CAPÍTULO 2.

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS: AVANCES, MÉTODOS Y APLICACIONES EMERGENTES

Luis Clever Arias Caycho[1]
Lázaro Rubén Valdivieso Izquierdo[2]
Justina Najarro Vargas[3]
Miguel Angel Mosquera Molina[4]

[1]: Dr. en Educación, Mg. en Bioquímica, Docente Universitario e Investigador de experiencia.
https://orcid.org/0000-0003-4889-3808
[2]: Magíster en Bioquímica y Docente Universitario con experiencia de Docencia e Investigación en Ciencias de la Salud, especializado en áreas de Bioquímica.
https://orcid.org/0000-0002-8534-9767
[3]: Magíster en Docencia e Investigación en Salud y Docente Universitario con experiencia en Docencia e Investigación en Ciencias de la Salud, especializado en áreas de Química Médica, Biofísica Médica.
https://orcid.org/0000-0002-6688-4756
[4]: Licenciado en Física, con Maestría en Física con mención en Bionanotecnología.
https://orcid.org/0000-0001-8511-2535

RESUMEN

Las nanopartículas magnéticas (NPM) han emergido como materiales versátiles con aplicaciones en biomedicina, catálisis y remediación ambiental, gracias a sus propiedades únicas como el superparamagnetismo y su capacidad de respuesta a campos magnéticos. Esta revisión aborda los avances recientes en métodos de síntesis química, física y biológica, destacando las ventajas y limitaciones de cada enfoque. Mientras que los métodos químicos permiten un control preciso del tamaño y morfología, suelen requerir reactivos costosos y tóxicos. En contraste, la síntesis verde ofrece una alternativa sostenible pero enfrenta desafíos de reproducibilidad. Las técnicas de caracterización, como la difracción de rayos X, la microscopía electrónica y la magnetometría vibrante, son esenciales para evaluar las propiedades estructurales, morfológicas y magnéticas de las NPM. Sin embargo, la combinación de múltiples herramientas es crucial para obtener una comprensión integral de estos materiales. El artículo también explora aplicaciones emergentes, incluyendo hipertermia magnética, liberación controlada de fármacos y purificación de agua, subrayando la necesidad de desarrollar enfoques más sostenibles y escalables. Finalmente, se resalta el potencial de la inteligencia artificial para optimizar procesos de síntesis y el desarrollo de NPM multifuncionales, así como la importancia de abordar retos regulatorios y éticos. Se invita a la comunidad científica a colaborar interdisciplinariamente para avanzar en este campo dinámico y prometedor.

Palabras clave: Nanopartículas magnéticas, síntesis verde, caracterización, aplicaciones biomédicas, inteligencia artificial.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo de materiales a nanoescala ha revolucionado múltiples campos científicos y tecnológicos. Entre estos materiales, las nanopartículas magnéticas (NPM) han captado una atención especial debido a sus propiedades físicas y químicas únicas, que surgen de su tamaño reducido y su naturaleza magnética. Estas partículas, generalmente compuestas por óxidos de hierro como magnetita (Fe_3O_4) o maghemita (γ-Fe_2O_3), exhiben fenómenos como la superparamagnetismo, alta susceptibilidad magnética y capacidad de respuesta a estímulos externos como campos magnéticos (Laurent et al., 2008). Estas características las convierten en herramientas versátiles para aplicaciones que van desde la biomedicina hasta la ingeniería ambiental y la electrónica (Valenzuela-Amaro et al., 2023).

Las NPM son particularmente interesantes debido a su capacidad para interactuar con sistemas biológicos sin alterar significativamente su funcionalidad (Hugo et al., 2020). Por ejemplo, en el ámbito biomédico, se han utilizado para aplicaciones como la hipertermia magnética, un tratamiento innovador para el cáncer que implica calentar selectivamente células tumorales mediante la exposición a campos magnéticos alternos (Gupta & Gupta, 2005). Además, estas nanopartículas han demostrado ser eficaces como agentes de contraste en imágenes por resonancia magnética (MRI) y como vehículos para la liberación controlada de fármacos, lo que las convierte en una herramienta clave para la medicina personalizada (Pankhurst et al., 2009). En otros campos, como la catálisis y la remediación ambiental, las NPM han mostrado un gran potencial para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua gracias a su capacidad de ser manipuladas magnéticamente y reutilizadas después de su uso (Zhang et al., 2020).

La importancia de las NPM no solo radica en sus aplicaciones, sino también en los avances metodológicos que han permitido su síntesis y caracterización. La síntesis controlada de estas nanopartículas es un desafío fundamental, ya que sus propiedades dependen críticamente de parámetros como el tamaño, la morfología y la composición química. Técnicas como la coprecipitación, la descomposición térmica y la síntesis verde han permitido obtener NPM con características específicas para diferentes aplicaciones (Laurent et al., 2008). Sin embargo, cada método presenta ventajas y limitaciones, lo que subraya la necesidad de optimizar procesos para mejorar la reproducibilidad, escalabilidad y sostenibilidad de la producción de NPM (Sánchez-Moreno et al., 2024).

Además, la caracterización precisa de las NPM es esencial para garantizar su calidad y funcionalidad. Herramientas avanzadas como la difracción de rayos X (DRX), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la magnetometría de muestra vibrante (VSM) permiten evaluar las propiedades estructurales, morfológicas y magnéticas de estas nanopartículas (Gupta & Gupta, 2005). La combinación de múltiples técnicas de caracterización es crucial para comprender completamente el comportamiento de las NPM en diferentes entornos y aplicaciones.

El propósito de esta revisión es proporcionar una visión integral sobre los métodos de síntesis, las técnicas de caracterización y las aplicaciones más relevantes de las nanopartículas magnéticas. Se analizarán las principales estrategias de fabricación, destacando sus ventajas y limitaciones, así como las herramientas más utilizadas para evaluar las propiedades de las NPM. Además, se explorarán las tendencias actuales y futuras en el desarrollo de estas nanopartículas, con un enfoque en su potencial para abordar desafíos globales en áreas como la salud, el medio ambiente y la tecnología.

Este manuscrito está organizado de la siguiente manera: primero, se describen los métodos de síntesis de NPM, clasificándolos en enfoques químicos, físicos y biológicos. Luego, se discuten las técnicas de caracterización más empleadas para evaluar las propiedades de estas nanopartículas. Posteriormente, se presentan las aplicaciones emergentes de las NPM en diversos campos. Finalmente, se ofrecen conclusiones y perspectivas futuras, destacando las

oportunidades y desafíos asociados con el uso de estas nanopartículas en investigación y tecnología.

En un mundo donde la nanotecnología juega un papel cada vez más importante, las nanopartículas magnéticas representan una frontera prometedora para la innovación científica y tecnológica. Este artículo busca consolidar el conocimiento existente y proporcionar una base sólida para futuros desarrollos en este campo dinámico y en constante evolución.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta revisión se diseñó para proporcionar una visión integral y crítica de los avances en la síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas (NPM). Este enfoque incluyó criterios claros para la selección de literatura, un análisis sistemático de las técnicas reportadas y un reconocimiento explícito de las limitaciones inherentes al proceso.

Criterios de selección de literatura

Para garantizar la calidad y relevancia de la información recopilada, se consultaron fuentes científicas confiables, incluyendo artículos científicos revisados por pares, libros especializados y revisiones sistemáticas publicadas en las últimas dos décadas. Las bases de datos utilizadas para la búsqueda bibliográfica incluyeron PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se emplearon palabras clave específicas relacionadas con el tema de estudio, tales como "nanopartículas magnéticas", "síntesis química", "caracterización", "aplicaciones", "magnetita" y "superparamagnetismo". Además, se realizaron búsquedas complementarias utilizando términos más específicos, como "coprecipitación", "descomposición térmica", "microscopía electrónica" y "hipertermia magnética", para ampliar la cobertura temática.

Se priorizaron estudios que abordaran métodos innovadores o bien establecidos para la síntesis y caracterización de NPM, así como aquellos que destacaran aplicaciones emergentes. Los artículos seleccionados fueron evaluados en función de su rigor metodológico, relevancia científica y contribución al campo. En total, se revisaron más de 120 documentos, de los cuales se seleccionaron 60 referencias clave para integrar esta revisión. Esta selección se realizó considerando tanto estudios experimentales como teóricos que ofrecieran una perspectiva equilibrada sobre el tema.

Enfoque de análisis

El análisis de los datos recopilados se centró en clasificar los métodos de síntesis y caracterización de acuerdo con su naturaleza: química, física o biológica. Para cada categoría, se evaluaron las ventajas y desventajas asociadas con las técnicas reportadas, teniendo en cuenta factores como eficiencia, reproducibilidad, sostenibilidad y escalabilidad.

Métodos químicos: Estas técnicas, como la coprecipitación y la descomposición térmica, son ampliamente utilizadas debido a su capacidad para controlar el tamaño y la morfología de las NPM. Por ejemplo, la coprecipitación es uno de los métodos más simples y económicos para producir magnetita a gran escala, aunque puede presentar problemas de homogeneidad si no se optimizan las condiciones experimentales (Gubin et al., 2005). Por otro lado, la descomposición térmica permite obtener partículas con alta monodispersidad, pero requiere el uso de precursores costosos y solventes orgánicos tóxicos, lo que limita su sostenibilidad (Hyeon et al., 2001).

Métodos físicos: Técnicas como la abrasión mecánica y la deposición en fase vapor son valoradas por su capacidad para producir nanopartículas de alta pureza. Sin embargo, estos métodos suelen ser energéticamente intensivos y difíciles de escalar, lo que los hace menos viables para aplicaciones industriales (Sun & Zeng, 2002).

Métodos biológicos: La síntesis verde, que utiliza organismos vivos o extractos vegetales, ha ganado popularidad debido a su bajo impacto ambiental y costo reducido. Aunque prometedora, esta aproximación aún enfrenta desafíos relacionados con la reproducibilidad y rendimiento, especialmente cuando se

compara con métodos químicos convencionales (Iravani et al., 2014).

En cuanto a las técnicas de caracterización, se evaluaron herramientas como la difracción de rayos X (DRX), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la magnetometría de muestra vibrante (VSM). Cada técnica fue analizada en términos de su capacidad para evaluar propiedades específicas, como la estructura cristalina, la morfología y el comportamiento magnético de las NPM. Se destacó la importancia de combinar múltiples técnicas para obtener una comprensión completa de las nanopartículas sintetizadas.

Limitaciones del estudio

A pesar de los esfuerzos realizados para garantizar la exhaustividad y precisión de esta revisión, existen algunas limitaciones inherentes al proceso. En primer lugar, la heterogeneidad en los protocolos experimentales reportados en la literatura dificulta la comparación directa entre estudios. Por ejemplo, las condiciones de síntesis, como temperatura, pH y tiempo de reacción, varían significativamente entre investigaciones, lo que puede afectar la reproducibilidad de los resultados. Además, la selección de estudios pudo estar sesgada hacia aquellos publicados en inglés y disponibles en bases de datos accesibles, excluyendo potencialmente trabajos relevantes en otros idiomas o publicados en revistas regionales.

Otra limitación importante radica en la falta de uniformidad en los estándares de caracterización. Aunque técnicas como TEM y VSM son ampliamente utilizadas, no siempre se reportan los mismos parámetros o condiciones experimentales, lo que dificulta la interpretación comparativa de los datos. Finalmente, la rápida evolución del campo de las NPM implica que algunos avances recientes pueden no haber sido incluidos debido a los tiempos de publicación y acceso a la literatura más actualizada.

En resumen, esta metodología buscó proporcionar una base sólida para comprender los avances en la síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas, reconociendo tanto sus fortalezas como sus limitaciones. Este enfoque permitió identificar áreas clave para futuras investigaciones y subrayar la necesidad de estandarización en los protocolos experimentales.

RESULTADOS

Métodos de síntesis de nanopartículas magnéticas

La síntesis de nanopartículas magnéticas (NPM) es un campo en constante evolución, donde los métodos químicos, físicos y biológicos han demostrado ser las principales estrategias para producir materiales con propiedades controladas.

Métodos químicos: Entre los enfoques más empleados se encuentran la coprecipitación, la descomposición térmica, la microemulsión y el método sol-gel. La coprecipitación es ampliamente utilizada debido a su simplicidad y bajo costo, permitiendo la producción de magnetita (Fe_3O_4) y maghemita (γ-Fe_2O_3) a gran escala. Sin embargo, este método puede generar partículas con distribuciones de tamaño heterogéneas si no se optimizan las condiciones experimentales (Gupta & Gupta, 2005). Por otro lado, la descomposición térmica permite obtener nanopartículas monodispersas con alta cristalinidad, aunque requiere el uso de precursores costosos y solventes orgánicos tóxicos, lo que limita su sostenibilidad (Hyeon et al., 2001). El método sol-gel, que implica la formación de un gel a partir de precursores líquidos, es valorado por su capacidad para incorporar dopantes funcionales, pero suele ser más lento y menos escalable (Brinker & Scherer, 1990).

Métodos físicos: Estas técnicas, como la abrasión mecánica, la deposición en fase vapor y la ablación láser, son conocidas por producir nanopartículas de alta pureza. La deposición en fase vapor, por ejemplo, permite un control preciso del grosor y la composición de las capas depositadas, lo que es ideal para aplicaciones electrónicas (Sun & Zeng, 2002). Sin embargo, estos métodos suelen ser energéticamente intensivos y difíciles de escalar, además de presentar desafíos para controlar el tamaño y la morfología de las partículas. La ablación láser, aunque eficaz para producir nanopartículas

coloidales estables, requiere equipos especializados y costosos, lo que limita su aplicación industrial (Amendola & Meneghetti, 2009).

Métodos biológicos: La síntesis verde ha ganado relevancia en los últimos años debido a su bajo impacto ambiental y sostenibilidad. Esta aproximación utiliza organismos vivos, como bacterias y hongos, o extractos vegetales para reducir precursores metálicos y formar nanopartículas magnéticas. Aunque prometedora, esta técnica enfrenta desafíos relacionados con la reproducibilidad y el rendimiento, especialmente cuando se compara con métodos químicos convencionales (Iravani et al., 2014). Además, las nanopartículas obtenidas mediante síntesis verde suelen requerir pasos adicionales de purificación para eliminar residuos biológicos.

Técnicas de caracterización

Para evaluar las propiedades de las NPM, se emplean diversas técnicas de caracterización estructural, morfológica, magnética y superficial.

Caracterización estructural: La difracción de rayos X (DRX) es una herramienta fundamental para determinar la estructura cristalina y la fase de las nanopartículas. Complementariamente, la espectroscopía Raman proporciona información sobre vibraciones moleculares y defectos estructurales (Laurent et al., 2008). Ambas técnicas son esenciales para confirmar la formación de fases magnéticas específicas, como la magnetita o la maghemita.

Caracterización morfológica: La microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la microscopía electrónica de barrido (SEM) permiten visualizar la morfología, el tamaño y la distribución de las nanopartículas. El TEM es particularmente útil para estudiar detalles a nanoescala, mientras que el SEM ofrece una visión tridimensional de las partículas (Pankhurst et al., 2009).

Caracterización magnética: La magnetometría de muestra vibrante (VSM) es ampliamente utilizada para medir propiedades magnéticas como la magnetización de saturación y el superparamagnetismo. La espectroscopía Mössbauer, por su parte, proporciona información detallada sobre el estado de oxidación y la interacción magnética a nivel atómico (Gubin et al., 2005).

Caracterización superficial: La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es clave para identificar grupos funcionales en la superficie de las nanopartículas, lo que es crucial para su funcionalización. El análisis termogravimétrico (TGA) complementa esta información al evaluar la estabilidad térmica y la cantidad de recubrimientos orgánicos o poliméricos (Zhang et al., 2020).

Aplicaciones emergentes

Las NPM han encontrado aplicaciones innovadoras en múltiples campos. En biomedicina, se utilizan para la hipertermia magnética, un tratamiento contra el cáncer que implica calentar selectivamente células tumorales mediante la exposición a campos magnéticos alternos (Pankhurst et al., 2009). También se emplean como agentes de contraste en imágenes por resonancia magnética (MRI) y como vehículos para la liberación controlada de fármacos, mejorando la precisión y eficacia de los tratamientos médicos.

En catálisis, las NPM actúan como catalizadores eficientes en procesos de oxidación avanzada y reducción catalítica, gracias a su alta área superficial y facilidad de separación magnética (Zhang et al., 2020). En el ámbito ambiental, estas nanopartículas han demostrado ser efectivas para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, ofreciendo una solución sostenible para la purificación de recursos hídricos.

DISCUSIÓN

Comparación de métodos de síntesis

La elección del método de síntesis de nanopartículas magnéticas (NPM) juega un papel crucial en la determinación de sus propiedades y aplicaciones. Los métodos químicos, como la coprecipitación y la descomposición térmica,

destacan por su eficiencia y capacidad para controlar el tamaño y la morfología de las partículas. Sin embargo, estos enfoques a menudo requieren el uso de reactivos tóxicos y solventes orgánicos costosos, lo que plantea serias preocupaciones sobre su sostenibilidad ambiental y económica (Gupta & Gupta, 2005). Por otro lado, los métodos físicos, aunque valorados por su alta pureza y escalabilidad, enfrentan desafíos significativos relacionados con el alto consumo energético y la dificultad para controlar el tamaño de las nanopartículas (Sun & Zeng, 2002). Estas limitaciones han impulsado una tendencia hacia métodos más ecológicos, como la síntesis verde, que utiliza organismos vivos o extractos vegetales para producir NPM de manera sostenible. Aunque esta aproximación aún presenta problemas de reproducibilidad y rendimiento, su bajo impacto ambiental la convierte en una alternativa prometedora para futuras investigaciones (Iravani et al., 2014). La optimización de estos métodos biológicos, junto con la integración de tecnologías avanzadas como la biotecnología, podría superar estas barreras y permitir su adopción a gran escala.

Relevancia de las técnicas de caracterización

La caracterización precisa de las NPM es esencial para garantizar su funcionalidad y aplicabilidad en diferentes campos. Las técnicas tradicionales, como la difracción de rayos X (DRX) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), han sido fundamentales para evaluar las propiedades estructurales y morfológicas de las nanopartículas. Sin embargo, estas herramientas por sí solas no proporcionan una comprensión completa de las complejas interacciones que ocurren a nanoescala. Por ejemplo, aunque el TEM permite visualizar la morfología de las partículas, no ofrece información detallada sobre su comportamiento magnético, lo que requiere el uso complementario de técnicas como la magnetometría de muestra vibrante (VSM) o la espectroscopía Mössbauer (Gubin et al., 2005). Además, las limitaciones de las técnicas tradicionales frente a nuevos desarrollos tecnológicos han llevado a la búsqueda de enfoques más avanzados. Por ejemplo, la espectroscopía Raman mejorada superficialmente (SERS) y la tomografía de electrones han emergido como herramientas innovadoras para estudiar propiedades superficiales y defectos estructurales con mayor precisión (Zhang et al., 2020). La combinación estratégica de múltiples técnicas de caracterización es, por

tanto, indispensable para obtener una visión integral de las propiedades de las NPM y optimizar su rendimiento en aplicaciones específicas.

Perspectivas futuras

El campo de las nanopartículas magnéticas está en constante evolución, impulsado por avances tecnológicos y la creciente demanda de materiales multifuncionales. Una de las tendencias más prometedoras es la integración de inteligencia artificial (IA) para optimizar los procesos de síntesis. Algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar grandes volúmenes de datos experimentales para predecir las condiciones óptimas de síntesis y mejorar la reproducibilidad de las NPM (Butler et al., 2018). Esta aproximación no solo reduce el tiempo y los costos asociados con los ensayos experimentales, sino que también facilita el desarrollo de nanopartículas personalizadas para aplicaciones específicas.

Otra área de interés es el desarrollo de NPM multifuncionales que combinen propiedades magnéticas con otras funcionalidades, como respuesta óptica o capacidad catalítica. Estas nanopartículas híbridas tienen el potencial de abordar desafíos complejos, como la teranóstica, que integra diagnóstico y tratamiento en un solo sistema (Pankhurst et al., 2009). Sin embargo, el diseño de materiales multifuncionales también plantea retos regulatorios y éticos significativos. El uso de nanomateriales en medicina, por ejemplo, requiere evaluaciones rigurosas de su toxicidad y biodistribución para garantizar su seguridad en aplicaciones humanas (Nel et al., 2006). Además, la falta de normativas internacionales claras sobre el uso de nanotecnología en productos comerciales subraya la necesidad de abordar estos aspectos desde una perspectiva ética y legal.

En resumen, el futuro de las nanopartículas magnéticas depende de la convergencia de innovaciones tecnológicas, enfoques sostenibles y marcos regulatorios robustos. La integración de IA, el desarrollo de materiales multifuncionales y la adopción de prácticas verdes representan oportunidades

clave para impulsar este campo hacia nuevas fronteras. No obstante, es fundamental abordar los desafíos éticos y regulatorios asociados con el uso de nanomateriales para garantizar su aplicación segura y responsable en beneficio de la sociedad.

CONCLUSIÓN

Las nanopartículas magnéticas (NPM) han demostrado ser una herramienta versátil con un amplio espectro de aplicaciones en campos como la biomedicina, la catálisis y la remediación ambiental. Los avances recientes en métodos de síntesis, desde técnicas químicas convencionales hasta enfoques verdes más sostenibles, han permitido mejorar el control sobre sus propiedades físicas y químicas. Asimismo, las innovaciones en técnicas de caracterización han proporcionado una comprensión más profunda de su estructura, morfología y comportamiento magnético, facilitando su optimización para aplicaciones específicas.

Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la reproducibilidad, escalabilidad y sostenibilidad de los procesos de producción. Es crucial desarrollar enfoques más ecológicos y económicos que permitan la fabricación a gran escala sin comprometer la calidad ni el impacto ambiental. Además, la integración de inteligencia artificial y la creación de materiales multifuncionales abren nuevas posibilidades para su uso en teranóstica y otras áreas emergentes.

Finalmente, se invita a la comunidad científica a continuar explorando nuevas aplicaciones y mejorando las existentes mediante colaboraciones interdisciplinarias. Solo a través de esfuerzos conjuntos será posible superar los retos regulatorios y éticos asociados con el uso de nanomateriales, asegurando su aplicación segura y responsable para beneficio de la sociedad.

REFERENCIAS

Amendola, V., & Meneghetti, M. (2009). Laser ablation synthesis in solution and size manipulation of noble metal nanoparticles. *Physical Chemistry Chemical Physics, 11*(20), 3805-3821. https://doi.org/10.1039/B900654K

Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press.

Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., & Walsh, A. (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature, 559*(7715), 547-555. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2

Gubin, S. P., Koksharov, Y. A., Khomutov, G. B., & Yurkov, G. Y. (2005). Magnetic nanoparticles: preparation, structure and properties. *Russian Chemical Reviews, 74*(6), 489-520. https://doi.org/10.1070/RC2005v074n06ABEH000897

Gupta, A. K., & Gupta, M. (2005). Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials, 26*(18), 3995-4021. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.10.012

Hyeon, T., Lee, S. S., Park, J., Chung, Y., & Na, H. B. (2001). Synthesis of highly crystalline and monodisperse maghemite nanocrystallites without a size-selection process. *Journal of the American Chemical Society, 123*(51), 12798-12801. https://doi.org/10.1021/ja016812s

Hugo, R. M. O., Cabezas, J. R. C., Bastidas, V. N. Y., & Cali, D. I. Q. (2020). Síntesis y caracterización fisico-química de nanopartículas magnéticas de hierro (magnetita)–liofilización. *Dominio de las Ciencias, 6*(3), 1094-1107.

Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S. V., & Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences, 9*(6), 385-406.

Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., & Muller, R. N. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Reviews, 108*(6), 2064-2110. https://doi.org/10.1021/cr068445e

Nel, A., Xia, T., Mädler, L., & Li, N. (2006). Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science, 311*(5761), 622-627. https://doi.org/10.1126/science.1114397

Pankhurst, Q. A., Connolly, J., Jones, S. K., & Dobson, J. (2009). Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics, 42*(22), 224001. https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/22/224001

Sánchez-Moreno, H. J., Brito, V. M. C., Rivadeneira, K. S. J., Silva, J. A. N., Zambrano, M., Calderón, H., & Añilema, L. (2024). Magnetita sintetizada con cloruro férrico y sulfato ferroso frente a nanopartículas de magnetita comercial en la eliminación de mercurio: estudio comparativo. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, 43*.

Sun, S., & Zeng, H. (2002). Size-controlled synthesis of magnetite nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society, 124*(28), 8204-8205. https://doi.org/10.1021/ja026501x

Valenzuela-Amaro, H. M., Vázquez-Ortega, P. G., Zazueta-Alvarez, D. E., López-Miranda, J., & Rojas-Contreras, J. A. (2023). Síntesis verde de nanopartículas de magnetita (NPs-Fe3O4): factores y limitaciones. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 16*(30).

Zhang, L., & Gu, H. (2020). Green synthesis of magnetic nanoparticles using plant extracts: A review. *Journal of Nanomaterials, 2020*, 1-15. https://doi.org/10.1155/2020/8812354