

Las ferritas - síntesis, funcionalización y aplicaciones: revisión bibliográfica

The ferrites - synthesis, functionalization and applications: bibliographic review

Juan Carlos Valdez – Dimas¹, Elia Martha Múzquiz Ramos¹, Adali Oliva
Castañeda Facio¹, Rebeca Betancourt Galindo².

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Ing. J.
Cárdenas Valdez S/N, República, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

² Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Enrique Reyna H. 140, San
José de los Cerritos, 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia para autor: Elia Martha Múzquiz Ramos

Universidad Autónoma de Coahuila

Correo electrónico: emuzquiz@uadec.edu.mx

(044) 844 130 6157

Resumen

En esta investigación se muestra de manera más amplia a las ferritas; su síntesis, funcionalización y sus aplicaciones. Las ferritas tienen una participación muy activa en la vida diaria de la sociedad moderna, porque son esenciales para que grandes cosas, que van desde la actividad de maquinaria electrónica hasta posibles tratamientos contra el cáncer, sucedan y/o funcionen. Por ello, es importante conocer su naturaleza, como pueden ser obtenidas y modificadas para que tengan una vida útil, aprovechando su magnetismo, conductividad, bioactividad, etc.

Palabras clave: Ferritas, síntesis, funcionalización, aplicaciones, nanopartículas, magnetismo.

Abstract

In this investigation, ferrites are shown more broadly; its synthesis, functionalization and its applications. Ferrites play a very active part in the daily life of modern society, because they are essential for great things, ranging from the activity of electronic machinery to possible cancer treatments, to happen and/or work. Therefore, it is important to know their nature, how they can be obtained and modified so that they have a useful life, taking advantage of their magnetism, conductivity, bioactivity, etc.

Key words: Ferrites, synthesis, functionalization, applications, nanoparticles, magnetism.

Introducción

En las últimas décadas, el ser humano ha continuado su evolución con el desarrollo de nuevas tecnologías que se adaptan o satisfacen las necesidades que van surgiendo conforme pasa el tiempo. A medida que el hombre avanza, su entorno también va cambiando con él, principalmente la vida urbana, la cual, sufre cambios constantemente para mejorar la calidad de vida de quienes habitan las grandes y pequeñas metrópolis. Sin embargo, este desarrollo trae consigo también una gran cantidad de problemas, como lo son las enfermedades, la contaminación, el uso excesivo de energía, sobreexplotación de recursos, entre muchos otros.

Ante estas, y demás problemáticas que afectan el día a día, la raza humana se ha puesto en marcha para la formación de nuevos materiales que contrarresten y/o solucionen los efectos negativos de su rápido ascenso en la historia de la evolución. Para lograr esto, se han apoyado en la nanotecnología, la cual es la ciencia que estudia y manipula la materia a escala casi atómica y que permite la obtención de nuevos materiales, estructuras o productos de una manera fácil, rápida, a bajo costo y sobre todo, amigable con el medio ambiente.

Un ejemplo de ello son las ferritas, nanopartículas cerámicas en las que su propiedad principal es la de ser magnéticas, y que desde el siglo XX han sido objeto de estudio para lograr aprovechar al máximo esta propiedad (y las demás que posee) en áreas que van desde la industria hasta la medicina. Las ferritas pueden estar en su estado basal o pueden modificarse con una gran variedad de

compuestos que pueden otorgarle otro tipo de características; dicha modificación puede hacerse desde su síntesis o cuando ya están elaboradas.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer en un entendimiento más amplio a estas nanopartículas, sus rutas de síntesis, como pueden funcionalizarse, así como sus aplicaciones, y que de esta forma se conozca un poco más sobre el uso de las mismas, ya que están presentes en la mayoría de las cosas que rodean a la sociedad e influyen directa o indirectamente en su funcionamiento y/o características.

Ferritas

Las ferritas son consideradas como materiales de carácter cerámico cuya principal característica es su comportamiento magnético. Se constituyen por óxido de hierro y óxidos metálicos; su fórmula molecular es $M(Fe^{3+})_2O_4$, en la cual “M” hace referencia al ion metálico que compone a la ferrita. Dicho material puede ser Cd^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , entre otros (Lozano y col., 2019).

Las ferritas poseen una estructura cubica centrada en las caras, cuyo arreglo atómico tiene 2 sitios para los cationes con respecto al oxígeno: sitios A, cuyo acomodo es tetraédrico de cara al oxígeno y los sitios B, en donde su organización es octaédrica en función del oxígeno. Siguiendo esta línea, dichos compuestos se dividen en dos modelos principales: las ferritas normales, donde los iones metálicos

ocupan los sitios A, mientras que los átomos de hierro se encuentran en los sitios B y las ferritas de estructura inversa, en las cuales tanto los iones metálicos y los de hierro ocupan por igual los sitios B (Chanduví y col., 2021).

Además de sus propiedades magnéticas (alta magnetización de saturación, alta permeabilidad y permitividad moderada), también presentan características ópticas, catalíticas y eléctricas como alta resistividad galvánica y baja pérdida dieléctrica (Lozano y col., 2019), las cuales son adquiridas gracias al tamaño de la partícula, composición química, estructura cristalina y su morfología (Jaimes y col., 2019).

Síntesis

Así como las propiedades dependen del tamaño de partícula y/o morfología, estas dependen de otro factor como lo es la ruta de síntesis. Métodos como la vía hidroquímica, descomposición térmica, microemulsión, método sol-gel y la coprecipitación son solo algunas formas de elaborar ferritas (García y col., 2021).

- Vía hidroquímica: Mediante esta vía se deben preparar soluciones del ion divalente sobre el cual se sintetizara la ferrita; dichas soluciones tienen que ser en forma de nitratos y a una concentración de 1 g/L. Aunado a esto, se deben realizar los cálculos correspondientes para determinar la cantidad necesaria de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) para lograr una relación molar de 15:1 (hierro: ion). En un reactor aparte, el cual tendrá estar conectado a un termostato, se verterá la solución del ion metálico junto con un electrodo conjugado y un detector de

temperatura. La solución necesita permanecer en agitación constante y a una temperatura de 60 °C; una vez alcanzada esta cifra, se procede a agregar unas gotas de hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración 2 M hasta alcanzar un pH de 10, se proporciona una corriente de aire y se deja reposar por una 1 hora. Una vez concluido el tiempo de la reacción, se enfría a temperatura ambiente para después ser filtrado al vacío; después de la filtración, el sólido se lava con exceso de agua destilada para eliminar los restos del hidróxido y sales de sulfato de sodio que puedan estar presentes. Finalmente se deja secar en una estufa a 100 °C por 2 horas (Aquino y col., 2011).

- Descomposición térmica: Este es considerado un experimento típico para la síntesis de estos compuestos. En él se disuelve acetilacetato de hierro (III) en éter bencílico con agitación constante por 30 minutos a 80 °C. Simultáneamente se mezcla en un matraz de fondo redondo y tres bocas, ácido oleico, 1,2-hexadecanodiol, oleilamina y éter bencílico con agitación magnética y atmósfera de nitrógeno. Esta reacción se lleva a cabo a 200 °C durante 1 hora. Transcurrido este tiempo, donde la temperatura se ha estabilizado y los reactivos se han fundido, se añade la solución de acetilacetato por inyección rápida y se mantiene en las mismas condiciones de reacción por 30 minutos. Cuando el periodo de reacción termina, se obtiene una mezcla oscura, la cual es dejada en reposo a temperatura ambiente hasta que se enfríe. Finalmente se procede a su purificación con etanol, lo cual provoca que los compuestos de hierro precipiten y se aíslen por centrifugación a

8000 revoluciones por minuto durante 8 minutos y retirando el sobrenadante; el sólido obtenido se mezcla con n-heptano y se vuelve a centrifugar bajo las mismas condiciones para eliminar residuos no dispersados. Este último procedimiento se realiza por triplicado (Belaïd y col., 2013).

- Microemulsión: La síntesis por microemulsión arranca a partir de una disolución de sulfato férrico pentahidratado ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y sulfato del metal sobre el cual se quieren obtener las ferritas (por ejemplo sulfato de manganeso) en agua destilada, de tal forma que se obtenga una relación molar 1:2 (metal-Fe(III)). Posterior a esto, se agrega una solución de NaDBS (dodecilmecenosulfonato de sodio) al 0.4 M y una cantidad generosa de tolueno; la relación entre el volumen de tolueno adicionado y el agua utilizada, influye directamente en el tamaño de las nanopartículas. Cuando todos los reactivos han sido agregados, se deja en agitación magnética por alrededor de 12 horas y posteriormente se agrega una solución 1 molar de hidróxido de sodio, manteniendo la agitación por 2 horas adicionales para la correcta formación del precipitado. El siguiente paso es eliminar los compuestos volátiles por medio de un rotavapor al vacío; el residuo obtenido se lava en repetidas ocasiones con agua y etanol para desechar las sales solubles que puedan quedar presentes y finalmente proceder a centrifugar para obtener un fino polvo de color negro (Peneque y col., 2008).

- Método sol-gel: Este método está dentro de los procedimientos químicos suaves ya que permite la manipulación a escalas moleculares de las reacciones que

en él se realizan, permitiendo obtener compuestos inorgánicos como partículas, películas delgadas, fibras, entre otros. Esta síntesis consiste en que a partir de moléculas precursoras como sales inorgánicas o alcóxidos metálicos, y gracias a reacciones de hidrólisis y polimerización a temperaturas bajas, se pueden obtener materiales de alta pureza. (Gutiérrez y Castellanos, 2015; Rojas, 2015). Debido a que se opera a bajas temperaturas, aunado a su bajo costo de elaboración y que no necesita equipamiento especial, lo hacen una ruta atractiva y de preferencia para la obtención de ferritas (Kefeni y col., 2017).

La etapa inicial del método sol-gel es la hidrólisis del alcóxido, la cual se puede llevar a cabo en medio ácido o alcalino, dando como resultado una suspensión que asemeja las características de una disolución con partículas de pequeño tamaño (>100 nm) a la que se le denomina “soles”; también se forman grupos silanoles (SiOH) así como la liberación del alcohol pertinente (R-OH). En la segunda etapa, se hacen presentes reacciones de condensación, que son las encargadas de polimerizar los grupos silanoles, derivando en la formación de estructuras en tercera dimensión unidas por medio de enlaces siloxano (Si-O-Si) al mismo tiempo que se elimina alcohol y agua. Cuando dicho proceso ha concluido se forma un sólido denso y compacto conocido como “gel” (Palma y col., 2010).

Una vez formado el gel y dejar que transcurra el tiempo, ocurre un proceso de envejecimiento, el cual consiste en dejar reposar el gel a temperatura ambiente, permitiendo nuevas reacciones de hidrólisis que producen cambios en la estructura

y en las propiedades del mismo (Rojas, 2015). El tiempo de envejecimiento es alrededor de 2 horas, para posteriormente proceder a un secado a altas temperaturas por 4 horas aproximadamente, con la finalidad de eliminar cualquier subproducto volátil que haya quedado presente y obtener el cristal final (Hongzhang Qi y col., 2010; Xu y col., 2007).

- Coprecipitación: Este método al igual que el sol-gel es uno de los más utilizados y uno de los favoritos debido a su facilidad, rapidez y bajo costo. En términos generales, el proceso engloba reacciones de sales disueltas en soluciones acuosas, en las cuales existe una saturación del producto formando un precipitado (Muñoz y col., 2007).

El sistema comienza con agua destilada en agitación magnética y calentamiento hasta alcanzar los 70 °C. Una vez alcanzada la temperatura, se agrega hidróxido de amonio (NH_4OH) concentrado y se deja calentando hasta alcanzar nuevamente los 70°C. Mientras se espera la temperatura adecuada se hace una solución en agua destilada agregando cloruro férrico y cloruro del metal que se desea tener presente en las ferritas, guardando una proporción de 2:1 respectivamente. Cuando la mezcla $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_4\text{OH}$ ha alcanzado la temperatura adecuada, se agrega gota a gota la disolución de cloruros; rápidamente se observa la formación de un precipitado de color negro (Figura 1), el cual se deja reposar por 30 minutos, manteniendo la agitación y la temperatura. Pasado este tiempo, el precipitado se separa por centrifugación o decantación magnética, lavándolo con agua destilada

en reiteradas ocasiones para eliminar restos de cloruros y secándolo a temperatura ambiente (López y col., 2012; Macías-Martínez y col., 2016).



Figura 1. Formación de ferritas

Estos son solo algunos de los métodos con los cuales es posible la obtención de ferritas. Como en todos los procesos, se ha buscado una mejora en los mismos, para hacerlos más efectivos, sencillos, rápidos, baratos e incluso amigables con el medio ambiente, siendo este último el más mencionado, puesto que las síntesis recurren a reactivos que se consideran tóxicos como solventes y surfactantes. Ante tal problemática, se ha recurrido a la denominada síntesis verde, en la cual, se busca que agentes biológicos, principalmente extractos de plantas que replacen a aquellas materias primas que no sean amigables con el medio ambiente (Calle y Londoño, 2014; Gómez-Garzón, 2018; Sarala y col., 2022).

Ejemplo de ello es el uso de extracto de okra o quimbombó (*Abelmoschus esculentus*) como agente reductor para la síntesis de ferritas. Dicho extracto es agregado gota a gota mientras que la solución de nitratos precursores se encuentra en agitación vigorosa, lo que provoca una mejor estabilidad entre las nanopartículas formadas (Kombaiah y col., 2018).

Funcionalización

Una problemática que presentan las ferritas es que en presencia de oxígeno pueden sufrir un proceso de oxidación, el cual, provoca pérdida de sus propiedades, principalmente en el superparamagnetismo y una reducción significativa en sus valores magnéticos. Ante esto, se ha optado por la opción de funcionalizar o encapsular estos materiales, buscando protegerlos; sin embargo, más allá de brindar una defensa contra la oxidación, los recubrimientos aplicados a ferritas pueden aportar ciertas propiedades que inicialmente no poseen y que por lo mismo extienden su campo de aplicación (Dirección de Investigación y Posgrado UA deC, 2021).

Las nanopartículas de ferritas pueden modificarse superficialmente con diversos tipos de compuestos como lo son polímeros (sintéticos y naturales), cerámicos, metales o incluso con extractos naturales; los cuales pueden ser introducidos durante o después del proceso de síntesis (Mazarío, 2015).

1.- Funcionalización con polímeros.

Los polímeros se pueden definir como macromoléculas de alto peso molecular formadas por unidades estructurales (iguales o diferentes entre sí) llamadas monómeros. Los polímeros, según su naturaleza, pueden dividirse en sintéticos (aquellos fabricados por acción del ser humano mediante un proceso llamado polimerización) y naturales (obtenidos directamente de la naturaleza) (Beltrán, 2011).

El polietilenglicol es un polímero formado a partir de la adición de óxido de etileno con agua. Es altamente soluble en agua y tolueno, inflamable, de bajo costo, altamente compatible con el cuerpo humano y se puede ser manejado y utilizado químicamente con gran facilidad (Rueda y col., 2015). El uso de este polímero como reactivo en la síntesis de ferritas, brinda una ligera película a las nanopartículas, la cual, evita la formación de otra fase de óxido de hierro, aumenta su nivel de cristalinidad y favorece sus propiedades magnéticas al cambiar su morfología. Además de esto, el empleo de polietilenglicol en sistemas de reacción que involucran sales inorgánicas, propicia una mejor absorción del mismo en la superficie del óxido metálico, derivando en una reducción de la tasa de crecimiento, es decir, las ferritas serán de un menor tamaño, dando como resultado variaciones en las propiedades mecánicas y físicas que bien pueden ser adaptadas en distintos usos dentro de la industria (Briceño y col., 2012).

Otro polímero utilizado para estos fines es el poliestireno sulfonado. El poliestireno es un polímero amorfo termoplástico fácil de producir, con buenas propiedades tanto térmicas como mecánicas, soluble en solventes polares y químicamente estable. La sulfonación de este material eleva la polaridad de las moléculas y consiste en agregar ácido sulfúrico y anhídrido acético con agitación constante (Almaraz y Cruz, 2007).

El poliestireno sulfonado se agrega a las nanopartículas de ferritas, encapsulando las mismas, con la intención de mejorar las propiedades de adsorción que puedan estar presentes. Al mejorar estas características (y aunadas al magnetismo presente) se busca que las ferritas tengan una mayor participación dentro de la remoción de metales pesados en aguas residuales, ya que estos elementos cada vez están más presentes en aguas desechadas por las industrias, las cuales pueden llegar a reservas de consumo humano y pueden provocar graves problemas de salud (Bernardes y col., 2022).

Además de estos, también se recurre al uso del alcohol polivinílico (PVA) debido a su carácter hidrofílico, baja toxicidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad; así como del poli (metacrilato de 2-hidroxietilo) (PHEMA) por su excelente estabilidad frente a agentes fisiológicos como el pH, la osmolaridad o la temperatura (Ferrer, 2021).

Por otro lado, los polímeros naturales también tienen presencia importante en la funcionalización de ferritas, ejemplo de ello es el quitosano y el almidón.

El quitosano (quitosana o chitosán) es un polisacárido que se obtiene a partir de la quitina, la cual está presente en los exoesqueletos de animales como el cangrejo, camarones y cucarachas principalmente. Es el segundo biopolímero más abundante en la tierra y está compuesto por glucosamina y N-acetil-D-glucosamida (Rodríguez-Pedroso y col., 2009). El uso de quitosano como recubrimiento se debe a que tiene la capacidad de formar delgadas películas sobre el material en cuestión, las cuales son altamente resistentes, biodegradables, flexibles, biocompatibles y no tóxicas. Su versatilidad química (derivada de los grupos amino presentes en su estructura) le otorgan la posibilidad de adherirse a distintas sustancias como iones, proteínas, enzimas, células cancerígenas, entre otras. Gracias a esto, las ferritas funcionalizadas con quitosano pueden ser aprovechadas en áreas médicas y farmacéuticas (Araújo, 2015).

Por su parte, el almidón, es la unión de 2 polisacáridos como lo son la amilosa y la amilopectina, unidos químicamente por enlaces α 1-4 y enlaces α 1-6. Es muy utilizado como materia prima dentro de la industria alimenticia, así como en la producción de papel y empaques biodegradables (Hernández-Medina y col., 2008).

Su uso como recubrimiento se basa principalmente en su propiedad hidrofílica, pues mejora la estabilidad y la biocompatibilidad de las partículas. Así mismo vuelve más eficiente la capacidad de interactuar con componentes biológicos como enzimas, anticuerpos o incluso con el ADN. El almidón (al igual que el ácido oleico y el ácido cítrico) se posicionó como un emulsionante de uso recurrente dentro de la síntesis

de nanopartículas magnéticas gracias a su bajo costo, nula toxicidad y facilidad de obtención (Andjelković y col., 2018).

2.- Funcionalización con cerámicos.

Los materiales cerámicos son compuestos formados a partir de un metal con un no metal (óxidos, carburos, nitruros, etc.), unidos químicamente y que poseen gran resistencia frente ambientes agresivos y con muy altas temperaturas. Ejemplos de estos son el dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO) entre otros (Pinto, 2011).

El dióxido de silicio o simplemente sílice (material fino y ligero de gran importancia industrial) es utilizado como encapsulante de ferritas debido a que es fuertemente estable en medios acuosos, es fácil de manejar durante su procesamiento, tiene buena inercia, porosidad controlable y buena transparencia química (Iqbal y col., 2017). Su facilidad para recubrir materiales se basa en la abundancia de grupos silanoles, los cuales son capaces de filtrar interacciones magnéticas entre las nanopartículas, lo que permite una mayor facilidad para dispersarse en medios líquidos (Mojić y col., 2012).

Además de la sílice, el óxido de titanio es uno de los materiales cerámicos más estudiado durante el siglo XXI dentro del campo de los fotocatalizadores, ya que es resistente a la fotocorrosión y no posee toxicidad. La funcionalización de nanocompuestos magnéticos con partículas de óxido de titanio es con la finalidad

de brindarles estabilidad, protección y buena compatibilidad. Sin embargo, se apunta hacia a la creación de materiales híbridos de ferrita-óxido de titanio, aprovechando las propiedades y características que ambos ofrecen, es decir, materiales con buena actividad fotocatalítica, absorción óptica, gran área superficial y sobre todo capacidades magnéticas (como la anisotropía magnetocristalina o la magnetización remanente) para ser fácilmente recuperados y/o redispersados (Mourão y col., 2010; Nlebedim y Jiles, 2015; Rodríguez, 2018).

Al igual que las moléculas orgánicas, como lo son los polímeros, los recubrimientos cerámicos también pueden tener propiedades de biocompatibilidad y ser aprovechadas dentro del campo médico. Tal es el caso de la hidroxiapatita, la cual, es un material a base de fosfato de calcio, que se injerta directamente en los huesos, proporcionando reservas de calcio y fosfato y que serán reabsorbidos lentamente durante los procesos de regeneración y remineralización ósea (Pereira y Oliva, 2016). Su uso con las ferritas (por medio de fluido corporal simulado y wollastonita para suministrar iones calcio) busca que estas tengan mejor relación con los tejidos óseos, así como nulos efectos hemolíticos y sin daño hepático y/o renal (Múzquiz-Ramos y col., 2013).

3.- Funcionalización con metales

Los metales, por su parte, también juegan un papel importante dentro de la modificación de las ferritas. Por ejemplo, se hace uso de la plata para la formación de compuestos núcleo-coraza de ferrita-plata, por medio de la reducción *in-situ*, con

la finalidad de obtener un agente microbiano eficaz contra hongos y bacterias (Amarjargal y col., 2013; Changanaquí y col., 2019).

Otro modelo de esta situación es el empleo del oro como carcasa de los materiales. El oro, al igual, que las ferritas, tiene propiedades magnéticas, además de poseer características plasmódicas, es decir, son capaces de acoplar su densidad electrónica a la radiación electromagnética de una determinada longitud de onda (Oliveira-Filho y col., 2021). La síntesis de películas delgadas a base de oro para encapsular ferritas busca abrir una nueva ruta de uso para este metal, así como también buscar una mejora en las propiedades ópticas y magnéticas de las nanopartículas (Zhao y col., 2021).

4.- Funcionalización con extractos orgánicos

Como se mencionó anteriormente, los extractos naturales han tenido gran impacto dentro de la síntesis de nanopartículas debido a los atributos que estos pueden otorgarles al momento de ser sintetizadas (Sarala y col., 2022).

Los extractos provenientes de plantas son compuestos (generalmente líquidos) que se obtienen a partir de las semillas, hojas, raíces, tallos y/o flores de una gran variedad de plantas. Obtenidos mediante diversas metodologías, se extraen con la finalidad de obtener diversos componentes como piretroides, terpenoides, polifenoles, alcaloides, entre otros (Nascimento y col., 2008).

Actualmente se han utilizado extractos de sábila (*aloe vera*), nopal (*opuntia ficus-indica*) o moringa (*moringa oleífera*), como disolventes durante la síntesis, ya que permiten obtener las partículas en un menor tiempo, a más bajo costo y siendo amigable con el medio ambiente (Almessiere y col., 2021; Vera-García y col., 2020)

Pruebas recientes, se han llevado acabo empleando el extracto de papa como medio de reacción y agente estabilizador de la reacción. A dicho extracto se le agrego una solución de sulfato ferroso, las cuales fueron sometidas a un proceso de ultrasonificación a 80 °C, ajustando el pH a 8 mediante la adicción de hidróxido de sodio gota a gota. El resultado final, fueron ferritas (Fe_3O_4) recubiertos con almidón, las cuales pueden ser utilizadas para la degradación y eliminación del colorante “rodamina B”, presente en aguas residuales (Sharma y col., 2019).

Por otro lado, también se ha recurrido al empleo del extracto vegetal de la rosa china (*Hibiscus rosa-sinensis*) como reactivo, esto debido a que posee una gran variedad de compuestos como la vitamina C, el betacaroteno o la antocianina que son considerados como agentes antioxidantes.

La síntesis se lleva acabo adicionando al extracto de rosa una solución de cloruros férrico y ferroso, la cual se agita vigorosamente por 1 hora a 60 °C. Posteriormente se coloca en una autoclave a 200 °C por 6 horas, se lleva a cabo una filtración y una calcinación a 300 °C por 3 horas. Las nanopartículas con este extracto vegetal fueron puestas a prueba contra microorganismos patógenos de importancia médica, como lo son *S. aureus* y *E. coli*, midiendo la capacidad de inhibición que se pudiera

presentar, siendo las bacterias gram-negativas las que mostraron una mayor inactividad celular. Además de esto, y al igual que con extracto de papa, también son utilizadas para eliminar colorantes en aguas contaminadas (Velayutham y col., 2022).

Aplicaciones

Aproximadamente desde los años 70`s, se ha investigado el uso de ferritas en diferentes campos con el fin de aprovechar al máximo sus propiedades magnéticas. Áreas que implican una transferencia de energía por métodos magnéticos como las telecomunicaciones, la electrónica o incluso la medicina, tienen como pieza importante a las ferritas (Valenzuela, 2018).

1.- Medicina

El cáncer posee una de las tasas de mortalidad más altas en el mundo; se estima que al año se registran alrededor de 3 millones de casos nuevos, solo en el continente americano. Ante esto se ha puesto en marcha la búsqueda de métodos alternativos para combatirlo, y con el ello el desarrollo de materiales que contribuyan con este fin.

Las nanopartículas de ferrita han sido utilizadas como vehículos para la liberación de fármacos, para obtener una mejor resolución en las imágenes de resonancia magnética y más recientemente en la hipertermia magnética, la cual consiste en suministrar las nanopartículas en el tumor para después excitarlas con un campo

de radiación magnética, provocando que aumenten su temperatura y destruyan la masa celular maligna. Todo esto se basa en el tamaño de partícula (<100 nm) y la biocompatibilidad que presente el material (Jasso-Terán y col., 2016).

2.- Eliminación de metales pesados en sistemas acuosos

Cada año las industrias generan y desechan millones de litros de agua residual que contienen metales pesados (plomo, cadmio, etc.) y que por un mal manejo de estos desechos, se puede derivar en la contaminación de mantos acuíferos destinados al consumo humano.

La eliminación de estos metales puede hacerse por métodos fisicoquímicos como la filtración o la sedimentación; sin embargo el uso de ferritas representa un método fácil y rápido para la limpieza del agua, pues estas se adhieren a los metales y posteriormente son retirados con la ayuda de un imán (García y col., 2010).

3.- Actividad antimicrobiana

Si bien es cierto que el hierro es un elemento esencial para los seres vivos, ya que está presente en proteínas y enzimas, además de ayudar a la fijación de otros elementos y en el transporte de electrones durante la respiración, también puede llegar a ser tóxico bajo ciertas condiciones (Ewunkem y col., 2021).

Las nanopartículas ferromagnéticas en su estado base o modificadas con algún otro tipo de compuesto pueden presentar propiedades que inhibe el crecimiento de bacterias como *E.coli*, *L. adecarboxylata*, *S. aureus* y *E. faecium*, entre otras;

teniendo un ligero mayor efecto en aquellas que sean gram-positivas. Además de esto, también pueden contar con la capacidad significativa de evitar la formación de biopelículas (Rabaa y col., 2023).

4.- Protección contra la corrosión

Anteriormente se habló sobre las películas que son aplicables para las nanopartículas, y las propiedades que estos pueden otorgar; sin embargo también es posible hablar del uso de ferritas como recubrimiento para distintos fines. Tal es el caso de su aplicación sobre una superficie metálica para evitar el proceso electroquímico de la corrosión, esto gracias a que mejoran mecánicamente la resistencia del material aglutinante, lo que reduce en gran medida su solubilidad y su tendencia a saponificarse en ambientes corrosivamente agresivos (Nechvílová y Kalendová, 2015).

5.- Sensores eléctricos

Las propiedades magneto-eléctricas de compuestos cerámicos, como la capacitancia, resistencia o la conducción de electrones, los hacen una adecuada opción para la fabricación de sensores que pueden detectar una fluctuación en factores como la temperatura, la presión, humedad, entre otros. Los sensores hechos a partir de ferritas poseen alta sensibilidad, detección a bajos niveles de cambio y excepcional relación cantidad de señal-ruido (Kefeni y col., 2017).

Estas son solo algunas de las múltiples aplicaciones en las que se pueden utilizar nanopartículas de ferrita. También pueden ser auxiliares en aplicaciones fotoluminiscentes, dieléctricas, catalíticas, fotocatalíticas, de colorantes, entre otras (Salih y Mahmood, 2023).

Conclusiones

Los nanomateriales magnéticos, han estado presentes en el día a día de la sociedad, desde pequeños aparatos cotidianos hasta procesos industriales que ayudan a cubrir distintas necesidades.

En las últimas décadas, las ferritas, han tenido grandes avances dentro del campo de la salud, y hoy en día pueden ofrecer nuevas maneras de ofrecer un diagnóstico, nuevos tratamientos basados en la liberación controlada de fármacos, así como también un tratamiento menos agresivo para combatir el cáncer. Muy seguramente estos avances seguirán creciendo y en pocos años serán la primera respuesta clínica y posiblemente la única necesaria.

El uso de la nanotecnología ha ido avanzando a pasos agigantados y con esto, se ha buscado mejorar sus características para así aumentar su aprovechamiento en diversas áreas. Sobresalen aquellos materiales que pueden ser obtenidos de forma amigable con el ambiente, con la llamada “síntesis verde”, los cuales son una excelente opción para sustituir a los componentes que son agresivos con el ambiente, ya sea en su síntesis, su uso o su desecho.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas, a la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, de igual manera se agradece la beca con número 826444 otorgada por CONACYT.

Referencias bibliográficas

- Almaraz, R. L., & Cruz, M. (2007). Síntesis, caracterización y aplicación del PS entrecruzado a partir de residuos de PS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 8(2): 112-137. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2291747>
- Almessiere, M. A., Auwal, I., Shah, J., Gondal, M. A., Sertkol, M., & Baykal, A. (2021). Biosynthesis effect of *Moringa oleifera* leaf extract on structural and magnetic properties of Zn doped Ca-Mg nano-spinel ferrites. *Arabian Journal of Chemistry*. 14(8): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103261>
- Amarjargal, A., Tijing, L. D., Im, I., & Kim, C. S. (2013). Simultaneous preparation of Ag/Fe₃O₄ core-shell nanocomposites with enhanced magnetic moment and strong antibacterial and catalytic properties. *Chemical Engineering Journal*. 226: 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.054>
- Andjelković, L., Šuljagić, M., Lakić, M., Jeremić, D., Vulić, P., & Nikolic, A. (2018). A study of the structural and morphological properties of Ni-ferrite, Zn-ferrite and Ni-Zn-ferrites functionalized with starch. *Ceramics International*. 44(12): 14163-14168. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.018>
- Aquino, E., Prieto, F. J. G., Galán, C. J., Barrado, E., Medina, J., & González, C. (2011). Ferrite of Cd, Pb and Mn, synthesis and characterization hydrochemical way. *Avances En Ciencias e Ingeniería*. 1(3): 1-13. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/3740946.pdf>
- Araújo, P. T. (2015). *Obtenção de híbridos de nanoferrita/SiO₂/quitosana para uso em biossensores* [Tesis doctoral]. Universidad Federal de Campina Grande.
- Belaïd, S., Laurent, S., Vermeersch, M., Elst, L. V., Perez-Morga, D., & Muller, R. N. (2013). A new approach to follow the formation of iron oxide nanoparticles synthesized by thermal decomposition. *Nanotechnology*. 24(5): 55705-55713. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/5/055705>

Beltrán, M. (2011). *Estructura y propiedades de los polímeros*. México: Editorial Core. 3pp. <https://core.ac.uk/display/16369100>

Bernardes, P. D., Faria, A. C. Q. D., Salla, M. R., Pasquini, D., Morais, L. C. D., & Morais, I. H. (2022). Remoção de chumbo (II) de solução aquosa por nanopartículas magnéticas (MnFe₂O₄) funcionalizadas com poliestireno sulfonado. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*. 27(6): 1133-1144. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210277>

Briceño, S., Brämer-Escamilla, W., Silva, P., Delgado, G. E., Diaz, Y., Plaza, E., & Cañizales, E. (2012). Synthesis, characterization and magnetic properties of CoFe₂O₄ nanoparticles using peg as surfactant. *Revista Latiamericana de Metalurgia y Materiales*. 33(1): 156-162. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522013000100017

Calle, L. C., & Londoño, M. L. G. (2014). Síntesis verde de nanopartículas de plata mediante el uso del ajo (*Allium sativum*). *Revista Soluciones de Postgrado*. 6(12): 129-140. <http://repository.eia.edu.co/revistas/index.php/SDP/article/view/604/0>

Chanduví, H. H. M., Rebaza, A. V. G., & Errico, L. A. (2021). Structural, magnetic and hyperfine properties of the ferrite MgFe₂O₄: an ab-initio calculations. *Anales AFA*. 31(4): 121-126. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.4.121>

Changanaquí, K., Alvarado, D., & Alarcón, H. (2019). Síntesis y caracterización de nanocompuestos Fe₃O₄/Ag: su efecto contra *Enterobacter aerogenes* y *Enterococcus faecalis*. *Revista Colombiana de Química*. 48(2): 33-39. <https://www.redalyc.org/journal/3090/309059401002/html/>

Dirección de Investigación y Posgrado UA de C (2021). Funcionalización de nanopartículas de ferrita de cobre con ácido oleico mediante sonoquímica. [En línea]. Disponible en: <http://www.investigacionyposgrado.uadec.mx/publicacion/funcionalizacion-de-nanoparticulas-de-ferrita-de-cobre-con-acido-oleico-mediante-sonoquimica/> Fecha de consulta: 01 de agosto de 2023.

Ewunkem, A. J., Rodgers, L., Campbell, D., Staley, C., Subedi, K., Boyd, S., & Graves, J. L. (2021). Experimental Evolution of Magnetite Nanoparticle Resistance in *Escherichia coli*. *Nanomaterials*. 11(3): 790. <https://doi.org/10.3390/nano11030790>

Ferrer, C. (2021). *Síntesis de nanopartículas NiFe₂O₄. Ensayos de recubrimiento y funcionalización con vistas a su empleo como materiales funcionales* [Tesis Doctoral]. Universidad Complutense de Madrid.

García, E. M., Ríos, J. C., Rosales, M. G., García, M., & Rosales, B. I. (2021). Synthesis of ferrites with different Zn/Fe ratios by chemical coprecipitation and the effect of heat treatments and mechanical grinding on crystallite size. *CienciaCierta*. 66: 26-40. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/CC66/sintesisdeferrita.pdf>

García, G., Prieto, F. J. G., Rodríguez, J. M., & González, M. (2010). Formación de ferritas magnéticas mediante coprecipitación para eliminar metales de sistemas acuosos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 1(4): 33-40. <https://biblat.unam.mx/es/revista/avances-en-ciencias-e-ingenieria/articulo/formacion-de-ferritas-magneticas-mediante-coprecipitacion-para-eliminar-metales-de-sistemas-acuosos>

Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*. 27(2): 75-80. <https://doi.org/10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191>

Gutiérrez, M. P., & Castellanos, M. A. (2015). Síntesis por el método sol-gel aplicado al estudio del polimorfismo en nanopartículas de TiO₂. *Mundonano*. 4(1): 67-73. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2011.1.50990>

Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*. 28(3): 718-726. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612008000300031>

Hongzhang Qi, Biao Yan, & Chengkui Li. (2010). Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles by sol-gel method. *3rd International Nanoelectronics Conference (INEC)*: 88-89. <https://doi.org/10.1109/inec.2010.5425143>

Iqbal, M. A., Islam, S. H., Ghosh, K., Molla, R. A., & Kamaluddin. (2017). Silica Functionalized Magnetic Nickel Ferrite Nanoparticles as an Efficient Recyclable Catalyst for S-Arylation in Aqueous Medium. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 27(6): 1730-1739. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0636-3>

Jaimes, C., Santiago, E., Sagredo, V., & Márquez, G. (2019). Synthesis and characterization of cobalt ferrite nanoparticles. *Ciencia e Ingeniería*. 40(2): 165-169. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507567825007>

Jasso-Terán, R. A., Cortés-Hernández, D. A., Sánchez-Fuentes, H. J., Reyes-Rodríguez, P. Y., & De León-Prado, L. E. (2016). Nanopartículas magnéticas de zinc

y calcio para aplicaciones en hipertermia magnética. *Revista Facultad de Ingeniería*. 25(42): 89-98. <https://doi.org/10.19053/01211129.4632>

Kefeni, K. K., Msagati, T. A., & Mamba, B. B. (2017). Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications in electronic device. *Materials Science and Engineering: B*. 215: 37-55. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.11.002>

Kombaiah, K., Vijaya, J. J., Kennedy, L. J., Bououdina, M., Ramalingam, R. J., & Al-Lohedan, H. A. (2018). Okra extract-assisted green synthesis of CoFe_2O_4 nanoparticles and their optical, magnetic, and antimicrobial properties. *Materials Chemistry and Physics*. 204: 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.10.077>

Lopez, J. A. R., Espinoza-Beltrán, F., Zambrano, G., Gómez, M. E. P., & Prieto, P. (2012). Caracterización de nanopartículas magnéticas de CoFe_2O_4 y $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ preparadas por el método de coprecipitación química. *Revista Mexicana De Física*. 58(4): 293-300. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v58n4/v58n4a2.pdf>

Lozano, R., Farías-Cepeda, L., Rosales, L., & Ramos-González, R. (2019). Revisión de ferritas híbridas de metales pesados. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 20(1): 1-12. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6839946>

Macías-Martínez, B., Cortés-Hernández, D., Zugasti-Cruz, A., Cruz-Ortíz, B., & Múzquiz-Ramos, E. (2016). Heating ability and hemolysis test of magnetite nanoparticles obtained by a simple co-precipitation method. *Journal of Applied Research and Technology*. 14(4): 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.007>

Mazarío, E. (2015). *Síntesis electroquímica de nanopartículas de ferrita de cobalto, caracterización y aplicaciones biomédicas* [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid.

Mojić, B., Giannakopoulos, K. P., Cvejic, Z., & Srdić, V. V. (2012). Silica coated ferrite nanoparticles: Influence of citrate functionalization procedure on final particle morphology. *Ceramics International*. 38(8): 6635-6641. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.05.050>

Mourão, H. A., Malagutti, A. R., & Ribeiro, C. (2010). Synthesis of TiO_2 -coated CoFe_2O_4 photocatalysts applied to the photodegradation of atrazine and rhodamine B in water. *Applied Catalysis A-general*. 382(2): 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.05.007>

- Muñoz, J. R., Molano, W. A., & Jurado, S. R. (2007). Obtention Of System SBN ($\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$) Ceramics Powders By Controlled Coprecipitation Method. *Scientia et technica*. 1(36): 597-599. <https://doi.org/10.22517/23447214.5127>
- Múzquiz-Ramos, E., Cortés-Hernández, D. A., Escobedo-Bocardo, J., Zugasti-Cruz, A., Ramírez-Gómez, X. S., & Osuna-Alarcón, J. G. (2013). In vitro and in vivo biocompatibility of apatite-coated magnetite nanoparticles for cancer therapy. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 24: 1035-1041. <https://doi.org/10.1007/s10856-013-4862-0>
- Nascimento, F. J. D., Filho, E. T. D., De Mesquita, L. X., De Oliveira, A. B., & Pereira, T. J. (2008). Extractos vegetales en el control de plagas. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*. 3(3): 1-5. <https://doi.org/10.18378/rvads.v3i3.103>
- Nechvílová, K., & Kalendová, A. (2015). Properties of organic coatings containing pigments with surface modified with a layer of ZnFe_2O_4 . *Advances in Science and Technology Research Journal*. 9(28): 51-55. <https://doi.org/10.12913/22998624/60783>
- Nlebedim, I. C., & Jiles, D. (2015). Thermal effects on the magnetic properties of titanium modified cobalt ferrite. *Journal of Applied Physics*. 117(17): 17A506. <https://doi.org/10.1063/1.4919229>
- Oliveira-Filho, G., Atoche-Medrano, J., Aragón, F. H., Ochoa, J. M., Pacheco-Salazar, D., Da Silva, S., & Coaquira, J. A. H. (2021). Core-shell $\text{Au}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposite synthesized by thermal decomposition method: Structural, optical, and magnetic properties. *Applied Surface Science*. 563: 150290. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150290>
- Palma, M. F. V., Acuña, R., Acosta, G., & Padrón, G. H. (2010). Estado del arte del proceso sol-gel en México. *Ciencia Ergo Sum*. 17(2): 183-188. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10413200009>
- Peneque, A. A., Diaz, S., Jacinto, P. S., & Reguera, E. (2008). Síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas basadas en la MnFe_2O_4 tipo espinela. *Revista Cubana de Física*. 25(2): 117-122. <https://www.fisica.uh.cu/biblioteca/revcubfi/index.htm>
- Pereira, Á. & Oliva, P. (2016). Hydroxyapatite Effectiveness in the Healing of Bone and Implants Dental Implants: a Systematic Review of the Literature. *International journal of odontostomatology*. 10(3): 373-380. <https://doi.org/10.4067/s0718-381x2016000300001>

Pinto, A. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. (2011). Guía didáctica: Materiales y materias primas: Cerámicos. [En línea]. Disponible en: <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL007440.pdf>. Fecha de consulta: 05 de Agosto de 2023.

Rabaa, M., Mezher, M., Aridi, A., Naoufal, D., Khalil, M. I., Awad, R., & Abdeen, W. (2023). Influence of Lanthanum Doping on the Photocatalytic and Antibacterial Capacities of $\text{Mg}_{0.33}\text{Ni}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanoparticles. *Catalysts*. 13(4): 693. <https://doi.org/10.3390/catal13040693>

Rodríguez, A. A. (2018). *Síntesis de nanomateriales óxido magnético- TiO_2 por estrategias del método de reacción en microemulsión aceite-en-agua y su evaluación fotocatalítica en la producción de H_2* [Tesis Doctoral]. Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).

Rodríguez-Pedroso, A. T., R., Rivero-González, D., Bosquez-Molina, E., Barrera-Necha, L. L., & Bautista-Baños, S. (2009). Propiedades químico-estructurales y actividad biológica de la quitosana en microorganismos fitopatógenos. *Revista Chapingo. Serie horticultura*. 15(3): 307-317. <http://www.redalyc.org/pdf/609/60912186012.pdf>

Rojas, M. L. (2015). *Diseño y síntesis de materiales «a medida» mediante el método sol-gel*. UNED. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=F-OkjCUfe0MC&oi=fnd&pg=PP1&dq=metodo+sol+gel&ots=U2p4i8JZQ2&sig=3amDAfzbnFhryFvpBsg3VrXRFRY#v=onepage&q&f=false>. Fecha de consulta: 14 de Agosto de 2023.

Rueda, J., Asmad, M., Sedano, M., Zschoche, S., & Voit, B. (2015). Synthesis of new block copolymers based on polyethyleneglycol and 2-Oxazolines. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 81(4): 299-310. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v81i4.33>

Salih, S. J., & Mahmood, W. M. (2023). Review on magnetic spinel ferrite (MFe_2O_4) nanoparticles: From synthesis to application. *Heliyon*. 9(6):16601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16601>

Sarala, E., Vinuth, M., Naik, M. M., & Reddy, Y. R. (2022). Green synthesis of nickel ferrite nanoparticles using *Terminalia catappa*: Structural, magnetic and anticancer studies against MCF-7 cell lines. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 8: 100150. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100150>

Sharma, R., Yadav, S., Gupta, R., & Arora, G. (2019). Synthesis of Magnetic Nanoparticles Using Potato Extract for Dye Degradation: A Green Chemistry

Experiment. *Journal of Chemical Education*. 96(12): 3038-3044.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00384>

Valenzuela, R. A. (2018). Experimentan en la UNAM con ferritas para hacer materiales útiles en electrónica y medicina. Boletín UNAM-DGCS-437. [En línea]. Disponible en https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_437.html Fecha de consulta: 3 de julio de 2023.

Velayutham, L., Parvathiraja, C., Anitha, D. C., Mahalakshmi, K., Jenila, R. M., Alasmary, F. A., Almalki, A. S., Iqbal, A., & Jang, S. (2022). Photocatalytic and Antibacterial Activity of CoFe_2O_4 Nanoparticles from *Hibiscus rosa-sinensis* Plant Extract. *Nanomaterials*. 12(20): 3668. <https://doi.org/10.3390/nano12203668>

Vera-García, P.F.; Ascacio-Valdés, J.A.; Morales, G.; Acuña, P.; Rodríguez-Hernández, J.; Castañeda-Facio, A.O. (2021). “Estudio del comportamiento de diferentes extractos de plantas en la biosíntesis de nanopartículas de plata asistida por microondas”. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. 78(592): 68-78. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/385614>

Xu, J., Yang, H., Fu, W., Du, K., Sui, Y., Chen, J., Zeng, Y., Li, M., & Zou, G. (2007). Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles by sol–gel method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 309(2): 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.07.037>

Zhao, H., Ning, X., Yao, H., Hao, A., & Ismail, M. H. (2021). Facile sol-gel method derived Au nanoparticles decoration nickel ferrites thin films: Effect on optical and magnetic properties. *Materials Chemistry and Physics*. 265: 124480. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124480>