

Avances en la síntesis y rendimiento magnético de nanopartículas de hexaferrita de estroncio

Advances in synthesis and magnetic performance of strontium hexaferrite nanoparticles

A. Lobo-Guerrero ^{a,*}, R.H. Aguilera Del Toro ^b, E.E. Hernández-Vázquez ^c, V.E. Salazar-Muñoz ^d

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid. ES-47011. Valladolid, España.

^c Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. Circuito Universitario s/n, Campus Chihuahua II, 31125. Chihuahua, México.

^d Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Manuel Nava 8, 78290. San Luis Potosí, S.L.P., México.

Resumen

La hexaferrita de estroncio tipo M ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) es una cerámica magnética de relevancia tecnológica debido a sus propiedades magnéticas, elevada anisotropía magnetocristalina y alta estabilidad química. La transición de este material del bulto a la escala nanométrica ha permitido optimizar sus propiedades magnéticas. Este artículo presenta una revisión estructurada de los avances recientes en las rutas de síntesis empleadas para el control morfológico y dimensional de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Asimismo, se analiza la correlación intrínseca entre los parámetros estructurales y el desempeño magnético final, particularmente en términos de coercitividad, magnetización de remanencia, magnetización de saturación y producto de energía máxima. Finalmente, se discuten los horizontes tecnológicos y las aplicaciones emergentes de estos nanomateriales, haciendo especial énfasis en su integración para el diseño de compósitos avanzados y su empleo como nano-adsorbentes magnéticos en procesos de remediación ambiental de efluentes acuosos y en la recuperación de tierras raras.

Palabras Clave:

Hexaferrita de estroncio, nanopartículas, propiedades magnéticas, método de Rietveld, DFT.

Abstract

M-type strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) is a magnetic ceramic of technological relevance due to its magnetic properties, high magnetocrystalline anisotropy, and high chemical stability. The transition of this material from the bulk to the nanoscale has allowed for the optimization of its magnetic properties. This article presents a structured review of recent advances in the synthesis routes used for the morphological and dimensional control of strontium hexaferrite nanoparticles. Furthermore, the intrinsic correlation between structural parameters and their magnetic performance is analyzed, particularly in terms of coercivity, remanence magnetization, saturation magnetization, and maximum energy product. Finally, the technological horizons and emerging applications of these nanomaterials are discussed, with special emphasis on their integration into the design of advanced composite materials and their use as magnetic nano-adsorbents for the environmental remediation of aqueous effluents and the recovery of rare earth elements.

Keywords:

Strontium hexaferrite, nanoparticles, magnetic properties, Rietveld method, DFT.

1. Introducción

Los materiales magnéticos duros juegan un papel importante en el desarrollo tecnológico contemporáneo, siendo componentes esenciales en dispositivos de almacenamiento de información, motores eléctricos, sensores y sistemas de telecomunicaciones de alta frecuencia [1-3]. Dentro de esta familia de materiales, la hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) destaca como uno de los compuestos más importantes y comercializados a nivel mundial [4-5]. Esta predominancia técnica se debe a su excepcional combinación de alta anisotropía magnetocristalina a lo largo del eje cristalino *c*, una gran estabilidad química frente a la oxidación y bajos costos de producción. Desde una perspectiva de física del estado sólido, la hexaferrita de estroncio cristaliza en una

compleja estructura tipo magnetoplumbita, descrita por el grupo espacial *P63/mmc*, la cual se muestra en la Figura 1. La celda unitaria se construye mediante la superposición periódica de dos bloques estructurales denominados bloque S (tipo espinela) y bloque R (hexagonal) [6]. El origen de sus propiedades magnéticas radica en la distribución de los iones férricos (Fe^{3+}), los cuales ocupan cinco sitios cristalográficos (intersiticiales) distintos en la red: tres sitios de coordinación octaédrica ($12k$, $2a$, $4f_2$), un sitio tetraédrico ($4f_1$) y un sitio bipiramidal trigonal ($2b$) [7].

Los momentos magnéticos de los cationes de hierro presentan un acoplamiento ferrimagnético, dictado por el surgimiento de interacciones de superintercambio mediadas por los iones de oxígeno ($\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{3+}$) [8-9]. El análisis de las interacciones

*Autor para la correspondencia: azdrubal_guerrero@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: azdrubal_guerrero@uaeh.edu.mx (A. Lobo-Guerrero), rodrigo.humberto.aguilera@uva.es (R.H. Aguilera Del Toro), esther.hernandez@ipicyt.edu.mx (E.E. Hernández-Vázquez), veronica.salazar@uaslp.mx (V.E. Salazar-Muñoz).

de superintercambio como responsables de la magnetización neta del material se tratará más adelante en la sección 3.3.

Comprender la ocupación atómica exacta y las posibles distorsiones en la red cristalina resulta indispensable para correlacionar la estructura de la hexaferrita con su desempeño magnético. La hexaferrita de estroncio, a pesar de ser un cerámico ampliamente estudiado en su forma de bulto (bulk) [10], su síntesis en la escala nanométrica ha revitalizado el interés científico en los últimos años [11-16].

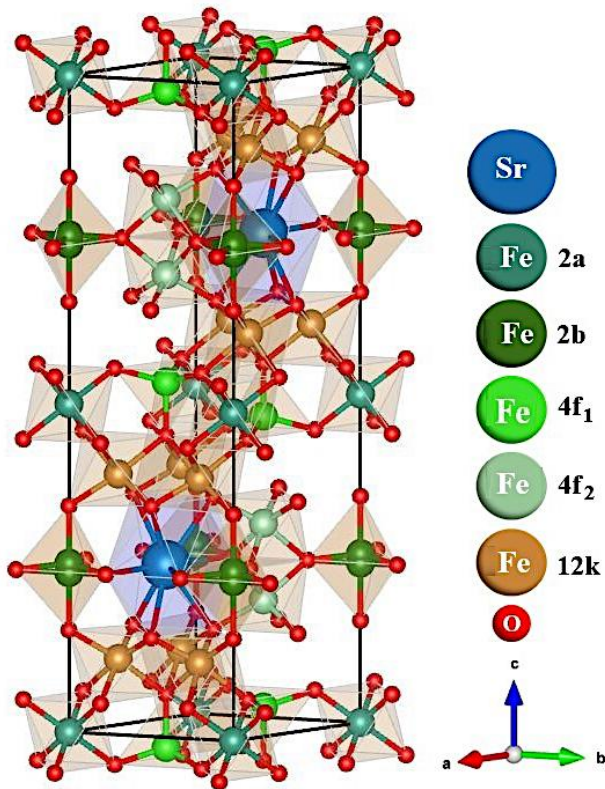


Figura 1: Estructura cristalina de la hexaferrita de estroncio, mostrando el apilamiento compacto de los aniones de oxígeno, las 5 posiciones intersticiales ocupadas por los cationes de hierro (Fe^{3+}), y la posición ocupada por el catión de estroncio.

Cuando el tamaño de partícula se aproxima o desciende por debajo del tamaño de monodominio magnético, la coercitividad y la magnetización experimentan modificaciones sustanciales, explicadas por medio de un conjunto de modelos físicos que describen cómo compiten la energía magnetostática, la energía de pared de dominio, la energía de anisotropía y la energía térmica. Para explicar los cambios en la coercitividad y magnetización de saturación al disminuir el tamaño de partícula, se han establecido tres regímenes.

1. **El Modelo de Stoner-Wohlfarth** (régimen monodominio). Cuando una partícula es grande (multidominio), la inversión de la magnetización se lleva a cabo por desplazamiento de las paredes de los dominios magnéticos, lo cual requiere poca energía. Sin embargo, a medida que el tamaño de la partícula desciende, el costo energético de mantener una pared de dominio supera al de la energía magnetostática. Al alcanzar la partícula el tamaño crítico de monodominio (D_c), la pared de dominio desaparece y la partícula entera actúa como un solo imán. A partir de ese punto, el comportamiento de inversión de la magnetización se rige por el Modelo de Stoner-Wohlfarth [17-19]. Este modelo establece que, al no haber paredes de dominio, la única forma de invertir la magnetización es mediante la rotación coherente de todos los espines al mismo tiempo, lo que vence la energía de anisotropía magnetocristalina. Bajo este modelo, el

campo coercitivo alcanza su valor máximo teórico, dado la ecuación (1)

$$H_c = \frac{2K}{\mu_0 M_s} \quad (1)$$

donde K es la constante de anisotropía magnetocristalina, μ_0 es la permeabilidad del vacío y M_s es la magnetización de saturación.

2. **El modelo de Néel-Brown y la ley de Kneller** (Límite superparamagnético). Si continuamos reduciendo el tamaño de la partícula por debajo de su diámetro crítico D_c , el campo coercitivo comienza a caer drásticamente. Esto se debe a que la energía de anisotropía total de la partícula ($E_a = KV$, donde V es el volumen) se vuelve tan pequeña que la energía térmica del ambiente ($k_B T$) es suficiente para hacer que los momentos de espín se desordenen espontáneamente. Esta caída de la coercitividad con el tamaño en el régimen monodominio está descrita por la Ley de Kneller [20-21], que se basa en los modelos de relajación de Néel-Brown [22], ecuación (2)

$$H_c = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{D_p}{D} \right)^{3/2} \right] \quad (2)$$

Donde H_{c0} es la coercitividad a 0 K, D es el diámetro de la partícula y D_p es el diámetro crítico superparamagnético. Cuando el diámetro desciende por debajo de D_p , la energía térmica domina por completo ($k_B T > KV$), el material entra en el régimen superparamagnético y el campo coercitivo se vuelve cero ($H_c = 0$).

3. **Modelo core-shell** (reducción de la magnetización). Mientras que el campo coercitivo tiende a incrementarse y luego a disminuir al disminuir el tamaño de partícula, la magnetización de saturación (M_s) siempre será menor que la del material en bulto. Esto se explica mediante el modelo de core-shell o de “capa muerta” (dead-layer model) [23-25]. Este modelo establece que, en una nanopartícula, la relación superficie/volumen es muy elevada. Por lo tanto, en la superficie, la ruptura de la red cristalina destruye las interacciones de superintercambio colineales, generando una capa externa, denominada coraza (shell), donde los momentos de espín están aleatoriamente orientados, envolviendo un núcleo (core) perfectamente cristalino. Entonces, la magnetización efectiva de la nanopartícula se modela matemáticamente relacionando el grosor de esta capa magnéticamente muerta (t) con el diámetro total de la partícula (D), como se muestra en la ecuación (3).

$$M_s = M_{s,bulk} \left(1 - \frac{6t}{D} \right) \quad (3)$$

A medida que D se vuelve más pequeño, la fracción de volumen ocupada por la capa muerta aumenta, lo que explica la caída sustancial en la magnetización de saturación a escala macroscópica.

Esta capacidad de sintonizar (controlar) las propiedades magnéticas duras mediante el control morfológico y estructural en la nanoescala, no solo optimiza su función como imán permanente, sino que facilita la viabilidad para su incorporación en el diseño de nuevos materiales cerámicos avanzados.

4. Métodos de síntesis y control de la morfología

La obtención de nanopartículas de hexaferrita de estroncio libres de fases secundarias y con una distribución de tamaño homogénea es uno de los mayores retos en la ingeniería de materiales magnéticos. Dado que el tamaño crítico de monodominio para la $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ está por encima de 360 nm [26], tener un control estricto durante la nucleación y el posterior crecimiento de las partículas será importante para controlar el campo coercitivo y evitar la transición hacia un comportamiento

superparamagnético o multidominio. El régimen superparamagnético se estaría alcanzando por debajo de 8 nm, mientras que el multidominio suele estar por encima de 360 nm a temperatura ambiente. Para lograr el control de la morfología y crecimiento adecuado de las partículas, se han desarrollado diversas rutas de síntesis química que ofrecen ventajas significativas frente al método de reacción en estado sólido (método cerámico).

4.1 Métodos de síntesis de química blanda (soft-chemistry)

La transición a técnicas de química blanda ha permitido reducir drásticamente las temperaturas de calcinación y mejorar la homogeneidad estequiométrica a nivel atómico. Entre las rutas más destacadas se encuentran las siguientes:

- **Método Sol-gel.** Esta es, sin duda, una de las técnicas más versátiles y reportadas en la literatura para la obtención de nanopartículas de hexaferrita de estroncio [27-28]. Mediante la hidrólisis y condensación de precursores metálicos en una solución, se forma una red tridimensional denominada gel, que atrapa los iones de estroncio y hierro de manera uniforme. Este método permite obtener polvos finos con una alta pureza de fase tras procesos de calcinación moderados. No obstante, el control de la aglomeración de las partículas durante el tratamiento térmico sigue siendo un desafío crítico. Además, el método sol-gel clásico rara vez se utiliza en su forma pura para sintetizar hexaferritas debido a los altos costos de los precursores y a la dificultad de controlar la estequiometría de dos metales (Sr y Fe). Por ello, la técnica ha evolucionado en múltiples variantes. Estas modificaciones buscan principalmente asegurar una mezcla homogénea a nivel atómico de los iones Sr^{2+} y Fe^{3+} y aportar una matriz orgánica que controle el crecimiento de la partícula durante la calcinación.

- **Sol-gel con agentes quelantes alternativos.** Aunque el ácido cítrico es el compuesto más utilizado, la modificación del agente quelante altera drásticamente la cinética de gelificación y la morfología final de la hexaferrita. Al sustituir el ácido cítrico por otros ligandos como el ácido etilendiaminotetraacético, ácido tartárico o ácido esteárico, el proceso tiene una mayor estabilidad con los metales de transición que el ácido cítrico [33-37]. Esto retrasa la precipitación prematura de hidróxidos y permite una red tridimensional más rígida. El uso de ácidos grasos de cadena larga (como el esteárico) genera un impedimento estérico mucho mayor, lo que resulta en polvos aún más finos y con menor aglomeración tras la calcinación.

- **Sol-gel autocombustión, citrato-nitrato y método de Pechini.** Se utilizan sales metálicas (generalmente nitratos) disueltas en agua junto con un agente quelante que también funciona como combustible orgánico, siendo el ácido cítrico el estándar más utilizado [29-32]. Los iones carboxilo del ácido cítrico coordinan a los metales, formando un complejo. Al calentar la solución, se evapora el agua y se forma un gel viscoso. Al alcanzar una temperatura entre 200 y 300 °C, los nitratos (oxidantes) y el citrato (reductor/combustible) detonan una reacción de oxidación-reducción altamente exotérmica. El gel se autoigniciona y arde en segundos, produciendo un polvo ceniciento y poroso. El calor de la combustión promueve un proceso de presinterización de los polvos, reduciendo con ello la temperatura y el tiempo de calcinación necesarios para la obtención de la fase hexagonal. Estos métodos permiten la obtención de nanopartículas en el rango de 20 a 100 nm cuando se calcina a bajas temperaturas. Sin embargo, la aglomeración de las nanopartículas muchas veces dificulta la resolución del tamaño real; véase, por ejemplo, la micrografía MEB de la **Figura 2**.

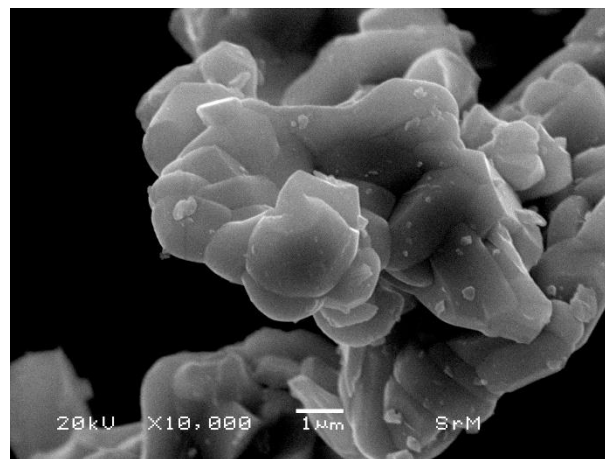


Figura 2: Micrografía MEB de la hexaferrita de estroncio obtenida mediante el método Sol-gel Pechini, en la que se muestra la aglomeración que adquieren las nanopartículas tras el tratamiento térmico de sinterizado.

- **Sol-gel asistido por polímeros.** Esta ruta busca solucionar el problema de la coalescencia severa que ocurre en las etapas finales de calcinación. Al introducir polímeros de alto peso molecular directamente en la solución precursora antes de la formación del gel [38-40]. Las cadenas poliméricas envuelven los complejos metálicos creando jaulas estéricas. Durante el tratamiento térmico, la matriz polimérica actúa como una barrera física que separa las nanopartículas emergentes. El polímero se calcina y se elimina como gas después de que la fase magnética ha nucleado, lo que limita el tamaño de los cristallitos. Matrices poliméricas como el quitosano, el alcohol polivinílico (PVA) y el polietilenglicol (PEG), son altamente efectivas. Considerando lo anterior, el método de sol-gel asistido por polímeros ofrece el mejor equilibrio entre pureza de la fase y control del crecimiento de partículas.

- **Sol-gel verde o bioasistido.** Es la tendencia más reciente y prospectiva, enfocada en la química sustentable y en aprovechar la complejidad química de los productos naturales. El sol gel verde consiste en sustituir los solventes, ácidos comerciales y agentes quelantes sintéticos por extractos naturales y bio-solventes [41-42]. Durante el proceso sol-gel, la rica química de los bioagentes modifica la porosidad intrínseca del xerogel precursor. Al calcinar, esta estructura preordenada por los compuestos orgánicos naturales induce características morfológicas muy particulares y promueve rutas de síntesis más limpias y económicas.

- **Coprecipitación química.** Consiste en la precipitación simultánea de hidróxidos metálicos a partir de una solución acuosa mediante el ajuste del pH [43-45]. Aunque es un método altamente escalable y económico, frecuentemente requiere etapas de lavado exhaustivas y tratamientos térmicos adicionales para promover la cristalización completa de la fase hexagonal, lo que a menudo propicia la aparición de trazas de hematita. Además, los lavados requeridos para estabilizar el pH generan pérdida de polvo. Sin embargo, este método permite un mejor control de la morfología y del tamaño de las nanopartículas, lo que permite obtener nanopartículas de entre 30 y 200 nm, según el tratamiento térmico subsecuente.

- **Síntesis hidrotermal.** Este método aprovecha altas presiones y temperaturas generadas en reactores cerrados (autoclaves); este método es excepcionalmente útil para obtener morfologías específicas, como plaquetas hexagonales altamente cristalinas, ideales para aplicaciones que requieren una alineación magnética preferencial [46-47]. En este sentido, hablando estrictamente del tamaño, las partículas producidas por síntesis hidrotermal suelen estar en el rango de entre 50 y 500 nm. Pero el

control de morfologías anisotrópicas es el punto fuerte del método hidrotermal.

4.2 El régimen superparamagnético

Alcanzar el régimen superparamagnético en la hexaferrita de estroncio a temperatura ambiente representa uno de los mayores desafíos en la síntesis de estos materiales magnéticos [48-49]. Debido a la elevada constante de anisotropía magnetocristalina intrínseca del material ($K \approx 4.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$), la energía térmica del ambiente ($k_B T$) solo supera la barrera de energía de anisotropía (KV) si el volumen de la partícula es muy pequeño. Los cálculos basados en el modelo de relajación de Néel-Brown estiman que el diámetro crítico para observar superparamagnetismo puro en la hexaferrita de estroncio se sitúa por debajo de los 8 nm. Esta restricción dimensional genera una paradoja en la síntesis de la hexaferrita. La formación de la fase cristalina hexagonal pura (magnetoplumbita) requiere una alta energía de activación, lo que habitualmente obliga a someter los precursores a temperaturas de calcinación superiores a los 750 °C. Sin embargo, en este régimen térmico, los procesos de difusión atómica se aceleran fuertemente, provocando la coalescencia de los núcleos y un crecimiento de grano que invariablemente supera el límite de los 8 nm. Como resultado, las partículas obtenidas terminan ubicándose en el régimen de monodominio, exhibiendo alta coercitividad en lugar de superparamagnetismo [50-51]. Es precisamente para sortear esta limitación que las metodologías de síntesis actuales pueden evolucionar hacia estrategias de confinamiento del crecimiento de las nanopartículas, que conduzcan a la obtención de nanopartículas superparamagnéticas de hexaferrita de estroncio. Aunque el régimen superparamagnético sigue siendo un desafío de relevancia científica y tecnológica para este tipo de compuestos.

4.3 Control dimensional

La coalescencia térmica y la aglomeración de las nanopartículas son fenómenos que degradan las propiedades magnéticas, por lo que la investigación reciente se ha volcado hacia el diseño de rutas de síntesis asistidas o modificadas. Una estrategia altamente efectiva es el confinamiento espacial del crecimiento cristalino mediante el uso de matrices poliméricas. En este sentido, la incorporación de polímeros durante la etapa temprana previa a la síntesis no solo actúa como agente dispersante o estabilizador estérico, sino que modula la cinética de cristalización, limitando el tamaño final de la nanopartícula tras la degradación térmica del polímero.

Asimismo, existe una tendencia creciente hacia la síntesis verde y el empleo de solventes alternativos [52-53]. El uso de bio-solventes orgánicos durante el proceso sol-gel está demostrando ser una vía efectiva que promueve una química más sustentable y que induce efectos estructurales específicos en la red, dictando la morfología final de la fase magnética. Este enfoque dual (control estructural mediante química sustentable) representa uno de los aspectos más prometedores para el escalamiento de nanomateriales magnéticos avanzados.

Mientras que el uso de polímeros en rutas químicas representa un control dimensional bottom-up (desde la nucleación), la reducción de partículas de hexaferrita ya sinterizadas mediante técnicas top-down ofrece alternativas viables, aunque con compromisos físicos significativos. La molienda de alta energía, si bien es sumamente eficaz para alcanzar el régimen nanométrico, induce una severa deformación de la red cristalina y una amorfización superficial que destruye localmente las interacciones de superintercambio, provocando un detrimento drástico en la magnetización de saturación [54-55]. Restaurar la

cristalinidad exige un tratamiento de recocido que inevitablemente promueve la coalescencia y, por ende, el aumento en el tamaño de partícula.

Por otro lado, la sonicación de baja frecuencia aprovecha las intensas fuerzas de cizallamiento y ondas de choque generadas por la cavitación acústica. Aunque esta técnica es menos destructiva para la red cristalina intracelular, su efectividad se limita principalmente a la fractura de los cuellos de sinterización y la desaglomeración de partículas, siendo ineficaz para la fractura de cristalitos primarios o requiere enormes tiempos de sonicación y el control de la densidad del medio.

5 Correlación estructural y magnética

La optimización de los materiales magnéticos nanoestructurados exige una comprensión profunda de cómo los parámetros cristalinos a nivel atómico dictan el comportamiento macroscópico. La relación entre la compleja estructura cristalina de la hexaferrita de estroncio y sus propiedades magnéticas es un fenómeno que requiere de técnicas de análisis teóricas y de caracterización experimental avanzadas para su comprensión.

5.1 Caracterización estructural

La difracción de rayos X es una técnica experimental que permite confirmar la formación de la fase hexagonal tipo magnetoplumbita. Sin embargo, el análisis cualitativo convencional de los difractogramas resulta insuficiente para capturar los detalles microestructurales inducidos en nanopartículas por las diferentes rutas de síntesis. En este contexto, el método de refinamiento Rietveld cobra particular importancia [56-57]. El ajuste del difractograma de rayos X completo por el método Rietveld permite no solo cuantificar la pureza del material y la fracción en peso de fases secundarias, sino también extraer parámetros cristalográficos críticos. A través de este método, es posible determinar las variaciones en los parámetros de red, el tamaño de cristalitos, la microdeformación de la red y las posiciones atómicas. Esta información cristalográfica detallada es vital para calcular las distancias de enlace Fe—O y los ángulos Fe—O—Fe, los cuales constituyen la base física de las interacciones de superintercambio en la hexaferrita tipo M.

5.2 Origen de las propiedades magnéticas a partir de la estructura cristalina

Las propiedades magnéticas extrínsecas del material, típicamente evaluadas mediante magnetometría de muestra vibrante, son un reflejo directo de las características microestructurales y cristalográficas obtenidas mediante el análisis Rietveld. La correlación más destacada se observa en dos parámetros fundamentales: la coercitividad (H_c) y la magnetización de saturación (M_s).

Cuando el método de síntesis es capaz de restringir el crecimiento de partícula y el tamaño de cristalito se aproxima al tamaño crítico de monodominio, el material experimenta un incremento drástico en su coercitividad. El tamaño monodominio de la hexaferrita de estroncio reportado en la literatura presenta una gran variación dependiendo de las condiciones de fabricación [30, 68-60]. En el régimen de monodominio, la inversión de la magnetización ocurre por la rotación coherente de los momentos de espín, un mecanismo que exige una energía y, por ende, la aplicación de un campo magnético externo significativamente

mayor, en comparación con el desplazamiento de las paredes de dominio en partículas multidominio [61-62].

A nivel subatómico, la magnetización de la hexaferrita depende de la distribución de los iones Fe^{3+} en los cinco sitios cristalográficos y de las interacciones de superintercambio mediadas a través de los iones de oxígeno. Un ordenamiento estructural altamente cristalino asegura que el acoplamiento ferrimagnético no se vea interrumpido por defectos en la red o vacancias, maximizando tanto la magnetización de saturación como la magnetización de remanencia.

5.3 Superintercambio y modelo de Gorter

Como se mencionó anteriormente, la magnetización macroscópica de la hexaferrita no se debe a una interacción directa entre los cationes metálicos, sino a un acoplamiento indirecto mediado por los aniones diamagnéticos de oxígeno, conocido como interacción de superintercambio ($\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{3+}$). De acuerdo con el modelo de ferrimagnetismo colineal de Gorter [63-65], los cationes Fe^{3+} se distribuyen en cinco sitios cristalográficos asimétricos dentro de la celda unitaria: tres sitios de coordinación octaédrica (12k, 2a, $4f_2$), un sitio tetraédrico ($4f_1$) y un sitio bipiramidal trigonal (2b). Las interacciones de superintercambio obligan a los espines de estos sitios a acoplarse de forma antiparalela (tipo antiferromagnético), lo que resulta en una configuración donde los sitios 12k, 2a y 2b adoptan una orientación paralela al eje cristalino *c*, mientras que los sitios $4f_1$ y $4f_2$ se alinean en sentido opuesto (antiparalelamente). Esta distribución asimétrica genera el momento magnético neto que caracteriza al material. En la hexaferrita de estroncio, el momento magnético resultante por celda unitaria es de 40 μ_B en dirección al eje *c* positivo.

La magnitud de este acoplamiento magnético está gobernada por las reglas de Goodenough-Kanamori [66-68], siendo dependiente de los ángulos $\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}$ y las distancias interatómicas $\text{Fe}-\text{O}$. La determinación precisa de las coordenadas atómicas permite cuantificar las distorsiones en los poliedros de coordinación. Un ángulo de enlace que se aproxima a los 180° maximiza el solapamiento de los orbitales *d* del hierro y *p* del oxígeno, fortaleciendo una interacción antiferromagnética. Por el contrario, cualquier desviación estructural inducida durante la síntesis atenúa este intercambio, impactando negativamente en la magnetización de saturación.

Finalmente, la transición hacia la escala nanométrica introduce alteraciones en la red de superintercambio. En la superficie de las nanopartículas, la red cristalina experimenta una ruptura de la periodicidad de los enlaces $\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}$, dejando a los cationes superficiales con una coordinación incompleta. Esta interrupción debilita las interacciones de superintercambio en la interfaz, originando una capa superficial de espines desordenados [70]. Esta alteración estructural intrínseca en la nanoescala explica por qué las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, a pesar de exhibir una coercitividad superior por estar en un régimen de monodominio, frecuentemente presentan valores de magnetización de saturación inferiores a los reportados para su contraparte en bulto [29-30, 71].

5.4 Relación estructura-magnetismo mediante modelado computacional por DFT

El modelado computacional basado en la Teoría de los Funcionales de la Densidad (DFT) se ha convertido en una herramienta complementaria para comprender, desde una perspectiva atomística, el origen de las propiedades magnéticas de las hexaferritas tipo M. En el caso de la $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, los cálculos de primeros principios han permitido analizar la estructura electrónica, la distribución de momentos magnéticos locales y la

estabilidad relativa del orden ferrimagnético asociado a los cinco sitios cristalográficos ocupados por los iones Fe^{3+} [72,76].

Uno de los aportes más importantes de estos estudios es que confirman, desde el punto de vista electrónico, el modelo ferrimagnético de Gorter, en el cual los momentos magnéticos de los sitios $4f_1$ y $4f_2$ se orientan antiparalelamente respecto a los sitios 12k, 2a y 2b. Además, la DFT permite identificar qué estados electrónicos dominan cerca del borde de las bandas de valencia y conducción, mostrando la fuerte participación de los orbitales Fe-3d en la respuesta electrónica y magnética del material [72].

Sin embargo, debido al carácter localizado de los electrones 3d del hierro, el tratamiento convencional dentro de DFT puede no ser suficiente para describir con precisión la estructura electrónica de estas ferritas. Por esta razón, muchos estudios emplean correcciones tipo DFT+U, las cuales mejoran la descripción de la correlación electrónica en los orbitales Fe-3d. La inclusión del acoplamiento espín-órbita también resulta fundamental cuando se desea estimar la anisotropía magnetocristalina, una propiedad clave para explicar la elevada coercitividad de la hexaferrita de estroncio y su comportamiento como material magnético duro [76].

El modelado por primeros principios también permite estudiar el efecto de sustituciones catiónicas, defectos puntuales y vacancias sobre las propiedades estructurales, electrónicas y magnéticas de la $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. A partir del cálculo de energías de sustitución, probabilidades de ocupación y momentos magnéticos locales, es posible predecir en qué sitios cristalográficos tienden a incorporarse distintos dopantes y cómo dicha ocupación modifica la magnetización de saturación, la anisotropía magnetocristalina y la estabilidad estructural de la fase magnetoplumbita [73-75].

Este análisis resulta particularmente valioso para guiar el diseño de hexaferritas modificadas, ya que permite predecir qué sustituciones mejorarán una propiedad específica sin comprometer la estabilidad termodinámica del sistema. En este sentido, la DFT no sustituye a la caracterización experimental, sino que la complementa al aportar una descripción detallada de la estructura electrónica y atómica del material. Así, la convergencia entre el refinamiento estructural, las mediciones magnéticas y el modelado computacional permite construir una visión integral de la relación estructura-propiedad en la $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, un aspecto crucial cuando se busca potenciar su desempeño en aplicaciones magnéticas, electrónicas, ambientales o multifuncionales [72-76].

6 Multifuncionalidad y aplicaciones de las nanopartículas

Si bien la hexaferrita de estroncio es clásicamente reconocida por su dureza magnética, la reducción de su tamaño a la escala nanométrica induce fenómenos de superficie y de confinamiento que alteran significativamente su comportamiento fisicoquímico. Este incremento en la relación área/volumen dota a las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ de una multifuncionalidad, más allá de sus propiedades magnéticas, lo que abre nuevas posibilidades para su aplicación tecnológica.

6.1 Propiedades electrónicas y absorción de microondas

En el área de las telecomunicaciones y la seguridad electrónica, la contaminación electromagnética es un problema creciente. Aquí, la hexaferrita de estroncio nanométrica ha emergido como un excelente material para el apantallamiento de interferencias electromagnéticas (EMI) y la absorción de microondas [77-81]. A nivel nanométrico, el material exhibe una mayor densidad de defectos superficiales e interfaces. Estos sitios actúan como

centros de polarización interfacial (polarización de Maxwell-Wagner) que, sumados a las pérdidas dieléctricas intrínsecas del material y a la resonancia ferromagnética natural, incrementan drásticamente la atenuación de las ondas electromagnéticas incidentes [80]. Además, el control del tamaño de partícula permite un ajuste fino de la impedancia acústica y electromagnética, facilitando que la onda penetre en el material en lugar de reflejarse, disipando la energía en forma de calor.

6.2 Capacidad de adsorción y remediación ambiental

Uno de los efectos más importantes de la nanoescala es el aumento exponencial del área superficial. Desde una perspectiva fisicoquímica, esto se traduce en una alta densidad de sitios activos (grupos hidroxilo superficiales y vacancias de oxígeno) disponibles en la interfaz sólido-líquido. Esta característica ha posicionado a las nanopartículas de hexaferrita como nano-adsorbentes altamente eficientes para procesos de remediación ambiental y en la recuperación de metales de importancia estratégica como las tierras raras [82-85]. Las nanopartículas presentan una afinidad excepcional para la adsorción y remoción de iones de metales pesados y metaloides altamente tóxicos, tales como cadmio (Cd^{2+}) [86], plomo (Pb^{2+}) [87] y arsénico [50]. La ventaja de emplear $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ en este rubro radica en su naturaleza magnética. Una vez completado el ciclo de adsorción del contaminante, el nano-adsorbente saturado puede ser separado del medio acuoso mediante la aplicación de un campo magnético externo, superando los costosos y lentos procesos de filtración y centrifugación requeridos por los adsorbentes convencionales.

6.3 Minería urbana y recuperación de tierras raras

Más allá de la remediación de metales pesados tradicionales, el horizonte tecnológico más prometedor para las nanopartículas magnéticas radica en la minería urbana y la recuperación de elementos de tierras raras a partir de lixiviados acuosos. Cationes estratégicos como el neodimio (Nd^{3+}), el lantano (La^{3+}), prasodimio (Pr^{3+}) etc., exhiben una fuerte afinidad por los grupos hidroxilo superficiales de la $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Las propiedades magnéticas duras de la hexaferrita resuelven el cuello de botella ingenieril de los procesos de separación convencionales, permitiendo una rápida recuperación del adsorbente saturado mediante campos magnéticos externos. No obstante, la aplicación de la hexaferrita de estroncio en lixiviados fuertemente ácidos enfrenta la limitación de la posible lixiviación catiónica del núcleo cerámico. Por ello, el desarrollo de arquitecturas tipo core-shell mediante el recubrimiento con matrices pasivantes (como SiO_2 o biopolímeros) se perfila como la estrategia clave, no solo para proteger al núcleo magnético de la corrosión ácida, sino para incorporar grupos funcionales que otorguen una selectividad química específica hacia los lantánidos en presencia de iones competidores.

6.4 Potenciales aplicaciones biomédicas

La integración de materiales magnéticos en el campo de la biomedicina, particularmente para aplicaciones de teranóstica, hipertermia magnética, regeneración de huesos y como agentes de contraste en imágenes por resonancia magnética (IRM), es una de las fronteras más activas de la nanotecnología [87-91]. Aunque la hexaferrita de estroncio posee una respuesta magnética excepcional, su traslación directa al entorno biomédico enfrenta desafíos fisicoquímicos sustanciales derivados de su alta coercitividad y los posibles riesgos de citotoxicidad asociados a

los iones de estroncio. Para que las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ sean viables en aplicaciones in vivo, la literatura reciente subraya la necesidad estricta de modular su comportamiento magnético y garantizar su hemocompatibilidad. La alta coercitividad, característica del material puro, no es directamente adecuada para los mecanismos de disipación de calor requeridos en la hipertermia magnética óptima, donde se buscan valores altos de tasa de absorción específica (SAR). Por lo tanto, la investigación actual se dirige hacia dos grandes enfoques de mitigación. El primero involucra la sustitución parcial de los iones Fe^{3+} por cationes divalentes o trivalentes para suavizar el comportamiento magnético sin perder la estabilidad estructural. El segundo enfoque, de carácter superficial, requiere el encapsulamiento de las nanopartículas en arquitecturas tipo núcleo-coraza (core-shell). La funcionalización de la superficie magnética con polímeros biocompatibles y biodegradables se presenta como una estrategia prometedora. Estos recubrimientos no solo pasivan la superficie evitando la corrosión del cerámico en medio fisiológico y la lixiviación de iones tóxicos celularmente, sino que previenen la aglomeración de las partículas en el torrente sanguíneo, un paso ineludible antes de postular cualquier relevancia biomédica clínica.

6.5 Propiedades ferroeléctricas

Clásicamente, la estructura cristalográfica de la hexaferrita de estroncio se describe bajo el grupo espacial centrosimétrico $P6_3/mmc$, una condición que teóricamente excluye la existencia de un momento dipolar eléctrico permanente. No obstante, reportes recientes han desafiado este paradigma al demostrar la coexistencia de ferromagnetismo y ferroelectricidad a temperatura ambiente en cerámicos de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ [92-95]. El origen microscópico de esta polarización eléctrica espontánea se atribuye a distorsiones locales en la red, específicamente al desplazamiento de los iones Fe^{3+} fuera del centro de simetría en los sitios de coordinación octaédrica (FeO_6). La transición hacia la escala nanométrica juega un papel crucial en este fenómeno, ya que la alta tensión superficial y el incremento en la densidad de defectos en la frontera de grano pueden promover y estabilizar estas rupturas de simetría local, abriendo el camino para su uso en dispositivos magnetoeléctricos avanzados.

6.6 Propiedades magnetoópticas

En el ámbito de la fotónica y los dispositivos de almacenamiento de próxima generación, la $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanométrica ha demostrado un potencial significativo. El desempeño en estas aplicaciones depende de la interacción entre la luz y el estado de magnetización del material, gobernado por fenómenos como el efecto Faraday y el efecto Kerr magneto-óptico [96-97]. En materiales en bulto, la dispersión de la luz (scattering) limita fuertemente estas aplicaciones. Sin embargo, la síntesis de nanopartículas con un estricto control dimensional y alta cristalinidad minimiza esta dispersión, mejorando sustancialmente la transparencia óptica del cerámico. Esta sinergia entre alta coercitividad magnética y respuesta óptica optimizada en la nanoescala hace de estas ferritas candidatas para su integración en aisladores ópticos, circuladores para telecomunicaciones y medios de grabación magneto-óptica de alta densidad.

7 Perspectivas

Pese a que la hexaferrita de estroncio ha sido estudiada exhaustivamente durante décadas, la transición a la nanoescala y la creciente demanda tecnológica de materiales multifuncionales han propiciado el nacimiento de nuevas líneas de investigación, las cuales apenas comienzan a explorarse. Se vislumbra que el avance en este campo durante la próxima década dependerá de la superación de retos que serán clave, los cuales abarcan desde el control preciso en la síntesis y la caracterización avanzada hasta el modelado computacional de cálculos de primeros principios, así como la escalabilidad en sus aplicaciones tecnológicas.

7.1 Síntesis sustentable

El impulso global hacia la química verde exige repensar las rutas de síntesis tradicionales. Una perspectiva altamente prometedora es la sustitución de solventes y agentes quelantes tóxicos por alternativas sustentables. El uso de extractos naturales y biosolventes orgánicos en metodologías sol-gel representa un área de oportunidad. Estos compuestos no solo reducen el impacto ambiental, sino que sus complejas composiciones moleculares pueden actuar como plantillas o modificadores de red, induciendo porosidad a la medida y dictando el crecimiento anisotrópico de la fase cristalina, un fenómeno que aún requiere de una profunda comprensión fisicoquímica.

7.2 Diseño de materiales compuestos

Para sortear las limitaciones inherentes a las nanopartículas desnudas, principalmente su tendencia a la aglomeración debido a las fuertes interacciones dipolares magnéticas, el futuro reside en el diseño de materiales compuestos jerárquicos. La inmovilización de nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ en matrices biopoliméricas, tales como el alcohol polivinílico (PVA) o el quitosano, o bien dentro de redes inorgánicas como los xerogeles de sílice, abrirá la puerta al desarrollo de películas activas y membranas multifuncionales. Este control en la dispersión permitirá aprovechar al máximo el área superficial y la respuesta magnética para aplicaciones en estado sólido.

7.3 Modelado computacional

La optimización empírica resultante de las síntesis ha llegado a su límite, por lo cual el avance inmediato en el diseño de hexaferritas nanoestructuradas requerirá transitar hacia un enfoque dual que integre de manera sistemática la caracterización experimental con cálculos teóricos, tales como los de primeros principios basados en la Teoría de los Funcionales de la Densidad (DFT). Esta sinergia permitirá modelar a nivel atómico el efecto de las sustituciones catiónicas, defectos, superficies e interfaces, así como predecir el comportamiento magnético fundamental y comprender los mecanismos de interacción que gobiernan la estabilidad estructural, la anisotropía magnetocristalina y los momentos magnéticos locales, propiedades que son fundamentales en el diseño de dispositivos electrónicos. En particular, el uso de DFT y sus extensiones, como DFT+U y los cálculos con acoplamiento espín-órbita, serán esenciales para guiar y racionalizar la optimización experimental de las rutas de síntesis de los protocolos de síntesis utilizados en el diseño, con mayor eficiencia, de materiales magnéticos multifuncionales. En la práctica, el modelado computacional podría emplearse como una herramienta predictiva previa a la síntesis. Para cada dopante, los cálculos DFT+U permitirían comparar la estabilidad de su incorporación en los distintos sitios cristalográficos de la hexaferrita y determinar cuáles son energéticamente más favorables.

Posteriormente, la inclusión del acoplamiento espín-órbita permitiría evaluar cómo cada distribución del dopante modifica propiedades como la anisotropía magnetocristalina. Estas predicciones podrían utilizarse para orientar la selección de condiciones experimentales, como la composición de los precursores, la atmósfera y la temperatura de tratamiento térmico, reduciendo así el número de pruebas necesarias. De esta manera, la combinación entre modelado y experimento permitiría avanzar desde una optimización principalmente empírica hacia un diseño más racional de hexaferritas dopadas con propiedades magnéticas específicas.

7.4 Escalamiento en minería urbana y remediación ambiental

Finalmente, en el contexto de la remediación ambiental y minería urbana, el gran salto necesario es pasar de los estudios de adsorción a nivel de laboratorio a pruebas con matrices complejas reales. La evaluación del desempeño de las hexaferritas magnéticas (puras o en compósitos) frente a efluentes mineros auténticos, donde existe una alta competencia iónica, será el paso definitivo para validar su viabilidad tecnológica en la remoción de metales pesados. En este sentido, las propiedades magnéticas de la hexaferrita de estroncio, su alta tuneabilidad y la capacidad de funcionalización permitirán una recuperación selectiva de los iones de interés, ya sea por interés económico o medioambiental.

8 Conclusion

La transición de la hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) desde un cerámico magnético en bulto convencional hacia un nanomaterial multifuncional representa uno de los avances más estimulantes en la ciencia de materiales. Esta revisión evidencia que el control de las propiedades magnéticas duras depende intrínsecamente del dominio sobre las rutas de síntesis y de la comprensión de la estructura cristalográfica a nivel atómico, donde herramientas analíticas de caracterización y modelado resultan insustituibles.

Más allá de su aplicación clásica como imán permanente, la nanoescala ha revelado una versatilidad fisicoquímica en este sistema. Fenómenos emergentes como la multiferroicidad a temperatura ambiente, la respuesta magneto-óptica y la alta capacidad de absorción de microondas posicionan a estas nanopartículas en la vanguardia tecnológica. Simultáneamente, su alto desempeño como nano-adsorbentes magnéticos ofrece una solución robusta y eficiente para desafíos críticos de nuestra época en temas de sustentabilidad y recuperación de activos mineros de importancia estratégica, como las tierras raras.

Sin embargo, el avance sostenido en este campo exige trascender los enfoques de síntesis puramente empíricos. El diseño de la próxima generación de materiales magnéticos avanzados dependerá de una convergencia multidisciplinaria clave: la adopción de rutas de química verde, la inmovilización de la fase activa en compósitos jerárquicos y la integración sistemática de un enfoque dual teórico-experimental guiado por modelado computacional de cálculos de primeros principios basados en la Teoría de los Funcionales de la Densidad (DFT). Es a través de esta sinergia integral que la investigación en hexaferritas continuará aportando soluciones innovadoras frente a los desafíos tecnológicos y ambientales más apremiantes de las próximas décadas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Pullar, R.C. (2012). Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 57(7), 1191-1334.
- Srivastava, R., Yadav, B.C. (2012). Ferrite materials: introduction, synthesis techniques, and applications as sensors. *International Journal of Green Nanotechnology*, 4(2), 141-154.
- Abdulwahab, K.O., Khan, M.M., Jennings, J.R. (2024). Ferrites and ferrite-based composites for energy conversion and storage applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 49(5), 807-855.
- Le Breton, J.M., Nachbaur, V., Fitchorova, O. (2022). Hexaferrite Permanent Magnets and Applications. *Modern Ferrites: Emerging Technologies and Applications*, 2, 91-101.
- Harris, V.G. (2022). Societal benefits of ferrites: historical, scientific, and commercial breakthroughs. *Modern Ferrites: Basic Principles, Processing and Properties*, 1, 9-20.
- Valenzuela, R. (1994). *Magnetic Ceramics*. Cambridge University Press.
- Kojima, H. (1982). Fundamental properties of hexagonal ferrites with magnetoplumbite structure. *Handbook of Ferromagnetic Materials*, Vol. 3.
- Novák, P., Ruzs, J. (2005). Exchange interactions in barium hexaferrite. *Physical Review B-Condensed Matter and Materials Physics*, 71(18), 184433.
- Almessiere, M.A., Slimani, Y., Sertkol, M., Gungunes, H., Wudil, Y.S., Korkmaz, A.D., Baykal, A. (2021). Impact of Gd substitution on the structure, hyperfine interactions, and magnetic properties of Sr hexaferrites. *Ceramics International*, 47(23), 33853-33864.
- Jasrotia, R., Prakash, J., Verma, R., Thakur, P., Kandwal, A., Wan, F., Thakur, A. (2023). Synthesis, characterization, and applications of doped barium hexaferrites: a review. *Physica B: Condensed Matter*, 667, 415202.
- Mammo, T.W., Murali, N., Shanmukhi, P.S. V., Kiran, M.G., Parajuli, D., Rao, G.M., Hussain, S. (2023). Improved magnetic and dielectric behavior of Al-Cr substituted $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ nano hexaferrite. *Applied Physics A*, 129(12), 865.
- Yadav, N.P., Mohd, Y., Agnihotri, P., Sharma, I., Singh, V.P., Rai, R., Singh, M. (2025). Electromagnetic characteristics of $\text{Ba}_{0.7}\text{Nd}_{0.3}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ nano-hexaferrites prepared by sol-gel synthesis. *Applied Physics A*, 131(12), 1-13.
- Rao, D.J., Bhargavi, K., Nayudu, A., Nagalakshmi, V., Madaka, R., Rao, S.S., Mulushoa, S.Y. (2025). Effect of Nd^{3+} and Ag^+ doped on synthesis, structural and magnetic properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Ag}_y\text{Fe}_{12-y}\text{O}_{19}$ nano hexaferrite. *Inorganic Chemistry Communications*, 176, 114279.
- Sharma, M., Kumar, D., Gewali, J.P., Thakur, A. (2022). Yttrium doped strontium nano hexaferrites: Influence of yttrium on the structural and magnetic properties of sol-gel synthesized nanocrystalline strontium hexaferrite. *Journal of Physics: Conference Series* 2267, 012024.
- Ramírez-Ayala, M.F., Guerrero, A.L., Herrera-González, A.M., Pérez-Juache, T.J., López-Juárez, R., Elizalde-Galindo, J.T., Reyes-López, S.Y. (2023). Study of neodymium addition on the magnetic and structural properties of strontium hexaferrite synthesized by the Pechini method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 582, 170985.
- Ramírez-Ayala, M.F., Guerrero, A.L., Pal, U., Pérez-Mazariego, J.L., Marquina, M.L., Mendoza-Anaya, D. (2024). Effect of rare earth substitution on magnetic properties of strontium hexaferrite prepared by Pechini method. *Journal of Alloys and Compounds*, 1002, 175388.
- Tannous, C., Gieraltowski, J. (2008). The Stoner-Wohlfarth model of ferromagnetism. *European journal of physics*, 29(3), 475-487.
- Du, H.F., Du, A. (2006). The hysteresis curves of nanoparticles obtained by Monte Carlo method based on the Stoner-Wohlfarth model. *Journal of Applied Physics*, 99(10).
- Mostarac, D., Kuznetsov, A.A., Helbig, S., Abert, C., Sánchez, P.A., Suess, D., Kantorovich, S.S. (2025). Thermal Stoner-Wohlfarth model for magnetodynamics of single domain nanoparticles: Implementation and validation. *Physical Review B*, 111(1), 014438.
- Crawford, T.D., Romes, A.J., Sengupta, S., Garner, A.L. (2024). Ferromagnetic Hysteresis Behavior of Ferroic and Multiferroic Ceramics from 100 K to 400K for Nonlinear Pulse Forming Line Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*.
- I Abdallah, H., Moyo, T. (2015). Evidence of Superparamagnetism in MgMnFeO Nanosized Ferrite. *Journal of Superconductivity & Novel Magnetism*, 28(3), 955.
- Wernsdorfer, W., Orozco, E.B., Hasselbach, K., Benoit, A., Barbara, B., Demoncey, N., Mailly, D. (1997). Experimental evidence of the Néel-Brown model of magnetization reversal. *Physical Review Letters*, 78(9), 1791.
- Mohammadi, Z., Attaran, N., Sazgarnia, A., Shaegh, S.A. M., Montazerabadi, A. (2020). Superparamagnetic cobalt ferrite nanoparticles as T2 contrast agent in MRI: in vitro study. *IET Nanobiotechnology*, 14(5), 396-404.
- Görmert, P., Sinn, E., Rösler, M. (1991). Preparation and characterization of hexaferrite powders. *Key Engineering Materials*, 58, 129-148.
- Schmitz, S., Schroeder, H. (2002). Leakage current measurements of STO and BST thin films interpreted by the "dead" layer model. *Integrated Ferroelectrics*, 46(1), 233-242.
- Sapoletova, N., Kushnir, S., Ahn, K., An, S.Y., Choi, M., Kim, J.Y., Wi, S. (2016). M-Zn (M= Sb, V, and Nb) substituted strontium hexaferrites with enhanced saturation magnetization for permanent magnet applications. *Journal of Magnetism*, 21(3), 315-321.
- Surig, C., Hempel, K.A., Bonnenberg, D. (1994). Hexaferrite particles prepared by sol-gel technique. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(6), 4092-4094.
- Liu, X., Zhong, W., Yang, S., Yu, Z., Gu, B., Du, Y. (2002). Structure and magnetic properties of La_{3+} -substituted strontium hexaferrite particles prepared by sol-gel method. *Physica Status Solidi (a)*, 193(2), 314-319.
- Ramírez-Ayala, M.F., Guerrero, A.L., Herrera-González, A.M., Pérez-Juache, T.J., López-Juárez, R., Elizalde-Galindo, J.T., Reyes-López, S.Y. (2023). Study of neodymium addition on the magnetic and structural properties of strontium hexaferrite synthesized by the Pechini method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 582, 170985.
- Urbano-Peña, M.A., Salazar-Muñoz, V.E., Palomares-Sánchez, S.A., Compean-García, V.D., Betancourt, I., Girón, C.B.T., Ruiz, F. (2024). Optimization of magnetic properties: Investigating the interaction of synthesis temperature, particle size, and monodomain formation in barium hexaferrite synthesized by the Pechini method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 600, 172133.
- Secu, M., Secu, C.E., Matei, E., Negri, C., Turchenko, V., Radu, C., Polosan, S. (2024). Structural and magneto-optical investigations of citrate sol-gel derived barium hexaferrite nanocrystalline powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 983, 173897.
- Junliang, L., Wei, Z., Cuijing, G., Yanwei, Z. (2009). Synthesis and magnetic properties of quasi-single domain M-type barium hexaferrite powders via sol-gel auto-combustion: Effects of pH and the ratio of citric acid to metal ions (CA/M). *Journal of Alloys and Compounds*, 479(1-2), 863-869.
- Wang, X., Zhang, Y.G., Wu, Z. (2010). Magnetic and optical properties of multiferroic bismuth ferrite nanoparticles by tartaric acid-assisted sol-gel strategy. *Materials Letters*, 64(3), 486-488.

- 34 Malhi, P.S., Singh, M., Verma, S., Batoo, K.M. Effect of varying tartaric acid to metal nitrate ratio on the structure, morphology and magnetic properties of $\text{BaZn}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{O}_{19}$ samples.
- 35 Jotania, R.B., Khomane, R.B., Chauhan, C.C., Menon, S.K., Kulkarni, B. D. (2008). Synthesis and magnetic properties of barium–calcium hexaferrite particles prepared by sol–gel and microemulsion techniques. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(6), 1095-1101.
- 36 Jotania, R.B., Khomane, R.B., Chauhan, C.C., Kulkarni, B.D. (2008). Temperature dependent structural studies and magnetic properties of $\text{BaCa}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ hexaferrites prepared by stearic acid gel route in presence of SDS surfactant. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic and Nano-Metal Chemistry*, 38(2), 225-228.
- 37 Wang, X., Xiong, G., Wang, X., Liu, Y., Zhang, L. (1997). Preparation and magnetic properties of nanocrystalline $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{Ba}(\text{CoTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ powders by the stearic acid gel method. *Journal of Materials Science Letters*, 16(19), 1606-1608.
- 38 Charoensuk, T., Thongsamrit, W., Ruttanapun, C., Jantaratana, P., Sirisathitkul, C. (2021). Loading effect of sol-gel derived barium hexaferrite on magnetic polymer composites. *Nanomaterials*, 11(3), 558.
- 39 Yu, M., Liang, C., Liu, M., Liu, X., Yuan, K., Cao, H., Che, R. (2014). Yolk–shell $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{ZrO}_2$ prepared by a tunable polymer surfactant assisted sol–gel method for high temperature stable microwave absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(35), 7275-7283.
- 40 Dhingra, A., Thakur, O.P., Pandey, R. (2025). Polyol-mediated synthesis of strontium hexaferrite nanoparticles and their potential application for resistive switching and non-volatile memory storage devices. *Emergent Materials*, 8(4), 3403-3422.
- 41 Karahroudi, Z.H., Hedayati, K., Goodarzi, M. (2020). Green synthesis and characterization of hexaferrite strontium-perovskite strontium photocatalyst nanocomposites. *Main Group Metal Chemistry*, 43(1), 26-42.
- 42 Hamarawf, R.F., Tofiq, D.I., Omer, K.M. (2023). Green synthesis of M-type manganese-substituted strontium hexaferrite $\text{SrMn}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ nanoparticles with intrinsic antibacterial activity against human pathogenic bacteria. *New Journal of Chemistry*, 47(32), 15236-15249.
- 43 Kulkarni, S., Shrotri, J., Deshpande, C.E., Date, S.K. (1989). Synthesis of chemically coprecipitated hexagonal strontium-ferrite and its characterization. *Journal of Materials Science*, 24(10), 3739-3744.
- 44 Hessien, M.M., Rashad, M.M., El-Barawy, K. (2008). Controlling the composition and magnetic properties of strontium hexaferrite synthesized by co-precipitation method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(3-4), 336-343.
- 45 Ataie, A., Heshmati-Manesh, S. (2001). Synthesis of ultra-fine particles of strontium hexaferrite by a modified co-precipitation method. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(10-11), 1951-1955.
- 46 Wang, J.F., Ponton, C.B., Grössinger, R., Harris, I.R. (2004). A study of La-substituted strontium hexaferrite by hydrothermal synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*, 369(1-2), 170-177.
- 47 Ataie, A., Harris, I.R., Ponton, C. B. (1995). Magnetic properties of hydrothermally synthesized strontium hexaferrite as a function of synthesis conditions. *Journal of Materials Science*, 30(6), 1429-1433.
- 48 Rashid, A.U., Southern, P., Darr, J. A., Awan, S., Manzoor, S. (2013). Strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) based composites for hyperthermia applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 344, 134-139.
- 49 Najafinezhad, A., Abdellahi, M., Saber-Samandari, S., Ghayour, H., Khandan, A. (2018). Hydroxyapatite-M-type strontium hexaferrite: a new composite for hyperthermia applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 734, 290-300.
- 50 Murillo-Ortiz, R., Mirabal-García, M., Cruz-Rivera, J.J., Valdez-Pérez, D., Martínez, J.R., Pérez-Moreno, F., Lobo-Guerrero, A. (2019). Properties and arsenic removal evaluation of polyvinyl alcohol nanofibers with embedded strontium hexaferrite nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 234, 151-157.
- 51 Murillo-Ortiz, R., Mirabal-García, M., Martínez-Huerta, J. M., Cabal Velarde, J. G., Castaneda-Robles, I. E., Lobo-Guerrero, A. (2018). Analysis of the magnetic properties in hard-magnetic nanofibers composite. *Journal of Applied Physics*, 123(10).
- 52 Godara, S.K., Prakash, J., Jasrotia, R., Ahmed, J., Tamboli, A.M., Hossain, A., Kandwal, A. (2023). Green synthesis of magnetic nanoparticles of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrites using tomato pulp: structural, morphological, optical, magnetic and dielectric traits. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(20), 1516.
- 53 Soltys, L., Olkhovyy, O., Tatarchuk, T., Naushad, M. (2021). Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles: Principles of green chemistry and raw materials. *Magnetochemistry*, 7(11), 145.
- 54 Manikandan, M., Venkateswaran, C. (2014). Effect of high energy milling on the synthesis temperature, magnetic and electrical properties of barium hexagonal ferrite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 358, 82-86.
- 55 Prathap, S., Madhuri, W., Meena, S. S. (2021). Multiferroic properties and Mössbauer Study of M-type hexaferrite $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ synthesized by the high energy ball milling. *Materials Characterization*, 177, 111168.
- 56 Deshmukh, K.K., Nawale, S.P., Gurav, K.A., Dube, P., Keche, A.P., Jadhav, K.M. (2026). Rietveld Refinement of X-Ray Diffraction Analysis and Investigation of Structural, Morphology, Surface Area, and Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles for Antibacterial Activity. *Crystal Research and Technology*, 61(5), e70112.
- 57 Nath, M., Bandyopadhyay, A. (2025). Rietveld Analysis: An Essential Tool for Structural Analysis. In *Contemporary Advancements in Materials Technology* (pp. 105-119). Apple Academic Press.
- 58 Kumar, N., Kumar, A., Jha, R., Dogra, A., Pasricha, R., Kotnala, R.K., Awana, V.P.S. (2010). Impact of particle size on room temperature ferrimagnetism of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 23(4), 423-427.
- 59 Selvaraj, S., Gandhi, U., Berchmans, L.J., Mangalanathan, U. (2021). Effect of magnetic ion substitution on the structure and temperature-dependent magnetic properties of strontium hexaferrite. *Materials Technology*, 36(1), 36-45.
- 60 Stingaciu, M., Mishra, D., de Julián Fernández, C., Cabassi, R., Eikeland, A. Z., Christensen, M., Deledda, S. (2021). High magnetic coercive field in Ca-Al-Cr substituted strontium hexaferrite. *Journal of Alloys and Compounds*, 883, 160768.
- 61 Coey, J. M. (2010). *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge University Press.
- 62 Cullity, B. D., Graham, C. D. (2011). *Introduction to magnetic materials*. John Wiley & Sons.
- 63 Gorter, E. W. (1957). Chemistry and magnetic properties of some ferrimagnetic oxides like those occurring in nature. *Advances in Physics*, 6(23), 336-361.
- 64 Gorter, E. W. (1957). Saturation magnetization of some ferrimagnetic oxides with hexagonal crystal structures. *Proceedings of the IEE-Part B: Radio and Electronic Engineering*, 104(5S), 255-260.
- 65 Gorter, E. W. (1963). Interactions in various magnetic compounds. *Journal of Applied Physics*, 34(4), 1253-1259.
- 66 Goodenough, J. B. (2008). Goodenough-Kanamori rule. *Scholarpedia*, 3(10), 7382.
- 67 Weihe, H., Güdel, H. U. (1997). Quantitative Interpretation of the Goodenough–Kanamori Rules: A Critical Analysis. *Inorganic Chemistry*, 36(17), 3632-3639.

- 68 Geertsma, W., Khomskii, D. (1996). Influence of side groups on 90 superexchange: A modification of the Goodenough-Kanamori-Anderson rules. *Physical Review B*, 54(5), 3011.
- 69 Pankhurst, Q.A., Pollard, R.J. (1991). Origin of the spin-canting anomaly in small ferrimagnetic particles. *Physical Review Letters*, 67(2), 248.
- 70 Dhingra, A., Thakur, O.P., Pandey, R. (2025). Magnetic properties, microwave absorption and EMI shielding study of Al-doped strontium hexaferrites. *Inorganic Chemistry Communications*, 173, 113810.
- 71 Lobo-Guerrero, A., Salazar-Muñoz, V.E., Del Toro, R.A., Hernández-Vázquez, E.E. (2025). M-type hexaferrites: A review of the impact of rare earth substitution on magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 627, 173132.
- 72 Fang, C.M., Kools, F., Metselaar, R., de With, G., de Groot, R.A. (2003). Magnetic and electronic properties of strontium hexaferrite $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ from first-principles calculations. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15(36), 6229-6237.
- 73 Liyanage, L.S.I., Kim, S., Hong, Y.K., Park, J.H., Erwin, S.C., Kim, S.G. (2013). Theory of magnetic enhancement in strontium hexaferrite through Zn-Sn pair substitution. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 348, 75-81.
- 74 Dixit, V., Nandadasa, C.N., Kim, S.G., Kim, S., Park, J., Hong, Y.K., Liyanage, L.S.I., Moitra, A. (2015). Site occupancy and magnetic properties of Al-substituted M-type strontium hexaferrite. *Journal of Applied Physics*, 117(24), 243904.
- 75 Hou, Y.H., Chen, X., Guo, X.L., Li, W., Huang, Y.L., Tao, X.M. (2021). Effects of intrinsic defects and doping on $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$: A first-principles exploration of the structural, electronic and magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 538, 168257.
- 76 Tejera-Centeno, C., Gallego, S. (2021). An ab initio study of the magnetic properties of strontium hexaferrite. *Scientific Reports*, 11, 1964.
- 77 Lu, Y., Akhtar, M.N., Yousaf, M., Katubi, K.M., Irfan, M., Khan, M.A., Al-Buriah, M.S. (2024). Structural, morphological, and EMI shielding evaluations of Sm-Mn co-doped Sr-based M-type hexaferrite for Ku band applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 994, 174627.
- 78 Karim, A., Gul, I.H. (2025). Study of structural, dielectric, and magnetic properties of nickel doped strontium hexaferrite nanoparticles for microwave absorption application. *Materials Research Express*, 12(9), 095008.
- 79 Ramadan, R., El-Masry, M. M. (2025). Rare-earth doped strontium hexaferrite nanocomposites for enhanced electromagnetic shielding and heavy metal remediation. *Scientific Reports*.
- 80 Iqbal, S., Khatoon, H., Kotnala, R. K., Ahmad, S. (2019). Mesoporous strontium ferrite/polythiophene composite: Influence of enwrappment on structural, thermal, and electromagnetic interference shielding. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107143.
- 81 Pati, A., Sahoo, P., Ray, S.K., Sahoo, A.K., Dash, S. (2022). Structural, dielectric and magnetic studies of modified strontium hexaferrite. *Materials Today: Proceedings*, 62, 6018-6021.
- 82 Xie, T., Xu, L., Liu, C., Ding, S., Yang, J., Wu, W. (2013). Synthesis and adsorption properties of high specific surface area strontium ferrite from Industrial Strontium Residue. *Vacuum*, 93, 71-78.
- 83 Sahoo, J. K., Konar, M., Rath, J., Kumar, D., Sahoo, H. (2020). Hexagonal strontium ferrite: cationic dye adsorption and antibacterial activity. *Separation Science and Technology*, 55(3), 415-430.
- 84 de los Ángeles Urbano-Peña, M., Berber-Mendoza, M.S., Palomares-Sánchez, S.A., Gutiérrez-Castañeda, E.J., Hurtado-López, G.F. (2024). Magnetic compounds based on strontium hexaferrite for the adsorption of lead in contaminated water. *Ceramics International*, 50(9), 14216-14222.
- 85 Sadiq, I., Khan, I., Rebrov, E.V., Ashiq, M.N., Naseem, S., Rana, M.U. (2013). Structural, infrared, magnetic and microwave absorption properties of rare earth doped X-type hexagonal nanoferrites. *Journal of Alloys and Compounds*, 570, 7-13.
- 86 Murillo-Ortiz, R., Martínez-Carreón, M. D.J., Guerrero, A.L., Herrera-Rivera, R., Pérez-Tijerina, E. G. (2026). M-Type Strontium Hexaferrite Nanostructures Derived from the Pechini Method as Magnetically Hard Adsorbents for Cadmium Removal in Aqueous Solution. *Materials*, 19(10), 1992.
- 87 Rashid, A. U., Southern, P., Darr, J.A., Awan, S., Manzoor, S. (2013). Strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) based composites for hyperthermia applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 344, 134-139.
- 88 Akobundu, U.U., Ifijen, I.H., Duru, P., Igboanugo, J.C., Ekanem, I., Fagbolade, M., Matthews, J.T. (2025). Exploring the role of strontium-based nanoparticles in modulating bone regeneration and antimicrobial resistance: a public health perspective. *RSC Advances*, 15(14), 10902-10957.
- 89 Joy, S. J. R., Kumar, T. P., Kalaivanan, N. S., Poonguzhali, S., Vidya, R., Babu, D. R. (2025). Antibacterial, cytotoxicity, and seed germination studies of strontium hexaferrite nanoparticles. *Inorganic Chemistry Communications*, 174, 113895.
- 90 Shchetinin, I.V., Nikolenko, P.I., Nizamov, T.R., Novikov, A.I., Ivanova, A.V., Zanaeva, E.N., Lileev, A.S. (2025). Effect of doping on structure and functional properties of $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ hexaferrite nanoparticles for biomedical applications. *Ceramics International*.
- 91 Vidya, R. (2025). Study of Biocompatibility and wound healing properties of Strontium Hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) nanoparticles. *Chemical Physics Impact*, 100960.
- 92 Tan, G., Chen, X. (2013). Synthesis, structures, and multiferroic properties of strontium hexaferrite ceramics. *Journal of Electronic Materials*, 42(5), 906-911.
- 93 Kumar, S. S., Singh, R. K., Kumar, N., Kumar, G., Shankar, U. (2021). Structural, Elastic, and Multiferroic property of strontium ferrite nanoceramic prepared by sol-gel derived citrate precursor method. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8567-8572.
- 94 Pullar, R. C. (2014). Multiferroic and magnetoelectric hexagonal ferrites. In *Mesoscopic Phenomena in Multifunctional Materials: Synthesis, Characterization, Modeling and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 95 Santos-López, F. J., Díaz-Castañón, S. (2024). Magnetic Properties and Electric Hysteresis in $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ Hexaferrites at Low Sintered Temperatures. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 37(5), 881-888.
- 96 Smith, A.J., Jaramillo, D. E., Osorio, J. (2009). Revisión del efecto Kerr magneto óptico. *Revista Mexicana de Física E*, 55(1), 61-69.
- 97 Gerber, R., Atkinson, R., Šimša, Z. (1997). Magnetism and magneto-optics of hexaferrite layers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 175(1-2), 79-89.
- 98 Chen, J., Duan, J., Anokhin, E.O., Xia, Z., Svetogorov, R.D., Semina, A. A., Trusov, L.A. (2024). Hard magnetic colloidal nanoplates with tunable size for magneto-optical applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 12(37), 14865-14875.