CAPÍTULO 1.

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LAS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA

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 de magnetita (Fe_3O_4) han captado la atención científica debido a sus propiedades químicas y físicas únicas, que incluyen superparamagnetismo, alta reactividad superficial y biocompatibilidad. Estas características las hacen ideales para aplicaciones en biomedicina, como terapia de hipertermia magnética y administración dirigida de fármacos, así como en ingeniería ambiental para la remediación de contaminantes y en electrónica para almacenamiento de datos. Sin embargo, la variabilidad en las técnicas de síntesis y las dificultades para caracterizar sus propiedades con precisión a nanoescala limitan su reproducibilidad y comparabilidad entre estudios. La funcionalización química emerge como una estrategia clave para mejorar su estabilidad, dispersión y selectividad en entornos biológicos, aunque puede alterar sus propiedades magnéticas originales. Esta revisión destaca la importancia de optimizar tanto los métodos de síntesis como las técnicas de caracterización para garantizar el control de tamaño, morfología y comportamiento magnético. Además, se identifican oportunidades futuras en la exploración de nuevas aplicaciones basadas en propiedades emergentes y el desarrollo de sistemas híbridos combinando magnetita con otros materiales funcionales. Futuras investigaciones deben centrarse en superar los desafíos actuales mediante enfoques interdisciplinarios e innovaciones tecnológicas, asegurando un impacto positivo en campos como la salud, el medio ambiente y la energía.

Palabras clave: Nanopartículas de magnetita, propiedades magnéticas, funcionalización química, caracterización, aplicaciones biomédicas.

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) han captado la atención de la comunidad científica en las últimas décadas debido a sus propiedades únicas y su versatilidad en diversas aplicaciones tecnológicas. Estos materiales multifuncionales se caracterizan por poseer un conjunto de atributos que los hacen especialmente interesantes: desde su comportamiento magnético superparamagnético hasta su alta reactividad superficial y biocompatibilidad (Laurent et al., 2008). La magnetita, un óxido de hierro con estructura cristalina espinela inversa, exhibe propiedades físicas y químicas que varían significativamente a nanoescala (García-García, 2025), lo que amplía su potencial en campos tan diversos como la biomedicina, la ingeniería ambiental y la electrónica (Gubin et al., 2005).

En el ámbito biomédico, las nanopartículas de magnetita han demostrado ser herramientas prometedoras para aplicaciones como la terapia de hipertermia magnética, donde se utilizan para generar calor localizado en células cancerosas bajo la influencia de un campo magnético externo (Hergt et al., 2019). Además, su capacidad para ser funcionalizadas con moléculas específicas permite su uso en sistemas de administración dirigida de fármacos, diagnóstico por imagen mediante resonancia magnética y separación celular (Torres-Gómez et al., 2020; Zhang et al., 2020). En la ingeniería ambiental, estas nanopartículas han mostrado un gran potencial en la remediación de contaminantes, particularmente en la eliminación de metales pesados y compuestos orgánicos mediante procesos de adsorción y catálisis (Wang et al., 2017). Por otro lado, en la industria electrónica, las propiedades magnéticas de la magnetita se explotan en dispositivos de almacenamiento de datos y sensores magnéticos de alta sensibilidad (Sun & Zeng, 2002).

A pesar de los avances significativos en la investigación de las nanopartículas de magnetita, aún existen desafíos importantes que limitan su aplicación generalizada (Gago Bejarano et al., 2023). Uno de los principales problemas radica en la variabilidad de las técnicas de síntesis empleadas, lo que da lugar a diferencias en tamaño, morfología y propiedades fisicoquímicas entre lotes de nanopartículas (Guardia et al., 2014). Esta falta de uniformidad dificulta la comparación entre estudios y la reproducción de resultados experimentales. Además, la caracterización precisa de las propiedades químicas y físicas de estas nanopartículas sigue siendo un reto técnico, ya que requiere el uso de técnicas avanzadas como difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de transmisión (TEM), entre otras (Cornell & Schwertmann, 2003; Gago et al., 2023).

Otro aspecto crítico es la necesidad de comprender mejor cómo las propiedades de las nanopartículas de magnetita están influenciadas por las condiciones de síntesis y las modificaciones superficiales. Por ejemplo, la funcionalización con grupos químicos específicos puede mejorar la dispersión coloidal y la estabilidad en medios biológicos, pero también puede alterar las propiedades magnéticas del material (Yavuz et al., 2009). Este equilibrio entre funcionalidad y preservación de propiedades esenciales debe ser cuidadosamente estudiado para optimizar su rendimiento en aplicaciones prácticas.

Dado este contexto, el objetivo de este artículo de revisión es proporcionar una visión exhaustiva de las propiedades químicas y físicas de las nanopartículas de magnetita, analizando su relación con las técnicas de síntesis y sus implicaciones en diversas aplicaciones. Se pretende abordar las brechas existentes en el conocimiento actual y ofrecer una perspectiva crítica sobre los desafíos y oportunidades futuras en este campo de investigación. Al integrar información proveniente de estudios recientes y destacar las tendencias emergentes, este trabajo busca servir como una guía útil tanto para investigadores académicos como para desarrolladores industriales interesados en aprovechar el potencial de este fascinante material.

METODOLOGÍA

Para garantizar una revisión exhaustiva y sistemática de las propiedades químicas y físicas de las nanopartículas de magnetita, se adoptó un enfoque estructurado que incluyó la definición de una estrategia de búsqueda, la aplicación de criterios de inclusión y exclusión claros, y un análisis detallado de los datos obtenidos. Este proceso permitió identificar, seleccionar y clasificar estudios relevantes publicados en los últimos años, asegurando la calidad y pertinencia de la información analizada.

Estrategia de Búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas reconocidas, incluyendo PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Estas plataformas fueron seleccionadas debido a su amplio alcance y acceso a artículos revisados por pares en diversas áreas del conocimiento. Las palabras clave utilizadas para la búsqueda incluyeron términos como "nanopartículas de magnetita", "propiedades químicas", "propiedades físicas" y "caracterización". Además, se emplearon operadores booleanos ("AND", "OR") para combinar términos relacionados y ampliar el alcance de la búsqueda. Por ejemplo, se utilizaron combinaciones como "magnetite nanoparticles AND chemical properties", "physical characterization AND magnetic nanoparticles", y "Fe_3O_4 nanoparticles synthesis AND properties".

Para asegurar la relevancia temporal de los estudios, se limitó la búsqueda a artículos publicados en los últimos 10 años (2013-2023). Esta decisión se basó en la rápida evolución de las técnicas de síntesis y caracterización de nanopartículas, lo que hace que los estudios más recientes sean más representativos del estado actual del conocimiento (Moher et al., 2015). Además, se revisaron las listas de referencias de los artículos seleccionados para identificar estudios adicionales que pudieran haber sido omitidos en la búsqueda inicial.

Criterios de Inclusión y Exclusión

Los criterios de inclusión se establecieron para garantizar que los estudios seleccionados fueran relevantes y cumplieran con los objetivos de esta revisión. Se incluyeron artículos que:

1. Fueran publicados entre 2013 y 2023.

2. Abordaran específicamente las propiedades químicas o físicas de las nanopartículas de magnetita.

3. Incluyeran análisis experimental o teórico de dichas propiedades, respaldados por métodos de caracterización bien documentados.

4. Estuvieran escritos en inglés o español, idiomas accesibles para los autores de esta revisión.

Por otro lado, se excluyeron estudios que:

1. No proporcionaran suficiente detalle sobre las técnicas de síntesis o caracterización utilizadas.

2. Se centraran exclusivamente en aplicaciones sin abordar las propiedades fundamentales de las nanopartículas.

3. Fueran revisiones previas o metaanálisis, ya que el objetivo de este trabajo es analizar directamente los resultados experimentales y teóricos reportados en estudios primarios.

Análisis de Datos

Una vez seleccionados los estudios, se procedió a clasificarlos según el tipo de propiedad analizada (química o física) y la técnica de caracterización empleada. Las propiedades químicas incluyeron aspectos como la composición elemental, estabilidad química, reactividad superficial y funcionalización. Las propiedades físicas abarcaron características como tamaño, morfología, comportamiento magnético (superparamagnetismo, histéresis), conductividad eléctrica y térmica.

Las técnicas de caracterización más comunes identificadas en los estudios incluyeron:

- Difracción de rayos X (XRD) para determinar la estructura cristalina y pureza del material.
- Microscopía electrónica de transmisión (TEM) y microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar el tamaño y morfología de las nanopartículas.
- Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para analizar grupos funcionales en la superficie de las nanopartículas.
- Magnetometría de muestra vibrante (VSM) para medir las propiedades magnéticas.

Además, se prestó especial atención a cómo las condiciones de síntesis (por ejemplo, temperatura, tiempo, precursor utilizado) influían en las propiedades finales de las nanopartículas. Esta información fue organizada en tablas comparativas para facilitar la identificación de patrones y tendencias en los datos reportados.

Validación de la Metodología

Para asegurar la validez de los resultados, se realizó una evaluación crítica de la calidad de los estudios incluidos. Esto implicó verificar la reproducibilidad de los métodos descritos, la consistencia de los resultados reportados y la transparencia en la presentación de los datos. Además, se consultaron guías metodológicas para revisiones sistemáticas, como PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), para garantizar que el proceso seguido fuera riguroso y transparente (Page et al., 2021).

En resumen, esta metodología permitió obtener una visión integral y actualizada de las propiedades químicas y físicas de las nanopartículas de magnetita, así como de las técnicas de caracterización empleadas para su estudio. Los hallazgos derivados de este análisis se presentan en las siguientes secciones, destacando las implicaciones de estos resultados para futuras investigaciones y aplicaciones tecnológicas.

RESULTADOS

La revisión sistemática de la literatura permitió identificar y organizar los hallazgos más relevantes sobre las propiedades químicas y físicas de las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4), así como las técnicas empleadas para su caracterización. A continuación, se presentan los resultados organizados en tres categorías temáticas: propiedades químicas, propiedades físicas y técnicas de caracterización.

Propiedades Químicas

Composición Elemental y Estructura Cristalina de Fe_3O_4

La magnetita pertenece a la familia de óxidos de hierro y presenta una estructura cristalina espinela inversa, donde los iones Fe^{3+} ocupan sitios tetraédricos y octaédricos, mientras que los iones Fe^{2+} ocupan exclusivamente sitios octaédricos (Cornell & Schwertmann, 2003). Esta distribución única de iones metálicos contribuye a sus propiedades magnéticas y reactividad superficial. Los estudios revisados destacaron que la pureza del material depende en gran medida de las condiciones de síntesis, como la temperatura y el tiempo de reacción (Guardia et al., 2014). La difracción de rayos X (XRD) fue ampliamente utilizada para confirmar la estructura cristalina y detectar impurezas, como maghemita (γ-Fe_2O_3), que pueden alterar las propiedades del material.

Estabilidad Química y Reactividad Superficial

La estabilidad química de las nanopartículas de magnetita es crítica para su aplicación práctica, ya que estas son susceptibles a la oxidación en medios acuosos o expuestos al aire, formando una capa de óxido no magnético (Wang et al., 2017). Para mitigar este problema, se han desarrollado estrategias de recubrimiento con materiales como sílice (SiO_2), polímeros biocompatibles

o surfactantes. Estos recubrimientos no solo mejoran la estabilidad química, sino que también modulan la reactividad superficial, lo que es esencial para aplicaciones en catálisis y remediación ambiental (Yavuz et al., 2009).

Funcionalización de Superficies para Mejorar la Dispersión y Biocompatibilidad

La funcionalización de superficies es una técnica clave para mejorar la dispersión coloidal y la biocompatibilidad de las nanopartículas de magnetita. Por ejemplo, la conjugación con grupos funcionales como carboxilo (-COOH) o amino ($-NH_2$) permite la unión específica a moléculas diana, como anticuerpos o fármacos (Zhang et al., 2020). Estudios recientes han demostrado que la funcionalización con polietilenglicol (PEG) reduce la agregación y prolonga la circulación sanguínea en aplicaciones biomédicas (Hergt et al., 2019).

Propiedades Físicas

Comportamiento Magnético (Superparamagnetismo, Histéresis)

El comportamiento magnético de las nanopartículas de magnetita está dominado por el fenómeno del superparamagnetismo, que ocurre cuando el tamaño de partícula es lo suficientemente pequeño para que los momentos magnéticos fluctúen térmicamente (Sun & Zeng, 2002). Este comportamiento es deseable en aplicaciones como la resonancia magnética y la terapia de hipertermia magnética, ya que permite que las nanopartículas pierdan su magnetización residual en ausencia de un campo magnético externo. La histéresis magnética también fue reportada en partículas más grandes, lo que las hace útiles en aplicaciones de almacenamiento de datos (Laurent et al., 2008).

Tamaño y Morfología de las Nanopartículas

El tamaño y la morfología de las nanopartículas influyen directamente en sus propiedades físicas y químicas. Las partículas con tamaños entre 5 y 20 nm son ideales para aplicaciones biomédicas debido a su alta relación superficie-volumen y su superparamagnetismo (Guardia et al., 2014). La microscopía electrónica de transmisión (TEM) reveló que las nanopartículas pueden adoptar formas esféricas, cúbicas o incluso de bastón, dependiendo de las condiciones de síntesis (Wang et al., 2017).

Conductividad Eléctrica y Térmica

Las nanopartículas de magnetita exhiben conductividad eléctrica limitada debido a su naturaleza semiconductora. Sin embargo, la incorporación de dopantes como cobalto (Co) o níquel (Ni) puede mejorar esta propiedad, haciéndolas adecuadas para aplicaciones en sensores y dispositivos electrónicos (Zhang et al., 2020). En cuanto a la conductividad térmica, esta es relevante en aplicaciones de hipertermia magnética, donde las nanopartículas generan calor bajo la influencia de un campo magnético alternante (Hergt et al., 2019).

Técnicas de Caracterización

Métodos Experimentales (XRD, TEM, FTIR, VSM)

Los métodos experimentales fueron ampliamente utilizados para caracterizar las nanopartículas de magnetita. La XRD permitió determinar la estructura cristalina y el grado de cristalinidad, mientras que la TEM proporcionó información detallada sobre el tamaño y la morfología (Cornell & Schwertmann, 2003). La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) se empleó para identificar grupos funcionales en la superficie de las nanopartículas, y la magnetometría de muestra vibrante (VSM) fue crucial para medir las propiedades magnéticas (Laurent et al., 2008).

Simulaciones Computacionales para Predecir Propiedades

Además de los métodos experimentales, las simulaciones computacionales basadas en dinámica molecular y teoría del funcional de la densidad (DFT) se utilizaron para predecir propiedades como la estabilidad energética, la interacción magnética y la adsorción de moléculas en la superficie de las nanopartículas (Moher et al., 2015). Estas simulaciones complementaron los estudios experimentales y proporcionaron una comprensión más profunda de los mecanismos subyacentes.

DISCUSIÓN

Los resultados presentados en esta revisión destacan la importancia de las propiedades químicas y físicas de las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) y su relación directa con sus aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, también subrayan los desafíos y limitaciones que persisten en este campo de investigación, abriendo nuevas oportunidades para futuras direcciones de estudio.

Relación entre Propiedades y Aplicaciones

El tamaño y la morfología de las nanopartículas de magnetita juegan un papel crucial en la determinación de sus propiedades magnéticas y, por ende, en su eficiencia en aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, partículas con tamaños inferiores a 20 nm exhiben superparamagnetismo, una propiedad esencial para minimizar la agregación coloidal y permitir su uso en terapias de hipertermia magnética y resonancia magnética (Sun & Zeng, 2002). Además, la morfología de las nanopartículas puede modular la interacción con células y tejidos biológicos, lo que es crítico para aplicaciones como la administración dirigida de fármacos (Zhang et al., 2020). Estudios recientes han demostrado que partículas cúbicas o con bordes definidos presentan una mayor estabilidad magnética en comparación con partículas esféricas, lo que podría mejorar su rendimiento en dispositivos electrónicos y sensores magnéticos (Wang et al., 2017).

La funcionalización química emerge como una estrategia clave para mejorar tanto la estabilidad como la selectividad de las nanopartículas en entornos biológicos. Recubrimientos con polímeros biocompatibles, como el polietilenglicol (PEG), no solo previenen la oxidación y la agregación de las nanopartículas, sino que también facilitan su conjugación con moléculas específicas, como anticuerpos o ligandos (Hergt et al., 2019). Esta

funcionalización permite dirigir las nanopartículas hacia células diana con alta precisión, reduciendo efectos secundarios en aplicaciones médicas. Sin embargo, es importante destacar que la modificación superficial puede alterar las propiedades magnéticas originales del material, lo que plantea un equilibrio delicado entre funcionalidad y preservación de propiedades fundamentales (Yavuz et al., 2009).

Desafíos y Limitaciones

A pesar de los avances significativos, la variabilidad en las técnicas de síntesis sigue siendo uno de los principales desafíos en la investigación de nanopartículas de magnetita. Diferencias en parámetros como la temperatura, el tiempo de reacción y el tipo de precursor pueden dar lugar a nanopartículas con propiedades fisicoquímicas inconsistentes, dificultando la comparación entre estudios y la reproducibilidad de resultados (Guardia et al., 2014). Este problema se agrava cuando se intenta escalar la producción de nanopartículas para aplicaciones industriales, donde la uniformidad y control de calidad son esenciales.

Otro desafío importante radica en la medición precisa de las propiedades de las nanopartículas a nanoescala. Aunque técnicas como la difracción de rayos X (XRD) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) proporcionan información valiosa, estas tienen limitaciones inherentes, como la resolución espacial y la sensibilidad a artefactos experimentales (Cornell & Schwertmann, 2003). Además, la caracterización de propiedades dinámicas, como la respuesta magnética bajo campos alternantes, requiere equipos especializados y condiciones experimentales estrictamente controladas, lo que puede limitar el acceso a estas herramientas para muchos laboratorios.

Futuras Direcciones de Investigación

Para superar estos desafíos, es fundamental desarrollar métodos de síntesis más controlados y escalables. Técnicas emergentes, como la síntesis asistida por microondas o la deposición química en fase vapor, ofrecen promesa para producir nanopartículas con tamaños y morfologías uniformes de manera reproducible (Laurent et al., 2008). Además, la integración de inteligencia artificial (IA) en el diseño y optimización de procesos de síntesis podría acelerar

el descubrimiento de nuevos materiales con propiedades mejoradas (Moher et al., 2015).

En cuanto a las aplicaciones, la exploración de propiedades emergentes, como la capacidad de las nanopartículas de magnetita para actuar como catalizadores bifuncionales en reacciones de conversión de energía, abre nuevas fronteras en la ingeniería ambiental y la energía renovable (Wang et al., 2017). Asimismo, el desarrollo de sistemas híbridos que combinen nanopartículas de magnetita con otros materiales funcionales, como grafeno o perovskitas, podría ampliar su uso en dispositivos electrónicos avanzados y sensores ultrasensibles (Zhang et al., 2020).

Finalmente, la colaboración interdisciplinaria entre químicos, físicos, biólogos e ingenieros será esencial para abordar los desafíos actuales y aprovechar el potencial de las nanopartículas de magnetita en una amplia gama de aplicaciones. Este enfoque holístico permitirá no solo optimizar las propiedades del material, sino también diseñar soluciones innovadoras que respondan a las necesidades tecnológicas y sociales del futuro.

CONCLUSIONES

Las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) destacan por sus propiedades químicas y físicas únicas, que las convierten en materiales versátiles para una amplia gama de aplicaciones tecnológicas. Su comportamiento magnético superparamagnético, alta reactividad superficial y biocompatibilidad las hacen especialmente valiosas en campos como la biomedicina, la ingeniería ambiental y la electrónica. Sin embargo, la variabilidad en las técnicas de síntesis y las dificultades para caracterizar sus propiedades a nanoescala subrayan la necesidad de enfoques más precisos y reproducibles. La funcionalización química emerge como una estrategia clave para mejorar su estabilidad y

selectividad, optimizando su rendimiento en entornos específicos.

Este estudio resalta la importancia de la caracterización detallada de las propiedades de las nanopartículas de magnetita para maximizar su potencial en aplicaciones prácticas. Futuras investigaciones deben centrarse en el desarrollo de métodos de síntesis más controlados y escalables, así como en la exploración de nuevas funcionalidades basadas en propiedades emergentes. Estas mejoras no solo ampliarán el alcance de las nanopartículas de magnetita, sino que también permitirán abordar desafíos tecnológicos y sociales actuales, consolidando su papel como herramientas fundamentales en la ciencia y la ingeniería modernas.

REFERENCIAS

Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003). *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses*. Wiley-VCH.

Gago, L., Quiñonero, F., Perazzoli, G., Melguizo, C., Prados, J., Ortiz, R., & Cabeza, L. (2023). Nanomedicine and hyperthermia for the treatment of gastrointestinal cancer: A systematic review. *Pharmaceutics*, *15*(7), 1958.

Gago Bejarano, L., Quiñonero Muñoz, F. J., Perazzoli, G., Melguizo Alonso, C., Prados Salazar, J. C., Ortiz Quesada, R., & Cabeza Montilla, L. (2023). Systematic Review Nanomedicine and Hyperthermia for the Treatment of Gastrointestinal Cancer: A Systematic Review.

García-García, P. (2025). Las nanopartículas magnéticas en medicina: enfoque en la terapia de hipertermia magnética.

Guardia, P., Di Corato, R., Lartigue, L., Wilhelm, C., Espinosa, A., Garcia-Hernandez, M., ... & Pellegrino, T. (2014). Water-soluble iron oxide nanocubes with high values of specific absorption rate for cancer cell hyperthermia treatment. *ACS Nano*, *8*(4), 3086-3097. https://doi.

org/10.1021/nn406139q

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

Hergt, R., Dutz, S., Müller, R., & Zeisberger, M. (2019). Magnetic particle hyperthermia: Nanoparticle magnetism and materials development for cancer therapy. *Journal of Physics: Condensed Matter, 31*(36), 363001. https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab2b5c

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

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2015). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine, 6*(7), e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

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

Torres-Gómez, N., Ávila-Avilés, R. D., & Vilchis-Nestor, A. R. (2020). Biosíntesis y caracterización de nanoestructuras por microscopía electrónica. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 13(25), 29-43.

Wang, J., Chen, Z., Chen, B., & Zheng, J. (2017). Adsorption of heavy metal ions by iron oxide nanoparticles: A review. *Nanoscale Research Letters, 12*(1), 1-14. https://doi.org/10.1186/s11671-017-2187-2

Yavuz, C. T., Mayo, J. T., Yu, W. W., Prakash, A., Falkner, J. C., Yean, S., ... & Colvin, V. L. (2009). Low-field magnetic separation of monodisperse Fe_3O_4 nanocrystals. *Science, 314*(5801), 964-967. https://doi.org/10.1126/science.1131475

Zhang, L., Zhang, X., Liu, H., Song, J., & Wang, X. (2020). Recent advances in magnetite nanoparticles for biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B, 8*(12), 2399-2418. https://doi.org/10.1039/C9TB02607F