

Síntesis verde de nanopartículas de oro y su aplicación como sensores para la detección de metales y metaloides en agua: Avances y perspectivas

Green synthesis of gold nanoparticles and their application as sensors for the detection of metals and metalloids in water: Advances and perspectives

Josué A. Lara Zavala ^a, Susana S. Silva Martínez ^b, Naveen K. Reddy Bogireddy ^c

Abstract:

Green synthesis of gold nanoparticles (AuNPs) provides a sustainable approach for developing sensors for metals and metalloids in water. These particles combine high sensitivity, biocompatibility, and functionalization capability, enabling adaptation to diverse aqueous matrices. Challenges remain in reproducibility, size and morphology control, selectivity in complex water, and synthesis scalability. Integration of green AuNPs into portable or hybrid platforms offers a promising route for real-time environmental monitoring. Effective implementation requires interdisciplinary research, protocol optimization, and regulatory considerations, balancing technological innovation, sustainability, and practical applicability.

Keywords:

Green synthesis, gold nanoparticles, environmental sensors, sustainability

Resumen:

La síntesis verde de nanopartículas de oro (AuNPs) ofrece una estrategia sostenible para desarrollar sensores de metales y metaloides en agua. Estas partículas combinan alta sensibilidad, biocompatibilidad y capacidad de funcionalización, facilitando su adaptación a distintas matrices acuosas. A pesar de sus ventajas, persisten retos en reproducibilidad, control de tamaño y morfología, selectividad en aguas complejas y escalabilidad de la síntesis. La integración de AuNPs verdes en plataformas portátiles o híbridas representa una oportunidad para mejorar el monitoreo ambiental en tiempo real. Su implementación efectiva requiere investigación interdisciplinaria, optimización de protocolos y consideración de marcos regulatorios, equilibrando innovación tecnológica, sostenibilidad y aplicabilidad práctica.

Palabras Clave:

Síntesis verde, nanopartículas de oro, sensores ambientales, sostenibilidad.

Introducción

La síntesis verde de nanopartículas de oro surge como una alternativa sostenible y prometedora para la

detección de metales y metaloides en agua, contribuyendo al monitoreo y control de contaminantes de manera eficiente y ambientalmente responsable. Sin embargo, en las últimas décadas, la creciente presencia de metales y metaloides tóxicos —como arsénico (As),

^a Universidad Autónoma del Estado de Morelos | Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0001-6039-5508>, Email: lara@icf.unam.mx, josue.larazav@uaem.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Morelos | Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0003-3302-4984>, Email: ssilva@uaem.mx

^c Autor de Correspondencia, Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Ciencias Físicas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-9392-926X>, Email: naveen@icf.unam.mx

mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr)—ha convertido a numerosas fuentes hídricas en potenciales focos de riesgo ambiental y sanitario (Nordberg et al., 2022). La exposición prolongada a estos contaminantes se asocia con efectos graves en la salud humana, que van desde alteraciones neurológicas hasta daño renal y desarrollo de cáncer, al tiempo que compromete de manera significativa la biodiversidad acuática (Kiran et al., 2022). Por ejemplo, la OMS y la NOM-127-SSA1-2021 establecen límites de 0.01 mg/L para Pb, 0.006 mg/L para Cd, 0.05 mg/L para Cr total y 0.01 mg/L para As en agua potable, valores que son con frecuencia superados en descargas industriales y cuerpos de agua residual (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios et al., 2021; World Health Organization, 2022).

Si bien los métodos analíticos tradicionales, como la espectrometría de absorción atómica (AAS) y la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), ofrecen alta sensibilidad y precisión, presentan limitaciones críticas: demandan infraestructura costosa, personal especializado y tiempos de análisis prolongados. Aunque alcanzan límites de detección del orden de $\mu\text{g/L}$ o menores, sus tiempos de análisis suelen superar una hora por muestra y los costos de operación resultan poco accesibles en laboratorios no especializados (Li et al., 2023a). Estas restricciones limitan su accesibilidad para un monitoreo sistemático y oportuno, en particular en regiones con recursos tecnológicos y económicos limitados.

En este escenario, los sensores basados en nanomateriales han emergido como una alternativa prometedora para la detección rápida, sensible y económica de contaminantes metálicos en agua (Gezahegn et al., 2024). Las nanopartículas de oro (AuNPs) sintetizadas mediante métodos verdes han captado un interés creciente por combinar eficiencia tecnológica con sostenibilidad ambiental. La denominada “síntesis verde”, que emplea extractos e infusiones vegetales, microorganismos o biopolímeros como agentes reductores y estabilizantes, evita el uso de reactivos tóxicos, disminuye el impacto ambiental y permite obtener AuNPs funcionales para aplicaciones de detección en contextos de bajo recurso (Ali et al., 2023). Este ensayo se propone analizar críticamente los avances recientes en la síntesis verde de AuNPs y su aplicación como sensores para la detección de metales y metaloides en agua. La intención no es únicamente exponer los logros alcanzados, sino también mostrar sus limitaciones prácticas y explorar las perspectivas futuras. Asimismo, se abordarán los diferentes mecanismos de sensado —desde la agregación colorimétrica hasta estrategias de biorreconocimiento— y las condiciones que pueden afectar su desempeño en matrices reales,

con el fin de ofrecer una visión reflexiva que identifique tanto oportunidades de mejora como áreas clave de investigación.

Nanopartículas de oro: ventajas y desafíos en sensores

Las AuNPs han surgido como un material central en el diseño de sensores para la detección de contaminantes metálicos, gracias a sus propiedades físicas y químicas únicas. Entre estas, la resonancia de plasmon superficial localizada (LSPR, por sus siglas en inglés) es particularmente relevante: este fenómeno óptico provoca cambios en la absorción y dispersión de luz según el tamaño, la forma y la agregación de las nanopartículas (Feng et al., 2024). Tal característica permite detectar con alta sensibilidad la interacción de las AuNPs con iones metálicos en soluciones acuosas, generando señales visuales o espectroscópicas inmediatas que facilitan la monitorización rápida de contaminantes (Geleta, 2023).

En términos de mecanismos de sensado, las AuNPs pueden operar bajo distintos principios: (i) la agregación colorimétrica, donde la unión con iones metálicos provoca cambios visibles de color; (ii) el desplazamiento del LSPR sin agregación, que se refleja en variaciones sutiles en la banda de absorción; (iii) la espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS), que amplifica las señales vibracionales de moléculas adsorbidas; y (iv) los sistemas de biorreconocimiento, en los que enzimas, aptámeros o péptidos aportan selectividad frente a analitos específicos (Hammami et al., 2021; Sener et al., 2014).

Además, las AuNPs exhiben biocompatibilidad, estabilidad coloidal y facilidad de funcionalización superficial, lo que posibilita la conjugación con biomoléculas, ligandos específicos o polímeros para aumentar la selectividad hacia ciertos metales (Lee et al., 2021). Estas propiedades les confieren ventajas sobre otros nanomateriales, como nanopartículas de plata u óxidos metálicos, cuya toxicidad, agregación no controlada o degradación química puede limitar su aplicabilidad en entornos sensibles (Burlec et al., 2023). No obstante, la implementación de AuNPs en sensores enfrenta desafíos significativos (Li et al., 2023b). Aunque su sensibilidad es elevada, la reproducibilidad de la síntesis y el control de las propiedades ópticas pueden variar entre lotes, afectando la confiabilidad de los sensores. En matrices reales, factores como el pH, la fuerza iónica o la presencia de iones competidores pueden inducir respuestas inespecíficas; frente a ello, se han propuesto enfoques de pretratamiento, uso de agentes enmascarantes y optimización de la superficie de las AuNPs para preservar la selectividad (Saleh et al.,

2022).

Estas limitaciones plantean preguntas críticas: ¿hasta qué punto las AuNPs pueden ofrecer soluciones consistentes en aplicaciones de campo y no solo en laboratorio? ¿Cuáles son los límites prácticos de su uso en el monitoreo ambiental in situ?

En este ensayo, se argumenta que, si bien las propiedades de las AuNPs son prometedoras, su potencial real depende de un equilibrio entre sofisticación tecnológica, reproducibilidad experimental y sostenibilidad. De este modo, la promesa tecnológica de las AuNPs debe valorarse no solo en términos de sensibilidad, sino también considerando su reproducibilidad, sostenibilidad de síntesis y desempeño en condiciones ambientales reales.

Este análisis crítico establece un marco para evaluar la viabilidad de los sensores basados en AuNPs sintetizadas mediante métodos verdes, conectando las propiedades fundamentales del material con sus aplicaciones prácticas en la detección de metales y metaloides en agua.

Síntesis verde de nanopartículas de oro: sostenibilidad frente a control experimental

La síntesis verde de nanopartículas de oro (AuNPs) ha surgido como una alternativa prometedora frente a los métodos químicos convencionales, ofreciendo un enfoque que combina eficiencia tecnológica con sostenibilidad ambiental (Huston et al., 2021). A diferencia de las rutas tradicionales, que dependen de agentes reductores y estabilizantes potencialmente tóxicos, la síntesis verde utiliza extractos vegetales, microorganismos y biopolímeros, minimizando el impacto ambiental y aumentando la biocompatibilidad de las partículas obtenidas (Nižnik et al., 2024).

Dentro de las estrategias más empleadas, los extractos de plantas destacan por su riqueza en polifenoles, flavonoides y terpenoides, compuestos que actúan simultáneamente como agentes reductores y estabilizantes, favoreciendo la formación de AuNPs con tamaños relativamente controlados. Por su parte, bacterias, hongos y algas funcionan como biofactorías naturales que reducen los iones de oro y estabilizan las partículas en medios acuosos. Los biopolímeros, como la quitina, el almidón y la celulosa, proporcionan superficies funcionales que promueven la nucleación y agregación controlada, además de permitir aplicaciones directas en sistemas sensoriales (H. Singh et al., 2023).

No obstante, la síntesis verde enfrenta desafíos técnicos relevantes. La reproducibilidad y el control del tamaño y morfología de las partículas dependen de variables biológicas difíciles de estandarizar, como la composición exacta de los extractos vegetales o la actividad

metabólica de los microorganismos utilizados (Rónavári et al., 2021). Asimismo, la escalabilidad sigue siendo un obstáculo: protocolos exitosos a nivel de laboratorio no siempre se trasladan eficientemente a producciones mayores, lo que limita la implementación masiva de AuNPs verdes en sensores ambientales.

Desde un enfoque crítico, puede afirmarse que la síntesis verde representa un delicado equilibrio entre sostenibilidad y control experimental, como se muestra en la Figura 1. Su contribución ambiental es indiscutible, pero su potencial como plataforma para sensores depende de superar las limitaciones técnicas mediante la optimización de protocolos, la caracterización precisa de las partículas y la estandarización de procesos.

Más allá de estas ventajas conceptuales, la síntesis verde puede evaluarse con métricas cuantitativas de sostenibilidad. Se han reportado E-factores entre 5 y 20, frente a valores mayores a 50 en síntesis químicas tradicionales, lo que refleja una menor generación de residuos sólidos y líquidos (Eckelman et al., 2008; Khanam et al., 2025; Ribeiro et al., 2021; Sheldon, 2007). De igual forma, la mayoría de los protocolos verdes se realizan a temperatura ambiente y en condiciones acuosas, reduciendo el consumo energético y evitando solventes orgánicos tóxicos como tolueno o DMF. Un aspecto emergente es el fin de vida de las AuNPs: su recuperación mediante filtración o centrifugación y posterior reutilización en procesos catalíticos se perfila como estrategia para cerrar el ciclo de vida del material y reforzar su perfil ambiental (Alikhani et al., 2022).

La Figura 1 reporta varios factores que influyen en la síntesis de las nanopartículas, tales como (i) factores químicos (concentración de Au^{3+} y del reductor, pH, proporción precursor/biomolécula y estabilizantes) que controlan la nucleación, el tamaño, la uniformidad y la dispersión, (ii) factores físicos (temperatura, tiempo, agitación y luz) que influyen en la velocidad de nucleación, el crecimiento y la morfología final, (iii) factores biológicos (tipo y composición del extracto) mediante los cuales se determina la forma, estabilidad y eficiencia de la reducción, (iv) factores cinéticos (velocidad de adición del precursor y relación nucleación/crecimiento) que permiten modular la uniformidad y el tamaño final, (v) factores termodinámicos (solubilidad, saturación y energía superficial de los cristales) que afectan la forma, agregación y estabilidad, y finalmente, (vi) factores externos o de control de proceso (presión, ambiente redox, métodos de purificación y secado) los cuales impactan en la dispersión y estabilidad de las nanopartículas sintetizadas. La información se basa en la literatura científica reciente sobre síntesis verde de AuNPs (Cho et al., 2023; H. Singh et al., 2023).



Figura 1. Factores que influyen en la síntesis verde de nanopartículas de oro (AuNPs).

Elaboración propia a partir de la literatura científica reciente sobre síntesis verde de AuNPs (Cho et al., 2023; H. Singh et al., 2023).

Aplicaciones de AuNPs verdes como sensores de metales y metaloides en agua

La capacidad de las AuNPs sintetizadas mediante métodos verdes para actuar como sensores se fundamenta en su respuesta altamente sensible a interacciones químicas con iones metálicos presentes en soluciones acuosas. Este comportamiento se manifiesta principalmente a través de cambios en propiedades ópticas, como la absorción de luz y el color de la dispersión, fenómenos mediados por la LSPR. La particularidad de las AuNPs verdes radica no solo en su sensibilidad, sino también en su compatibilidad ambiental y en la posibilidad de funcionalización superficial mediante biomoléculas, polímeros o ligandos específicos, lo que permite ajustar la selectividad hacia metales de interés tales como mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr) y metaloides tales como el arsénico (As) (Cho et al., 2023).

En el caso del arsénico, se ha demostrado que la funcionalización de AuNPs con aptámeros específicos facilita la detección selectiva de As^{3+} mediante cambios observables en el color de la suspensión (Wu et al., 2012). De manera similar, la detección de mercurio se logra gracias a la formación de amalgamas Au-Hg, un mecanismo que proporciona alta selectividad y permite una respuesta rápida incluso a muy bajas concentraciones (Gul et al., 2024). La detección de plomo se ha optimizado mediante el uso de polisacáridos o secuencias de ADN como bioreceptores, aumentando la sensibilidad y reduciendo interferencias de otros iones presentes en el agua (H. Singh et al., 2021). Para cadmio (K. Singh et al., 2022) y cromo (Mohamed et al., 2021), la combinación de complejación química con grupos funcionales específicos y la capacidad de las AuNPs de alterar su agregación óptica permite alcanzar límites de

detección compatibles con los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la normativa mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Estados Unidos Mexicanos.- SALUD.- Secretaría de Salud, 2021).

En matrices reales, la presencia de iones competidores o materia orgánica puede inducir respuestas inespecíficas, mitigadas mediante pretratamientos, enmascarantes o optimización de la superficie funcionalizada de las AuNPs (Vanga & Satla, 2025). Asimismo, la reproducibilidad de los sensores depende directamente del control preciso del tamaño, forma y funcionalización de las AuNPs, aspectos que aún presentan variabilidad en síntesis verdes a gran escala (Dikshit et al., 2021).

La capacidad de AuNPs verdes para detectar metales y metaloides se ha cuantificado en diversos estudios, mostrando límites de detección, rangos lineales y tiempos de respuesta adecuados para estándares de agua potable y residual. En la Tabla 1 se resumen las métricas reportadas, los mecanismos de sensado empleados, la funcionalización de las nanopartículas y las estrategias frente a interferencias, evidenciando el potencial práctico de estas plataformas para aplicaciones ambientales.

En resumen, las AuNPs sintetizadas mediante métodos verdes presentan un balance prometedor entre sensibilidad, selectividad y sostenibilidad ambiental, consolidándose como plataformas viables para la detección de metales y metaloides en agua. La integración de estas nanopartículas en sensores portátiles o sistemas de monitoreo ambiental depende de la optimización de la funcionalización, el control de tamaño y forma, y la mitigación de interferencias propias de matrices complejas.

Tabla 1. Tabla comparativa de mecanismo de sensado, funcionalización, matriz, LOD, rango lineal, tiempo de respuesta, interferencias y estrategias. (Cho et al., 2023; Wu et al., 2012; Gul et al., 2024; H. Singh et al., 2021; K. Singh et al., 2022; Mohamed et al., 2021; Vanga & Satla, 2025)

Análito	Mecanismo de sensor	Funcionalización	Matriz	LOD µg/L	Rango lineal µg/L	Tiempo de respuesta	Interferencias / Estrategias	Formato del sensor
Hg ²⁺	Amalgama Au-Hg	Nucleótidos (ADN/ARN), Grupos azufrados (-SH), Moléculas orgánicas (aminas, ácidos, polímeros)	Matrices acuosas variadas, incluida agua potable	0.01 – 100	0.2 – 2400	5 s – 5 min	Iones competidores; mitigado con pretratamiento y ligandos selectivos	Portátil
		Grupos tiliocarboxilo, Péptidos o polímeros y Modificación superficial para estabilidad coloidal	Matrices acuosas variadas, incluida agua potable	0.004 – 120	2 – 1000	10 s – 5 min	Iones competidores; mitigado con pretratamiento y ligandos selectivos	Portátil / laboratorio
Cd ²⁺	Agregación colorimétrica	Superficie de estabilizada por Moléculas orgánicas	Matrices acuosas variadas y alimentarias	1.3 × 10 ⁻⁴ – 5.0 × 10 ⁻⁴	5 – 1000	10 s – 3 min	Iones competidores; mitigado con pretratamiento y ligandos selectivos	Portátil
Cr ⁶⁺	Agregación colorimétrica	Funcionalización con ácido maleico	Agua potable / residual	0.1- 0.4	0.2 – 2.0	10 s – 3 min	Alta selectividad frente a otros iones metálicos	Portátil
As ³⁺	Agregación colorimétrica	Aptámero específico que forma complejo con As(III)	Agua potable	5	10–100	10 s – 3 min	Alta selectividad frente a otros iones metálicos	Portátil

Retos y perspectivas

A pesar de los avances significativos en la síntesis verde de nanopartículas de oro y su aplicación como sensores de metales y metaloides, persisten desafíos técnicos y prácticos que limitan su implementación generalizada. Uno de los principales retos es la escalabilidad de la síntesis, dado que mantener un control preciso sobre el tamaño (10–50 nm), la polidispersidad (PDI 0.2–0.5) y la funcionalización de las AuNPs se vuelve más complejo a medida que se incrementa la producción. Esta variabilidad puede afectar la reproducibilidad de los sensores y, por ende, su confiabilidad en aplicaciones de campo (Nadaf et al., 2022).

Asimismo, la selectividad en matrices acuosas complejas constituye un desafío crítico, ya que la presencia de múltiples iones y materia orgánica puede interferir en la respuesta óptica de las nanopartículas, reduciendo la exactitud de la detección. Estas interferencias pueden mitigarse mediante pretratamientos, enmascarantes químicos o ajuste de la funcionalización superficial de las AuNPs (Vanga & Satla, 2025). Otro aspecto relevante es la falta de estandarización de protocolos de prueba y evaluación, lo que dificulta la comparación de resultados entre estudios y la implementación de sensores basados en AuNPs verdes como herramientas reguladas.

La adopción de criterios normativos nacionales e internacionales, como NOM-127-SSA1-2021 o protocolos ISO/IEC para sensores químicos, será clave para garantizar consistencia, precisión y confiabilidad (Estados Unidos Mexicanos.- SALUD.- Secretaría de Salud, 2021).

En paralelo, las perspectivas futuras son prometedoras. La integración de AuNPs verdes en dispositivos

portátiles, como sistemas lab-on-a-chip, tiras reactivas o plataformas microfluídicas, abre la posibilidad de realizar monitoreo ambiental in situ, en tiempo real y con mínima infraestructura (Karnwal et al., 2024).

La hibridación con otras técnicas, incluyendo electroquímica y biosensores basados en ADN o aptámeros, podría mejorar la sensibilidad y selectividad, superando algunas de las limitaciones actuales (Yu et al., 2021). Además, la consideración del ciclo de vida de las AuNPs verdes, incluyendo recuperación y reciclaje tras el uso en sensores, permitirá consolidar su perfil ambiental y la sostenibilidad de estas plataformas (Kumar, 2021)

Desde un enfoque crítico, es evidente que el éxito de los sensores basados en AuNPs verdes no depende únicamente de sus propiedades físicas o de la eficiencia de la síntesis, sino del equilibrio entre innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y aplicabilidad práctica. Superar los retos actuales requerirá un esfuerzo interdisciplinario que combine química, nanomateriales, ingeniería, toxicología y políticas ambientales, con el fin de asegurar que estas herramientas puedan cumplir su potencial como soluciones efectivas para la detección de contaminantes metálicos en agua.

Conclusiones

La síntesis verde de nanopartículas de oro constituye una estrategia prometedora y sostenible para el desarrollo de sensores destinados a la detección de metales y metaloides en agua. Este ensayo ha evidenciado que las AuNPs obtenidas mediante métodos verdes combinan sensibilidad, biocompatibilidad y potencial de funcionalización, lo que las convierte en herramientas versátiles y adaptables a distintos contextos ambientales. El análisis crítico demuestra que la eficacia de estos sensores no depende únicamente de las propiedades intrínsecas de las AuNPs, sino del control preciso de la síntesis, la reproducibilidad experimental y la adaptabilidad a matrices acuosas complejas. Los avances recientes muestran que es posible alcanzar límites de detección y rangos lineales compatibles con estándares nacionales e internacionales, así como tiempos de respuesta adecuados para aplicaciones de monitoreo rápido (Cho et al., 2023; Gul et al., 2024; Wu et al., 2012).

La integración de estas nanopartículas en plataformas portátiles, sistemas híbridos o dispositivos lab-on-a-chip abre perspectivas para un monitoreo ambiental más eficiente, económico y accesible. No obstante, la traducción de estos desarrollos a aplicaciones reales requiere superar barreras relacionadas con la escalabilidad, la estandarización de protocolos de prueba, la mitigación de interferencias y la validación tecnológica en distintos escenarios (Vanga & Satla,

2025).

Finalmente, el verdadero potencial de las AuNPs verdes radica en su capacidad de combinar innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y aplicabilidad práctica. La recuperación y reciclaje de las nanopartículas, junto con la optimización de procesos y el desarrollo de marcos regulatorios claros, son esenciales para consolidarlas como herramientas efectivas de detección ambiental. Esta reflexión crítica orienta no solo el futuro de la investigación en nanomateriales, sino también la concepción de soluciones científicas que sean técnicamente robustas y ambientalmente responsables.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por la DGAPA-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, Dirección General de Asuntos de Personal Académico) bajo el Proyecto No. PAPIIT-IA202324.

Referencias

- [1] Ali, S., Chen, X., Shi, W., Huang, G., Yuan, L., Meng, L., Chen, S., Zhonghao, X., & Chen, X. (2023). Recent Advances in Silver and Gold Nanoparticles-Based Colorimetric Sensors for Heavy Metal Ions Detection: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 53(3), 718–750. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1973886>
- [2] Alikhani, N., Hekmati, M., Karmakar, B., & Veisi, H. (2022). Green synthesis of gold nanoparticles (Au NPs) using Rosa canina fruit extract and evaluation of its catalytic activity in the degradation of organic dye pollutants of water. *Inorganic Chemistry Communications*, 139, 109351. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109351>
- [3] Burlec, A. F., Corciova, A., Boev, M., Batir-Marin, D., Mircea, C., Cioanca, O., Danila, G., Danila, M., Bucur, A. F., & Hancianu, M. (2023). Current Overview of Metal Nanoparticles' Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications, with a Focus on Silver and Gold Nanoparticles. *Pharmaceuticals*, 16(10), 1410. <https://doi.org/10.3390/ph16101410>
- [4] Cho, H. H., Jung, D. H., Heo, J. H., Lee, C. Y., Jeong, S. Y., & Lee, J. H. (2023). Gold Nanoparticles as Exquisite Colorimetric Transducers for Water Pollutant Detection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(16), 19785–19806. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c00627>
- [5] Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, Comisión Nacional del Agua, & Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. https://www.dof.gob.mx/Nota_detalle_popup.php?Codigo=5650705
- [6] Dikshit, P., Kumar, J., Das, A., Sadhu, S., Sharma, S., Singh, S., Gupta, P., & Kim, B. (2021). Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations. *Catalysts*, 11(8), 902. <https://doi.org/10.3390/catal11080902>
- [7] Eckelman, M. J., Zimmerman, J. B., & Anastas, P. T. (2008). Toward Green Nano. *Journal of Industrial Ecology*, 12(3), 316–328. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00043.x>
- [8] Estados Unidos Mexicanos.- SALUD.- Secretaría de Salud. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
- [9] Feng, Z., Jia, Y., & Cui, H. (2024). Engineering the surface roughness of the gold nanoparticles for the modulation of LSPR and SERS. *Journal of Colloid and Interface Science*, 672, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.05.217>
- [10] Geleta, G. S. (2023). A colorimetric aptasensor based on two dimensional (2D) nanomaterial and gold nanoparticles for detection of toxic heavy metal ions: A review. *Food Chemistry Advances*, 2, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100184>
- [11] Gezahegn, T. F., Ambaye, A. D., Mekoyete, T. M., Malefane, M. E., Oyedotun, K. O., & Mokrani, T. (2024). Breakthroughs in nanostructured-based chemical sensors for the detection of toxic metals. *Talanta Open*, 10, 100354. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100354>
- [12] Gul, Z., Ullah, S., Khan, S., Ullah, H., Khan, M. U., Ullah, M., Ali, S., & Altaf, A. A. (2024). Recent Progress in Nanoparticles Based Sensors for the Detection of Mercury (II) Ions in Environmental and Biological Samples. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(1), 44–60. <https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2049676>
- [13] Hammami, I., Alabdallah, N. M., jomaa, A. Al, & kamoun, M. (2021). Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of King Saud University - Science*, 33(7), 101560. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560>
- [14] Huston, M., DeBella, M., DiBella, M., & Gupta, A. (2021). Green Synthesis of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(8), 2130. <https://doi.org/10.3390/nano11082130>
- [15] Kamwal, A., Kumar Sachan, R. S., Devgon, I., Devgon, J., Pant, G., Panchpuri, M., Ahmad, A., Alshammari, M. B., Hossain, K., & Kumar, G. (2024). Gold Nanoparticles in Nanobiotechnology: From Synthesis to Biosensing Applications. *ACS Omega*, 9(28), 29966–29982. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c10352>
- [16] Khanam, S. A., Zaki, M. E. A., Islam, S., Saikia, S., & Bania, K. K. (2025). Green Chemistry Approaches for Sustainable Synthesis of Inorganic Nanomaterials (pp. 255–284). https://doi.org/10.1007/978-3-031-84643-4_9
- [17] Kiran, Bharti, R., & Sharma, R. (2022). Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 51, 880–885. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.278>
- [18] Kumar, B. (2021). Green Synthesis of Gold, Silver, and Iron Nanoparticles for the Degradation of Organic Pollutants in Wastewater. *Journal of Composites Science*, 5(8), 219. <https://doi.org/10.3390/jcs5080219>
- [19] Lee, J. W., Choi, S.-R., & Heo, J. H. (2021). Simultaneous Stabilization and Functionalization of Gold Nanoparticles via Biomolecule Conjugation: Progress and Perspectives. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(36), 42311–42328. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c10436>
- [20] Li, M., Shi, Q., Song, N., Xiao, Y., Wang, L., Chen, Z., & James, T. D. (2023a). Current trends in the detection and removal of heavy metal ions using functional materials. *Chemical Society Reviews*, 52(17), 5827–5860. <https://doi.org/10.1039/D2CS00683A>
- [21] Mohamed, A., Li, X., Li, C., Li, X., Yuan, C., & Barakat, H. (2021). Smartphone-Based Colorimetric Detection of Chromium (VI) by Maleic Acid-Functionalized Gold Nanoparticles. *Applied Sciences*, 11(22), 10894. <https://doi.org/10.3390/app112210894>

- [22] Nadaf, S. J., Jadhav, N. R., Naikwadi, H. S., Savekar, P. L., Sapkal, I. D., Kambli, M. M., & Desai, I. A. (2022). Green synthesis of gold and silver nanoparticles: Updates on research, patents, and future prospects. *OpenNano*, 8, 100076. <https://doi.org/10.1016/j.onano.2022.100076>
- [23] Niżnik, Ł., Noga, M., Kobylarz, D., Frydrych, A., Krośniak, A., Kapka-Skrzypczak, L., & Jurowski, K. (2024). Gold Nanoparticles (AuNPs)—Toxicity, Safety and Green Synthesis: A Critical Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(7), 4057. <https://doi.org/10.3390/ijms25074057>
- [24] Nordberg, G. F., Nordberg, , Monica, & Costa, M. (2022). Toxicology of metals: Overview, definitions, concepts, and trends. In *Handbook on the Toxicology of Metals* (pp. 1–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00029-2>
- [25] Ribeiro, A. P. C., Martins, L. M. D. R. S., Bastos, D. E. N., Cristino, A. F., & Galhano dos Santos, R. (2021). The importance of green chemistry metrics. In *Handbook of Greener Synthesis of Nanomaterials and Compounds* (pp. 37–62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821938-6.00002-5>
- [26] Rónavári, A., Igaz, N., Adamecz, D. I., Szerencsés, B., Molnar, C., Kónya, Z., Pfeiffer, I., & Kiricsi, M. (2021). Green Silver and Gold Nanoparticles: Biological Synthesis Approaches and Potentials for Biomedical Applications. *Molecules*, 26(4), 844. <https://doi.org/10.3390/molecules26040844>
- [27] Saleh, S. M., Almotiri, M. K., & Ali, R. (2022). Green synthesis of highly luminescent gold nanoclusters and their application in sensing Cu(II) and Hg(II). *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 426, 113719. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113719>
- [28] Sener, G., Uzun, L., & Denizli, A. (2014). Colorimetric Sensor Array Based on Gold Nanoparticles and Amino Acids for Identification of Toxic Metal Ions in Water. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(21), 18395–18400. <https://doi.org/10.1021/am5071283>
- [29] Sheldon, R. A. (2007). The E Factor: fifteen years on. *Green Chemistry*, 9(12), 1273. <https://doi.org/10.1039/b713736m>
- [30] Singh, H., Bamrah, A., Bhardwaj, S. K., Deep, A., Khatri, M., Brown, R. J. C., Bhardwaj, N., & Kim, K.-H. (2021). Recent advances in the application of noble metal nanoparticles in colorimetric sensors for lead ions. *Environmental Science: Nano*, 8(4), 863–889. <https://doi.org/10.1039/D0EN00963F>
- [31] Singh, H., Desimone, M. F., Pandya, S., Jasani, S., George, N., Adnan, M., Aldarhami, A., Bazaid, A. S., & Alderhami, S. A. (2023). Revisiting the Green Synthesis of Nanoparticles: Uncovering Influences of Plant Extracts as Reducing Agents for Enhanced Synthesis Efficiency and Its Biomedical Applications. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 18, 4727–4750. <https://doi.org/10.2147/IJN.S419369>
- [32] Singh, K., Kumar, V., Kukkar, B., Kim, K.-H., & Sharma, T. R. (2022). Facile and efficient colorimetric detection of cadmium ions in aqueous systems using green-synthesized gold nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 4673–4690. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03331-0>
- [33] Vanga, S., & Satla, S. R. (2025). A review on green synthesis, characterization and applications of plant mediated metal nanoparticles. *Next Research*, 2(2), 100356. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100356>
- [34] World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking water quality, Fourth edition incorporating the first and second addenda. ISBN 978-92-4-004506-4.
- [35] Wu, Y., Zhan, S., Wang, F., He, L., Zhi, W., & Zhou, P. (2012). Cationic polymers and aptamers mediated aggregation of gold nanoparticles for the colorimetric detection of arsenic(iii) in aqueous solution. *Chemical Communications*, 48(37), 4459. <https://doi.org/10.1039/c2cc30384a>
- [36] Yu, Y., Naik, S. S., Oh, Y., Theerthagiri, J., Lee, S. J., & Choi, M. Y. (2021). Lignin-mediated green synthesis of functionalized gold nanoparticles via pulsed laser technique for selective colorimetric detection of lead ions in aqueous media. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126585. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126585>