se analizan los diferentes tipos de sensores nanoestructurados utilizados en monitoreo ambiental, los materiales empleados en su fabricación y su potencial para contribuir a la preservación de los ecosistemas y la salud humana.

Introducción

En la actualidad, en un contexto de creciente conciencia ambiental a nivel global y la urgente necesidad de hacer frente a los desafíos cada vez más acuciantes derivados de la contaminación ambiental, resulta innegable la enorme relevancia que han adquirido las tecnologías destinadas al monitoreo y detección de sustancias contaminantes en nuestro entorno natural. Estas tecnologías se consolidan como herramientas fundamentales e imprescindibles en la lucha contra los impactos nocivos que las actividades humanas han generado en el medio ambiente, con repercusiones directas en la salud de los seres vivos y en la estabilidad de los ecosistemas que sustentan la vida en el planeta (Choi y Yoon, 2023; Chung *et al.*,

2021; Çimen *et al.*, 2023; Herrera-Domínguez *et al.*, 2023; Gavrilaş *et al.*, 2022). En este sentido, los sensores nanoestructurados se han destacado como una herramienta innovadora con altas capacidades sensibles y selectivas a nivel nanométrico, lo que los convierte en una opción atractiva para hacer frente a los retos ambientales contemporáneos (Chen *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2020; Chowdhury y Bhowmik, 2021; Fine *et al.*, 2010; Jiménez-Cadena *et al.*, 2007).

La portabilidad y la capacidad de realizar mediciones en tiempo real son aspectos esenciales para la eficacia de las tecnologías de monitoreo ambiental, especialmente en casos donde la rapidez en la detección de contaminantes es crucial para proteger la salud humana y preservar los ecosistemas. Gracias a su compactibilidad y alta sensibilidad, los sensores nanoestructurados, tienen el

potencial de ofrecer soluciones de detección rápidas y precisas (Chen *et al.*, 2021; Hooshmand *et al.*, 2023; Jang *et al.*, 2016).

La incorporación de superficies nanoestructuradas en la fabricación de sensores electroquímicos representa un avance significativo en la tecnología de detección. Estas nanoestructuras ofrecen una mayor área superficial y una interacción más intensa con los analitos, lo que incrementa la sensibilidad y selectividad de los sensores. Esto facilita la detección precisa de cantidades minúsculas de contaminantes en el entorno, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones informadas y la implementación oportuna de medidas correctivas (Sedaghat *et al.*, 2022; Reimhult y Höök, 2015; Berte *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2009; Huang y Choi, 2007).

PALABRAS CLAVE / Electroquímica / Medio Ambiente / Nanoestructurado / Sensores /

Recibido: 30/04/2024. Modificado: 24/06/2024. Aceptado: 01/07/2024.

Juan Mancilla Gamboa. Químico laboratorista y licenciado en Química. Doctor en Ciencias, Universidad de São Paulo, Brasil. Postdoctorado, Universidad de Chile. Investigador, Universidad de Tarapacá, EIEE, Arica, Chile.

Carolina Medalla. Docente, Departamento de Obstetricia y Puericultura, Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad de Tarapacá, Arica, Chile.

Jorge Bernal (Autor de correspondencia). Doctor en Financiación e Investigación Comercial. Facultad de Administración y Economía, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile. Dirección: Universidad de Tarapacá, Av. 18 de septiembre #2222, Arica, Chile. e-mail: jbernal@academicos.uta.cl.

La aplicación de sensores con superficies nanoestructuradas en dispositivos portátiles abre nuevas perspectivas para el monitoreo ambiental en áreas de difícil acceso o entornos móviles. La combinación de la sensibilidad nanométrica de los sensores con la optimización de las superficies nanoestructuradas ofrece una herramienta poderosa para una vigilancia ágil y efectiva, mejorando de manera significativa la capacidad de detección y la respuesta frente a situaciones de contaminación (Bernasconiet *et al.*, 2022; Kant *et al.*, 2023; Chen y Ostrom, 2015; Salamone *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2022; Yao *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Hu y Song, 2019).

De esta forma, los sensores nanoestructurados representan una tecnología prometedora para el monitoreo ambiental, brindando alta sensibilidad a nivel nanométrico, portabilidad y capacidad de detección rápida en tiempo real. Su capacidad para proporcionar información precisa no solo respalda la toma de decisiones fundamentadas, sino que también puede contribuir a fomentar la equidad y la justicia ambiental al garantizar la disponibilidad de un entorno limpio y saludable para todas las personas, sin importar su ubicación geográfica o situación socioeconómica.

Por lo tanto, en esta revisión, se explorarán en detalle los avances más recientes en la investigación de sensores nanoestructurados para aplicaciones medioambientales, analizando sus aplicaciones actuales, los materiales utilizados en su fabricación, los desafíos tecnológicos y las perspectivas futuras de esta emocionante tecnología.

Sensores electroquímicos nanoestructurados

Un electrodo nanoestructurado es un componente fundamental en el campo de la electroquímica que ha sido objeto de numerosos avances en la última década. En términos simples, la nanoestructuración de un electrodo implica la modificación a nivel nanométrico de su superficie para incorporar nanoestructuras, tales como nanopartículas, nanotubos, nanohilos o nanofibras (Arico *et al.*, 2005; Goodenough y Park, 2013; Wang *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2013; Mai *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2010). Estas estructuras de dimensiones nanométricas tienen un impacto significativo en el rendimiento de los electrodos al aumentar drásticamente la superficie efectiva de reacción disponible para las especies químicas o biológicas involucradas en los procesos electroquímicos.

La nanoestructuración de los electrodos en los sensores electroquímicos es un campo de investigación activo y prometedor, ya que las propiedades mejoradas de transferencia de electrones y la mayor superficie de reacción favorecen la sensibilidad y la selectividad de detección de analitos.

Uno de los aspectos clave en la nanoestructuración de electrodos es la optimización de la interfaz entre el electrodo-analito, lo que impacta directamente en la eficiencia de detección y en la respuesta del sensor.

La reducción en las dimensiones a escala nanométrica permite una difusión más eficiente de los analitos hacia la superficie del electrodo y optimiza la transferencia de electrones en las reacciones electroquímicas. Este fenómeno reduce la resistencia al intercambio electrónico y mejora la velocidad de respuesta del sensor, resultando en una detección más precisa y rápida de los analitos presentes. Así, la nanoestructuración de los electrodos es crucial para mejorar las capacidades de detección de los sensores electroquímicos.

Los sensores nanoestructurados están en la vanguardia de la tecnología de detección, y su integración con técnicas electroquímicas como la voltamperometría la amperometría aumenta significativamente la precisión y sensibilidad en la detección y cuantificación de analitos en una variedad de aplicaciones. La voltamperometría, en particular, se destaca por proporcionar una comprensión detallada de los complejos procesos de transferencia de electrones en la interfaz entre el electrodo y la solución. Esta técnica permite examinar la dinámica de las reacciones redox y ofrece una herramienta clave para caracterizar la eficiencia de detección de los sensores nanoestructurados. Al estudiar la cinética de las reacciones redox, la voltamperometría proporciona una visión profunda de los mecanismos subyacentes que influyen en la respuesta de los sensores, lo que es esencial para optimizar su desempeño y selectividad (Nikolaev *et al.*, 2018; Eremenko *et al.*, 2012).

Por otro lado, la amperometría se ha consolidado como una técnica fundamental para la detección y cuantificación de analitos en los sensores nanoestructurados, debido a su capacidad para medir directamente la corriente generada por la oxidación o reducción de un analito en la superficie del electrodo. Al enfocarse en la medición directa de la corriente eléctrica derivada de las reacciones electroquímicas, la amperometría facilita una detección precisa y sensible de los analitos de interés. Gracias a su capacidad para proporcionar datos cuantitativos con

alta sensibilidad, la amperometría se convierte en un instrumento valioso para la monitorización continua y la cuantificación precisa de analitos en muestras complejas, consolidándola como una técnica clave en la aplicación práctica de los sensores nanoestructurados en diversas áreas (Scheiblbrandner *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2013; Naresh y Lee, 2021).

La sinergia entre los sensores nanoestructurados y las técnicas electroquímicas de voltamperometría y amperometría representa un avance significativo en el campo de la detección analítica, ya que permite una mejora sustancial en la sensibilidad, selectividad, precisión y cuantificación de analitos. Esta integración de tecnologías innovadoras no solo amplía las posibilidades en investigación y desarrollo, sino que también abre nuevas oportunidades para aplicaciones prácticas en sectores como la medicina, la biotecnología, la seguridad alimentaria y la monitorización ambiental.

Aplicaciones de sensores nanoestructurados en medio ambiente

Los sensores nanoestructurados son dispositivos que pueden detectar y medir pequeñas cantidades de sustancias en el medio ambiente con una alta sensibilidad y selectividad. Estos sensores tienen aplicaciones muy prometedoras en la monitorización y control de la calidad del aire, agua y suelo. Aquí presentaremos algunas investigaciones de aplicaciones de sensores nanoestructurados en el medio ambiente.

En una investigación realizada por M. Mauter en 2008 (Mauter y Elimelech, 2008), titulada "Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials", se destacan las prometedoras aplicaciones de los nanomateriales de carbono en la protección del medio ambiente. Las propiedades únicas de estos materiales los convierten en herramientas poderosas para abordar los desafíos ambientales modernos, proporcionando soluciones innovadoras y efectivas para la purificación del agua, la remediación de suelos y el control de la contaminación del aire.

Los nanomateriales de carbono presentan varias ventajas notables. Poseen una alta área superficial específica, lo que incrementa su capacidad de adsorción y les permite interactuar eficazmente con una amplia gama de contaminantes. Además, estos materiales son excepcionalmente resistentes y ligeros, con una excelente conductividad térmica y eléctrica, lo que los hace ideales para diversas aplicaciones ambientales. Su versatilidad funcional permite que sean

modificados químicamente para mejorar su afinidad con contaminantes específicos, aumentando su eficiencia en procesos de remediación. Asimismo, los nanomateriales de carbono son químicamente estables y pueden soportar condiciones ambientales adversas, lo que garantiza una larga vida útil en aplicaciones prácticas.

En cuanto a las aplicaciones ambientales, los nanomateriales de carbono se utilizan ampliamente en la purificación del agua. Los nanotubos de carbono y el grafeno se emplean para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, incluidos metales pesados, pesticidas y compuestos orgánicos volátiles, ofreciendo soluciones innovadoras para abordar los desafíos ambientales relacionados con la calidad del agua y la salud pública.

Plastiras, Deliyanni y Samanidou (Plastiras *et al.*, 2021) revisan en "Applications of graphene-based nanomaterials in environmental analysis" el uso de nanomateriales derivados del grafeno en la detección de contaminantes ambientales, especialmente en muestras de agua. Los autores exploran diversas aplicaciones de estos materiales, destacando su eficacia en la creación de sensores avanzados y en el desarrollo de métodos analíticos mejorados. El grafeno proporciona ventajas significativas como su alta sensibilidad y selectividad, así como su capacidad para integrarse en dispositivos portátiles. Los autores subrayan cómo estas propiedades únicas del grafeno están transformando el campo del análisis ambiental, permitiendo una monitorización más precisa y eficiente de los contaminantes. Además, enfatizan el potencial del grafeno para impulsar tecnologías innovadoras y sostenibles, que contribuyan a la protección y gestión responsable de los recursos hídricos y ambientales.

Liang en el año 2020 (Liang *et al.*, 2020) presentan una innovadora tecnología de sensores en su artículo "Metal–Organic Framework–Plant Nanobiohybrids as Living Sensors for On-Site Environmental Pollutant Detection". Estos sensores, basados en nanobiohíbridos compuestos por marcos metal-orgánicos (MOFs) y plantas, ofrecen varias fortalezas significativas para la detección de contaminantes ambientales *in situ*. La alta sensibilidad y selectividad de los MOFs, gracias a su estructura porosa, permite captar contaminantes específicos. Además, la biocompatibilidad se garantiza mediante la integración de plantas vivas, lo que facilita una interacción biológica efectiva con el entorno y una detección precisa en tiempo real. Esta tecnología permite la detección de una amplia gama de contaminantes, que van desde metales pesados

hasta compuestos orgánicos. Asimismo la respuesta rápida a cambios en la concentración de contaminantes es crucial para el monitoreo ambiental. Estos sensores son una opción sostenible y eficaz para la detección y gestión de contaminantes.

Desafíos y perspectivas futuras

La investigación en sensores nanoestructurados para aplicaciones medioambientales ha experimentado avances significativos en los últimos años, abriendo un amplio abanico de oportunidades para monitorear y controlar de manera más precisa y eficiente el estado del medio ambiente. No obstante, a pesar de estos logros, existen desafíos importantes que deben abordarse para maximizar el potencial de estos sensores y garantizar su implementación exitosa en aplicaciones prácticas a gran escala.

Por otra parte, la reproducibilidad y repetibilidad en la modificación de sensores nanoestructurados presentan desafíos significativos debido a la complejidad de los procesos a escala nanométrica y a la influencia de pequeñas variaciones en las condiciones experimentales. Estos desafíos pueden manifestarse en una variabilidad considerable en los resultados obtenidos, lo que afecta la confiabilidad y la precisión de los sensores.

En el contexto de la modificación de sensores nanoestructurados, el porcentaje de modificación y el coeficiente de variación son parámetros críticos que requieren una cuidadosa evaluación. La cuantificación precisa del porcentaje de modificación es esencial para comprender el impacto de los procesos de modificación en las propiedades de los sensores, mientras que un bajo coeficiente de variación indica una mayor consistencia y precisión en los resultados obtenidos.

Para superar estos desafíos, es necesario implementar estrategias rigurosas de control de calidad y diseño experimental en la modificación de sensores nanoestructurados. Esto incluye la estandarización de los procedimientos de modificación, la optimización de las condiciones experimentales para minimizar las variaciones (pH, temperatura, entre otros) y la validación de los resultados a través de pruebas estadísticas robustas.

Por otro lado uno de los grandes retos de estos sensores es el estudio de posibles interferentes que pueden estar presentes en el entorno, lo que puede comprometer la selectividad de sus determinaciones. Además, la estabilidad a largo plazo de los materiales nanoestructurados también puede ser un problema, ya que pueden degradarse con el tiempo, limitando su vida útil y su fiabilidad.

Para abordar estas desventajas, es crucial desarrollar estrategias para mejorar la selectividad de los sensores, como la funcionalización de las superficies nanoestructuradas con materiales específicos que mejoren la respuesta selectiva a ciertas sustancias. Además, el diseño de sistemas de calibración y control de calidad rigurosos puede ayudar a garantizar la precisión de las mediciones a lo largo del tiempo.

Otro desafío es la integración de los sensores nanoestructurados en dispositivos de monitoreo medioambiental robustos y de bajo costo. La miniaturización y la integración de múltiples sensores en plataformas compactas y portátiles son aspectos clave para su implementación en aplicaciones de campo. Sin embargo, la fabricación y el escalado de estos dispositivos pueden ser costosos y complejos, lo que dificulta su adopción a gran escala.

Para superar estas barreras, es fundamental fomentar la colaboración interdisciplinaria entre investigadores de diferentes sectores, como la nanotecnología, la química, la ingeniería y la informática, para desarrollar soluciones integrales y escalables. Además, la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías de fabricación avanzadas puede ayudar a abaratar los costos y acelerar la producción en masa de estos dispositivos.

En cuanto a las perspectivas futuras, se espera que los sensores nanoestructurados sigan evolucionando hacia sistemas más inteligentes y autónomos, capaces de realizar mediciones en tiempo real, operar de forma remota y adaptarse dinámicamente a diferentes condiciones ambientales. El desarrollo de redes de sensores inalámbricos y la integración de tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial, también son áreas prometedoras que podrían transformar la forma en que monitoreamos y gestionamos nuestro entorno.

Por lo tanto, la investigación en sensores nanoestructurados para aplicaciones medioambientales presenta desafíos significativos, pero también ofrece un potencial inmenso para mejorar nuestra comprensión y protección del medio ambiente. Abordar los desafíos identificados y aprovechar las oportunidades emergentes requerirá un esfuerzo colaborativo y continuo de la comunidad científica, así como una inversión sostenida en tecnologías innovadoras y prácticas.

Conclusión

La investigación en el desarrollo de sensores nanoestructurados

para aplicaciones medioambientales ha experimentado un crecimiento exponencial en respuesta a la necesidad de monitorear y controlar los impactos ambientales inducidos por actividades antropogénicas. Estos sensores nanotecnológicos se destacan por su alta sensibilidad, selectividad y velocidad de detección, características cruciales para analizar y cuantificar analitos electroactivos en muestras ambientales complejas. Su capacidad para detectar trazas de contaminantes en aire, agua y suelos, así como su aplicabilidad en la evaluación de la calidad ambiental de microambientes, los convierte en herramientas indispensables en la gestión ambiental moderna.

A pesar de los avances tecnológicos significativos logrados, persisten desafíos electroquímicos y medioambientales que exigen un enfoque multidisciplinario y estratégico. La estabilidad operativa a largo plazo, la optimización de costos de producción y mantenimiento, y la estandarización de métodos de calibración y control de calidad son áreas que requieren atención y desarrollo continuos para garantizar la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

Asimismo, es imprescindible fomentar la colaboración interdisciplinaria entre científicos electroquímicos, ingenieros de sensores, funcionarios gubernamentales, reguladores medioambientales y la industria, a fin de abordar de manera integral los desafíos ambientales actuales. Es vital fortalecer la infraestructura analítica, impulsar capacidades tecnológicas innovadoras y promover políticas públicas que estimulen la adopción de soluciones basadas en sensores electroquímicos para una mejor gestión ambiental.

En síntesis, los sensores nanoestructurados poseen un potencial disruptivo en la protección del medio ambiente, permitiendo avanzar hacia un futuro más sostenible y resiliente. Al continuar promoviendo la investigación, la innovación y la colaboración en este ámbito, podremos superar los desafíos presentes y aprovechar las oportunidades emergentes para abordar colectivamente los desafíos ambientales globales y preservar la salud del ecosistema planetario para las generaciones venideras.

REFERENCIAS

Arico AS, Bruce P, Scrosati B, Tarascon JM, Van Schalkwijk W (2005) Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices. *Nature Materials* 4: 366-377. <https://doi.org/10.1038/nmat1368>

Bernasconi S, Angelucci A, Aliverti A (2022). A scoping review on wearable devices for environmental monitoring and their application for health and wellness. *Sensors* 22: 5994. <https://doi.org/10.3390/s22165994>

Berte L, Mirand DA, García-Martín JM (2021) Nanostructured titanium dioxide surfaces for electrochemical biosensing. *Sensors* 21: 6167. <https://doi.org/10.3390/s21186167>

Chen X, Leishman M, Bagnall D, Nasiri N (2021) Nanostructured Gas Sensors: From Air Quality and Environmental Monitoring to Healthcare and Medical Applications. *Nanomaterial* 11: 1927. <https://doi.org/10.3390/nano11081927>

Chen A, Ostrom C (2015) Palladium-based nanomaterials: synthesis and electrochemical applications. *Chemical Reviews* 115: 11999-12044. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00324>

Choi HK, Yoon J (2023) Enzymatic electrochemical/fluorescent nanobiosensor for detection of small chemicals. *Biosensors* 13: 492. <https://doi.org/10.3390/bios13040492>

Chowdhury NK, Bhowmik B (2021) Micro/nanostructured gas sensors: the physics behind the nanostructure growth, sensing and selectivity mechanisms. *Nanoscale Advances* 3: 73-93. <https://doi.org/10.1039/D0NA00552E>

Chung TH, Meshref MNA, Dhar BR (2021) A review and roadmap for developing microbial electrochemical cell-based biosensors for recalcitrant environmental contaminants, emphasis on aromatic compounds. *Chemical Engineering Journal* 424: 130245. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130245>

Çimen D, Bereli N, Denizli A (2023) Advanced plasmonic nanosensors for monitoring of environmental pollutants. *Current Analytical Chemistry* 19: 2-17. <https://doi.org/10.2174/1573411018666220618155324>

Eremenko AV, Dontsova EA, Nazarov AP, Evtushenko EG, Amitonov SV, Savilov SV, Martynova LF, Lunin VV (2012) Manganese dioxide nanostructures as a novel electrochemical mediator for thiol sensors. *Electroanalysis* 24: 573-580. <https://doi.org/10.1002/elan.201100535>

Fine GF, Cavanagh LM, Afonja A, Binions R (2010) Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. *Sensor* 10: 5469-5502. <https://doi.org/10.3390/s100605469>

Gavrilaş S, Ursachi CS, Perța-Crișan S, Munteanu FD (2022) Recent trends in biosensors for environmental quality monitoring. *Sensors* 22: 1513. <https://doi.org/10.3390/s22041513>

Goodenough JB, Park KS (2013) The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society* 135: 1167-1176. <https://doi.org/10.1021/ja3091438>

Herrera-Domínguez M, Morales-Luna G, Mahlkecht J, Cheng Q, Aguilar-Hernández I, Ornelas-Soto N (2023) Optical biosensors and their applications for the detection of water pollutants. *Biosensors* 13: 370. <https://doi.org/10.3390/bios13030370>

Hooshmand S, Kassanos P, Keshavarz M, Duru P, Kayalan CI, Kale I, Bayazit, MK (2023) Wearable nano-based gas sensors for environmental monitoring and encountered challenges in optimization. *Sensors* 23: 8648. <https://doi.org/10.3390/s23208648>

Hu X, Li F, Song Y (2019) Wearable power source: a newfangled feasibility for perovskite photovoltaics. *ACS Energy Letters* 4: 1065-1072. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.9b00503>

Huang X-J, Choi Y-K (2007) Chemical sensors based on nanostructured materials. *Sensors and Actuators B: Chemical* 122: 659-671. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.022>

Jang S, Choi S-J, Kim S-J, Hakim M, Kim I-D (2016) Rational design of highly porous SnO₂ nanotubes functionalized with biomimetic nanocatalysts for direct observation of simulated diabetes. *Advanced Functional Materials* 26: 4740-4748. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600797>

Jiménez-Cadena G, Riu J, Rius FX (2007) Gas sensors based on nanostructured materials. *Journal of Materials Chemistry* 17: 1083-1099. <https://doi.org/10.1039/B704562J>

Kang X, Wang J, Wu H, Aksay IA, Liu J, Lin Y (2009) Glucose oxidase-graphene-chitosan modified electrode for direct electrochemistry and glucose sensing. *Biosensors and Bioelectronics* 25: 901-905. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.09.004>

Kant T, Shrivastava K, Tejwani A, Tandey K, Sharma A, Gupta S (2023) Progress in the design of portable colorimetric chemical sensing devices. *Nanoscale* 15: 19016-19038. <https://doi.org/10.1039/D3NR03803C>

Kim J, Hiraiwa M, Lee H, Lee K, Cangelosi GA, Chung J (2013) Electrolyte-free amperometric immunosensor using a dendritic nanotip. *RSC Advances* 3: 4281-4287. <https://doi.org/10.1039/C3RA40262B>

Liang J, Zulkifli MYB, Choy S, Li Y, Gao M, Kong B, Yun J, Liang K (2020) Metal-Organic Framework-Plant Nanobiohybrids as Living Sensors for On-Site Environmental Pollutant Detection. *Environmental Science & Technology* 54: 11356-11364. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04688>

Lin X, Luo J, Liao M, Su Y, Lv M, Li Q, Xiao S and Xiang J (2022) Wearable Sensor-Based Monitoring of Environmental Exposures and the Associated Health Effects: A Review. *Biosensors* 12: 1131. <https://doi.org/10.3390/bios12121131>

Liu C, Yu Z, Neff D, Zhamu A, Jang BZ (2010) Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density. *Nano Letters* 10: 4863-4868. <https://doi.org/10.1021/nl102661q>

Mai L, Yang F, Zhao Y, Xu X, Xu L, Luo Y (2011) Hierarchical MnMoO₄/CoMoO₄ heterostructured nanowires with enhanced supercapacitor performance. *Nature Communications* 2: 381. <https://doi.org/10.1038/ncomms1387>

Mautner M, Elimelech M (2008) Environmental applications of carbon-based nanomaterials. *Environmental Science & Technology* 42: 5843-5859. <https://doi.org/10.1021/es8006904>

Naresh V, Lee N (2021) A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors. *Sensors* 21: 1109. <https://doi.org/10.3390/s21041109>

Nikolaev KG, Ermolenko YE, Offenhäuser A, Ermakov SS (2018) Multisensor systems by electrochemical nanowire assembly for the analysis of aqueous solutions. *Frontiers in Chemistry* 6: 256. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00256>

Plastiras, OE Deliyanni E, Samanidou V (2021) Applications of graphene-based nanomaterials in environmental analysis. *Journal of Applied Science* 11: 3028. <https://doi.org/10.3390/app11073028>

Reimhult E, Höök F (2015) Design of surface modifications for nanoscale sensor applications. *Sensors* 15: 1635-1675. <https://doi.org/10.3390/s150101635>

Salamone F, Masullo M, Sibilio S (2021) Wearable Devices for Environmental Monitoring in the Built Environment: A

- Systematic Review. *Sensors* 21: 4727. <https://doi.org/10.3390/s21144727>
- Scheiblbrandner F, Chang H, Scheiblbrandner S, Ludwig R (2021) Amperometric biosensors based on direct electron transfer enzymes. *Molecules* 26: 4525. <https://doi.org/10.3390/molecules26154525>
- Sedaghat S, Kasi V, Nejati S, Krishnakumar A, Rahimi R (2022) Improved performance of printed electrochemical sensors via cold atmospheric plasma surface modification. *Journal of Materials Chemistry C* 10: 10562-10573. <https://doi.org/10.1039/D2TC00905F>
- Tang H, Sacco LN, Vollebregt S, Ye H, Fan X, Zhang G (2020) Recent Advances in 2D/Nanostructured Metal Sulfide-Based Gas Sensors: Mechanisms, Applications, and Perspectives. *Journal of Materials Chemistry A* 8: 24943-24976. <https://doi.org/10.1039/D0TA08190F>
- Wang G, Zhang L, Zhang J (2012) A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews* 41: 797-828. <https://doi.org/10.1039/C1CS15060J>
- Wang K, Yang J, Xu H, Cao B, Qin Q, Liao X, Jin Q, Cui D (2020) Smartphone-imaged multilayered paper-based analytical device for colorimetric analysis of carcinoembryonic antigen. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 412: 2517-2528. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02475-1>
- Yao Y, Chen J, Guo Y, Lv T, Chen Z, Li N, Cao S, Chen B, Chen T (2021) Integration of interstitial fluid extraction and glucose detection in one device for wearable non-invasive blood glucose sensors. *Biosensors and Bioelectronics* 179: 113078. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113078>
- Yu G, Xie X, Pan L, Bao Z, Cui Y (2013) Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors. *Nano Energy* 2: 213-234. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.10.006>

ADVANCES IN RESEARCH ON NANOSTRUCTURED SENSORS FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS: A COMPREHENSIVE REVIEW

Juan Mancilla Gamboa, Carolina Medalla and Jorge Bernal

SUMMARY

Nanostructured sensors have emerged as a promising tool to address environmental challenges by providing highly sensitive and selective detection capabilities. This review article detail the role of nanostructured sensors in environmental applications, highlight-

ing their benefits, limitations, and future perspectives. It analyzes the different types of nanostructured sensors used in environmental monitoring, the materials employed in their fabrication, and their potential to contribute to ecosystem preservation and human health.

AVANÇOS NA PESQUISA DE SENSORES NANOESTRUTURADOS PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO ABRANGENTE

Juan Mancilla Gamboa, Carolina Medalla e Jorge Bernal

RESUMO

Os sensores nanoestruturados surgiram como uma ferramenta promissora para enfrentar desafios ambientais, graças às suas capacidades de detecção altamente sensíveis e seletivas. Este artigo de revisão examina em detalhes o papel dos sensores nanoestruturados em aplicações ambientais, destacando seus benefi-

cios, limitações e perspectivas futuras. Analisam-se os diferentes tipos de sensores nanoestruturados utilizados no monitoramento ambiental, os materiais empregados em sua fabricação e seu potencial para contribuir para a preservação dos ecossistemas e da saúde humana.