



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

Efecto del confinamiento de nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) sobre las propiedades ópticas, magnéticas y estructurales en composites poliméricos

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias de los Materiales

P R E S E N T A:

Bihari Nathanael López Gutiérrez

Asesores:

Dr. Azdrubal Lobo Guerrero Serrano

Dra. Ana María Herrera González

Mineral de la Reforma, Hgo., julio 2025



Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de junio de 2025

Número de control: ICBI-D/1000/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

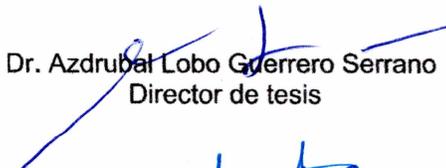
El Comité Tutorial de la tesis titulada **“Efecto del confinamiento de nanopartículas de hexaferrita de estroncio (SrFe₁₂O₁₉) sobre las propiedades ópticas, magnéticas y estructurales en composites poliméricos”** realizado por el sustentante **Bihari Nathanael López Gutiérrez** con número de cuenta **167968** perteneciente al programa del **Doctorado en Ciencias de los Materiales (directo)**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

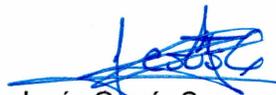
Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial


Dr. Azdrubal Lobo Guerrero Serrano
Director de tesis


Dra. Ana María Herrera González
Codirectora


Dr. Jesús García Serrano
Titular


Dra. Marissa Vargas Ramírez
Suplente

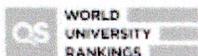

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/IBO

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uaeh.edu.mx



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
Department of Materials and Earth Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de junio del 2025

Número de control: ICBI-AACTyM/1926/2025

Asunto: Constancia de cumplimiento de requisitos académicos.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este medio se informa que **Bihari Nathanael López Gutiérrez** estudiante del **Doctorado en Ciencias de los Materiales (directo)**, ha concluido el artículo requisito académico.

Debido a lo anterior, la estudiante cumple con los requerimientos de egreso establecidos por el programa educativo de posgrado.

Por lo que solicito a usted tenga a bien permitir a esta coordinación dar continuidad al proceso de obtención de grado

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Azdrubal Lobo Guerrero Serrano
Coordinador del Doctorado
en Ciencias de los Materiales

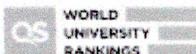
Dr. Julio Cesar Juárez Tapia
Jefe del Área Académica de Ciencias
de la Tierra y Materiales
Vo.Bo.

Dr. Luis Guillermo González Olivares
Coordinador de Investigación y
Posgrado del ICBI
Vo.Bo.

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI
Vo.Bo.

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40127, 40130
aactym_icbi@uaeh.edu.mx, jcjuarez@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

"Confía en el Señor con todo tu corazón, y no te apoyes en tu propia prudencia. Reconócelo en todos tus caminos, y Él enderezará tus veredas."

(Proverbios 3:5–6)

Con profundo agradecimiento y reverencia, dedico las primeras palabras de esta tesis a Dios, mi Padre celestial, quien ha sido mi guía constante, mi fuerza en los momentos de debilidad, y mi esperanza en las noches más largas. Sin Su dirección, nada de esto hubiera sido posible. A lo largo de este camino doctoral, lleno de desafíos, dudas, decisiones difíciles y sacrificios personales, Su Palabra ha sido mi brújula. Hoy puedo testificar que Él ha cumplido Su promesa: ha enderezado mis veredas y me ha sostenido con Su fidelidad inquebrantable. A Él, toda la gloria.

Agradezco de todo corazón a mi esposa, Sofy, compañera de vida, de luchas y de sueños. Gracias por tu amor incondicional, por tu paciencia durante las largas horas de trabajo, por tus palabras de ánimo cuando sentía que no podía más, y por tu fe en mí aun cuando yo mismo dudaba. Has sido un pilar fundamental en este logro, y esta meta también te pertenece. Gracias por cuidar de nuestro hogar, por orar conmigo y por compartir esta travesía con todo tu corazón.

A mis hijos, Dante y Regina, tesoros que Dios me ha confiado, les agradezco por ser mi mayor motivación. Sus sonrisas, sus abrazos y su alegría fueron el combustible en los días difíciles. Gracias por comprender mi ausencia en tantos momentos y por enseñarme, sin palabras, lo que realmente vale la pena. Todo este

esfuerzo busca dejarles no solo un ejemplo académico, sino un legado de fe, perseverancia y esperanza.

A mis padres, quienes sembraron en mí el amor por la verdad, la responsabilidad y la fe. Gracias por su ejemplo de vida, por los valores que me inculcaron, y por su apoyo silencioso pero constante. Gracias por creer en mí y por sostenerme en oración. Esta victoria es tan suya como mía.

Agradezco sinceramente a mis asesores, mentores y profesores, por compartir su conocimiento, exigirme con sabiduría y acompañarme con paciencia en este proceso de formación. A mis compañeros de investigación y amigos, gracias por su colaboración, su tiempo, su ayuda técnica y su fraternidad.

Y finalmente, a todas las personas que, de una u otra forma, Dios colocó en mi camino —familiares, pastores, amigos, colegas— gracias por ser instrumentos de ánimo, consejo y ayuda en esta etapa de mi vida.

Hoy cierro este capítulo con gratitud profunda, sabiendo que cada paso fue guiado por una mano mayor que la mía. Este doctorado no solo representa un logro académico, sino una evidencia del poder de la fe, del amor familiar, y de la fidelidad de Dios.

Soli Deo Gloria.

De hecho, el único tiempo que se puede llamar presente es un instante, si por tal concebimos lo que no se puede dividir en fracciones por pequeñas que sean. Y un instante tan corto como este pasa tan rápidamente del futuro al pasado que su duración es apenas imperceptible. Si su duración se prolongara podría dividirse en pasado y futuro. Cuando es presente no tiene duración ni extensión.

San Agustín de Hipona

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCION.....	5
HIPOTESIS	11
OBJETIVOS	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	15
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 Alcohol polivinílico	17
1.2 Puentes de Hidrógeno.....	19
1.3 Hexaferrita de estroncio.....	22
1.4 Compuestos nanoestructurados de matriz polimérica	24
1.5 Films <i>Spin Coating</i>	25
1.6 Técnicas de caracterización.....	27
1.6.1 Difraccion de Rayos X	27
1.6.2 Método de Refinamiento Rietveld.....	29
1.6.3 Espectroscopia infrarroja.....	31
1.6.4 Espectroscopia de Fluorescencia	33
1.6.5 Microscopía Electrónica de Barrido	35
1.6.6 Microscopia de Fuerza Atómica	36
1.6.7 Magnetometría de muestra vibrante.....	40
CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	43
2.1 Síntesis de nanopartículas de hexaferrita de estroncio	43
2.2 Preparación de Alcohol polivinílico para la elaboración de película	44

2.3 Elaboración de películas del compuesto PVA/SrFe ₁₂ O ₁₉	46
2.4 Caracterización	48
2.4.1 Difracción de Rayos X	48
2.4.2 Refinamiento Rietveld	49
2.4.3. Espectroscopia Infrarroja	49
2.4.4 Espectroscopia de Fluorescencia	50
2.4.5 Microscopia electrónica de Barrido	50
2.4.6 Microscopia de Fuerza atómica	51
2.4.7 Magnetometría de muestra vibrante	52
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1 Difracción de Rayos X y Refinamiento Rietveld	53
3.2 Espectroscopia Infrarroja	56
3.3 Espectroscopia de Fluorescencia	61
3.4 Microscopia electrónica de Barrido	64
3.5 Microscopia de Fuerza atómica	66
3.6 Magnetometría de muestra vibrante	71
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	73
CAPÍTULO 5. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO	75
REFERENCIAS	77
ANEXO 1	91
Artículos publicados	91

RESUMEN

En este trabajo se desarrollaron y caracterizaron películas nanocompuestos basadas en alcohol polivinílico (PVA) con incorporación de nanopartículas magnéticas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$), sintetizadas mediante el método Pechini. El objetivo fue evaluar cómo la inclusión de nanopartículas y la aplicación de un campo magnético externo afectan las propiedades estructurales, ópticas, morfológicas, topográficas y magnéticas del sistema compuesto.

Las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ fueron caracterizadas estructuralmente por difracción de rayos X (DRX) y refinamiento Rietveld, confirmando la obtención de la fase hexagonal tipo M ($P6_3/mmc$) de alta pureza, sin señales de fases secundarias. Los parámetros de celda obtenidos ($a = 5.8358 \text{ \AA}$, $c = 22.8655 \text{ \AA}$) y el tamaño de cristalito ($\sim 87 \text{ nm}$) validan su cristalinidad y coherencia estructural. La integración de estas nanopartículas en la matriz polimérica modificó el patrón de difracción del PVA, evidenciando un corrimiento angular y pérdida de intensidad, asociado a una disminución en la fracción cristalina y a la formación de zonas de interfase estructuralmente perturbadas.

Mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se identificaron interacciones por puente de hidrógeno entre los grupos hidroxilo del PVA y los átomos de oxígeno dispuestos en la superficie de las nanopartículas, así como bandas características de vibraciones Fe–O. El campo magnético aplicado durante el spin-coating promovió una reorganización molecular adicional, modificando la intensidad de las bandas O–H y C=O, lo que sugiere un aumento en el volumen de la zona de interfase.

Los análisis ópticos mediante espectroscopía de fluorescencia revelaron que, en ausencia de campo, la intensidad de emisión se incrementa con la concentración de nanopartículas, atribuida a un entorno más rígido que favorece procesos radiativos. No obstante, la aplicación de un campo magnético durante la síntesis indujo un fenómeno de *apagamiento de fluorescencia*, con disminución de la intensidad de emisión, atribuible a la magnetización de las partículas y la formación de dominios anisotrópicos que facilitan canales de desactivación no radiativa.

Las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopia de fuerza atómica (AFM) confirmaron que la morfología superficial del PVA se ve alterada con la presencia de las SHF-NPs y el campo aplicado, observándose un incremento en la rugosidad, patrones tipo isla y regiones de mayor uniformidad superficial a altas concentraciones. Estas modificaciones fueron atribuidas a la reorganización estructural en la interfase y al efecto orientador del campo magnético durante la formación de la película.

Finalmente, la caracterización magnética mediante magnetometría de muestra vibrante (VSM) mostró un comportamiento ferrimagnético duro, con una coercitividad elevada ($H_c = 5.54$ kOe), alta magnetización remanente ($M_r = 40.14$ emu/g) y una magnetización de saturación de 68.46 emu/g, resultados coherentes con nanopartículas altamente anisotrópicas y bien ordenadas.

En conjunto, este estudio demuestra que la combinación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio y condiciones controladas de síntesis (campo magnético) permite modular las propiedades fisicoquímicas y funcionales del PVA, habilitando su uso potencial en aplicaciones optoelectrónicas, sensores, materiales magneto-ópticos y tecnologías de respuesta externa.

ABSTRACT

In this study, polyvinyl alcohol (PVA)-based nanocomposite films incorporating magnetic strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) nanoparticles synthesized via the Pechini method were fabricated and systematically characterized. The main objective was to investigate how nanoparticle incorporation and the application of an external magnetic field influence the structural, optical, morphological, topographical, and magnetic properties of the composite system.

Structural analysis of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanoparticles by X-ray diffraction (XRD) and Rietveld refinement confirmed the formation of a high-purity M-type hexagonal phase ($P6_3/mmc$) with no secondary phases detected. The obtained lattice parameters ($a = 5.8358 \text{ \AA}$, $c = 22.8655 \text{ \AA}$) and crystallite size ($\sim 87 \text{ nm}$) validated their crystallinity and structural coherence. Incorporation of these nanoparticles into the polymer matrix modified the PVA diffraction pattern, showing angular shifts and intensity loss, indicative of a reduction in crystalline fraction and the formation of structurally perturbed interfacial regions.

Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy revealed hydrogen-bonding interactions between the PVA hydroxyl groups and surface oxygen atoms of the nanoparticles, as well as characteristic Fe–O vibrational bands. The applied magnetic field during spin coating promoted additional molecular rearrangements, reflected by changes in the O–H and C=O band intensities, suggesting an increased interfacial volume.

Optical characterization by fluorescence spectroscopy showed that, in the absence of a magnetic field, the emission intensity increased with nanoparticle concentration,

attributed to a more rigid environment favoring radiative processes. However, applying a magnetic field during synthesis induced fluorescence quenching, with a reduction in emission intensity due to nanoparticle magnetization and the formation of anisotropic domains facilitating non-radiative deactivation pathways.

Scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) revealed that both the presence of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanoparticles and the applied field altered the PVA surface morphology, producing increased roughness, island-like patterns, and enhanced surface uniformity at higher nanoparticle loadings. These modifications were associated with interfacial structural reorganization and the magnetic field's orienting effect during film formation.

Finally, magnetic characterization by vibrating sample magnetometry (VSM) indicated hard ferrimagnetic behavior, with high coercivity ($H_c = 5.54$ kOe), significant remanent magnetization ($M_r = 40.14$ emu/g), and a saturation magnetization of 68.46 emu/g, consistent with highly anisotropic and well-ordered nanoparticles.

Overall, this study demonstrates that combining strontium hexaferrite nanoparticles with controlled synthesis conditions (magnetic field) enables fine-tuning of the physicochemical and functional properties of PVA, making it a promising candidate for optoelectronic devices, sensors, magneto-optical materials, and externally responsive technologies.

INTRODUCCION

Los materiales compuestos de matriz polimérica (PMC) han adquirido una importancia significativa en diversas aplicaciones debido a sus propiedades, las cuales dependen de las fases que los conforman. Estos materiales son combinaciones de dos o más componentes distintos que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa. Los PMC son inherentemente heterogéneos, lo que significa que sus propiedades no son uniformes en todo su volumen.

Generalmente, los PMC se clasifican en dos categorías: plásticos reforzados y compuestos avanzados. Estos últimos han sido utilizados desde la década de 1970 en la industria aeroespacial. Sin embargo, su aplicación ha experimentado un notable aumento en los últimos 25 años con la incorporación de rellenos funcionales como nanofósforos, nanopartículas y puntos cuánticos de carbono, los cuales han mostrado poseer propiedades luminiscentes, ópticas, magnéticas y eléctricas.

Inicialmente la adición de rellenos en una matriz polimérica tenía como objetivo proporcionar rigidez y fuerza, asegurando que las cargas mecánicas a las que las estructuras están sometidas fueran soportadas adecuadamente. La función de la matriz, relativamente débil, es unir fibras y transferir cargas entre ellas. Aunque los PMC han encontrado un campo de aplicación cada vez más amplio, uno de los factores limitantes ha sido el elevado costo y la fabricación laboriosa de estos compuestos. No obstante, el avance tecnológico ha generado una demanda de materiales con propiedades que ofrezcan equilibrio térmico, conductividad eléctrica y estabilidad química, lo que ha impulsado el desarrollo de diseños más eficientes y producción en masa económicamente viable.

La selección adecuada de la matriz y el relleno es crucial para la funcionalidad, aplicación y durabilidad del compuesto. La matriz, debe garantizar la adhesión y cohesión, que garantizan la integridad estructural del compuesto al mantener unidas las partículas de refuerzo. Además, la elección de la matriz influye en la facilidad de procesamiento y fabricación del compuesto, incluyendo la temperatura de procesamiento y la compatibilidad con las técnicas de fabricación.

Respecto al relleno, una selección adecuada impacta directamente en las propiedades mecánicas del compuesto. Puede contribuir a reducir la densidad del compuesto, mejorando la relación resistencia-peso, y aumentar la estabilidad química, haciéndolo más resistente a la corrosión y degradación química. Algunos rellenos también mejoran la conductividad térmica, aportan excelentes propiedades eléctricas, y optimizan las propiedades dieléctricas y magnéticas del compuesto.

Los PMC con nanopartículas magnéticas representan una clase de materiales avanzados que combinan las propiedades de los polímeros con las propiedades magnéticas de las nanopartículas. Estos compuestos presentan ventajas significativas para su aplicación en diversas áreas debido a sus propiedades magnéticas mejoradas, así como el aumento de la resistencia mecánica y durabilidad. Poseen un amplio rango de aplicaciones tecnológicas, incluyendo la aeronáutica, electrónica, medicina, y sistemas de almacenamiento de datos.

El desempeño de estos compuestos depende en gran medida de la naturaleza del polímero y también de factores relacionados con las nanopartículas magnéticas, tales como la dispersión, el alineamiento magnético, la geometría, estructura, proporciones relativas y la naturaleza de la interfase. Cada una de estas variables debe controlarse meticulosamente para producir un material estructural optimizado para las condiciones específicas de su uso.

Uno de los materiales magnéticos de mayor relevancia en la actualidad es la hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$), debido a sus excepcionales propiedades magnéticas. La Sr-M (hexaferrita de estroncio) es un material considerado magnéticamente duro, lo que significa que una vez magnetizado, mantiene su magnetización incluso en ausencia de un campo magnético externo. Esta

característica se debe a su alta anisotropía magnetocristalina, que contribuye a su alto campo coercitivo, permitiéndole mantener su magnetización bajo un campo magnético invertido.

La hexaferrita de estroncio pertenece a un grupo de ferritas conocido como ferritas hexagonales tipo M (Sr-M), las cuales además de las propiedades magnéticas que se mencionaron con anterioridad, poseen buenas propiedades eléctricas, alta estabilidad química y bajo costo de producción. La ferrita de estroncio hexagonal tipo M pertenece a la fase magnetoplumbita de las ferritas.

Para el diseño de materiales compuestos, se recomienda el uso de nanopartículas (NP's), debido a las ventajas que ofrecen. En el caso de la Sr-M, las nanopartículas exhiben propiedades magnéticas superiores en comparación con partículas mas grandes, debido a una mayor anisotropía magnetocristalina, lo que se traduce en una mayor coercividad y remanencia. Esto es beneficioso para aplicaciones en sensores y dispositivos de almacenamiento de datos.

Diversos estudios en los cuales se han elaborado películas delgadas con NP's de ferritas han demostrado que el eje de fácil magnetización suele estar a lo largo del eje C. Esto permite su uso en aplicaciones especializadas, tales como circuladores, aisladores, filtros de microondas y aisladores de fase. Estas investigaciones proporcionan una valiosa aproximación para la elaboración de compuestos de matriz polimérica, así como para la fabricación de películas delgadas embebiendo NP's de hexaferrita de estroncio.

Dentro de los polímeros más utilizados para la fabricación de materiales compuestos se encuentra el alcohol polivinílico (PVA), un polímero sintético de gran importancia en diversos campos. El PVA se destaca por su solubilidad en agua, biodegradabilidad, adhesividad, no toxicidad, estabilidad térmica, resistencia química, y biocompatibilidad. Estas características se atribuyen a su estructura como polímero lineal, compuesto principalmente por unidades repetitivas de alcohol vinílico, lo que otorga a sus cadenas una flexibilidad superior y la capacidad de deslizarse entre si con facilidad.

El PVA exhibe una disposición semicristalina de unidades repetitivas “cabeza a cola”, lo cual lo convierte en un material ideal para aplicaciones en la industria textil, médica, de construcción y alimentaria. Su estructura química, representada como $(C_2H_4O)_n$, permite ajustar sus propiedades mediante la modificación del grado de hidrólisis y el peso molecular, proporcionando un material versátil y adaptable a múltiples aplicaciones especializadas.

El PVA se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones. Estas abarcan desde la separación de mezclas de líquidos y gases mediante el uso de membranas, hasta tecnologías de materiales y la encapsulación de bacterias mediante electrohilado. Además, el PVA se emplea en la elaboración de membranas o recubrimientos para uso médico, como en la administración de medicamentos, y en aplicaciones alimenticias para la conservación de alimentos.

Una característica adicional del PVA es que, por sí mismo, no presenta propiedades de super intercambio. Sin embargo, cuando se combina con nanopartículas específicas, como las del óxido de titanio (TiO_2) o ácido hipofosforoso, se pueden crear nanocompuestos poliméricos que exhiben mejoras en la conductividad iónica y la estabilidad mecánica del PVA, lo que los hace más adecuados para aplicaciones especializadas.

La combinación de PVA con nanopartículas de hexaferrita de estroncio permite desarrollar compuestos poliméricos avanzados con propiedades mejoradas. Estos compuestos pueden aprovechar la flexibilidad y solubilidad del PVA, junto con las propiedades magnéticas de las nanopartículas, resultando en materiales aptos para aplicaciones en sensores, actuadores y dispositivos de almacenamiento de energía.

Una de las características importantes a considerar para el diseño de compuestos de matriz polimérica es la región interfacial, ya que esta tiene una influencia crítica en el comportamiento del compuesto. Los PMC son actualmente una parte importante en la ciencia de materiales debido que tienen un amplio rango de aplicación en diferentes industrias, como la industria automotriz con paneles de carrocería, y como parte de los circuitos eléctricos. Otros mercados incluyen la medicina, maquinaria industrial, dispositivos de almacenamiento y procesamiento,

transporte de productos químicos corrosivos, armas militares, construcción de viviendas prefabricadas y en la aplicación para su uso en los productos amigables con el medio ambiente.

En términos generales la tecnología para el desarrollo de estos materiales ha superado su estudio dejando de lado muchos aspectos claves para su comprensión y generar materiales mejorados, con esta finalidad se deben abordar necesidades como las proporciones relativas, ciencia de procesos, resistencia al impacto, delaminación y el estudio de la región interfacial, esta última es la región en el que las cargas se transmiten entre el relleno y la matriz, la magnitud de la interacción entre es una variable de diseño, y puede variar desde un fuerte enlace hasta fuerzas friccionales débiles, esto tiene una influencia crítica en el comportamiento de los PMC.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en la síntesis y caracterización de compuestos poliméricos a base de alcohol polivinílico y nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Se exploran las metodologías de síntesis, las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de los compuestos resultantes, así como sus posibles aplicaciones en diversas industrias.

HIPOTESIS

El confinamiento y ordenamiento de nanopartículas magnéticas de hexaferrita de estroncio al ser embebidas en una matriz polimérica de alcohol polivinílico, promueve un cambio en las propiedades estructurales del polímero, lo que a su vez resulta en una variación de las propiedades funcionales del material compuesto.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar los efectos del confinamiento y ordenamiento de nanopartículas magnéticas de hexaferrita de estroncio en una matriz polimérica de alcohol polivinílico y estudiar las características morfológicas y las propiedades estructurales y ópticas del compuesto basado en PVA/SrFe₁₂O₁₉ como función del contenido de nanopartículas y campo magnético externo.

Objetivos específicos

1. Caracterizar estructuralmente nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) previamente sintetizadas, mediante difracción de rayos X y refinamiento Rietveld, con el fin de confirmar la formación de fase pura tipo M y determinar parámetros cristalográficos relevantes.
2. Fabricar películas delgadas de nanocompuestos PVA/ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ por spin coating a diferentes concentraciones (0.25, 1.0 y 10.0 % en peso), con y sin aplicación de campo magnético externo durante su elaboración.
3. Estudiar los cambios estructurales inducidos por la incorporación de nanopartículas en la matriz de PVA, mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), enfocándose en las interacciones interfaciales y en la formación de zonas de interfase.
4. Caracterizar la morfología superficial y la topografía de las películas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM), para determinar el efecto del contenido de nanopartículas y del campo magnético en el relieve y rugosidad superficial.
5. Evaluar las propiedades ópticas de fluorescencia de los compuestos mediante espectroscopía de emisión, analizando el efecto de la concentración de nanopartículas y la aplicación de campo magnético sobre la intensidad y desplazamiento espectral.
6. Determinar las propiedades magnéticas de las nanopartículas mediante magnetometría de muestra vibrante (VSM), cuantificando los valores de coercitividad, magnetización remanente y de saturación, y relacionarlos con la morfología y tamaño de partícula.
7. Correlacionar los resultados estructurales, ópticos, magnéticos y morfológicos para establecer los mecanismos de interacción entre el PVA y las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, y proponer parámetros óptimos de síntesis para aplicaciones funcionales

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Alcohol polivinílico

El alcohol polivinílico es un polímero lineal semicristalino que, debido a su estructura química, posee propiedades únicas que lo convierten en un material de alto interés industrial. A diferencia de otros polímeros, el PVA no se sintetiza mediante la polimerización directa del alcohol vinílico, ya que esta especie química es altamente inestable y se tautomeriza rápidamente a acetaldehído. Por lo tanto, el método principal para obtener PVA es mediante la hidrólisis parcial o completa del acetato de polivinilo (PVAc), eliminando los grupos acetato presentes inicialmente [1].

Estructuralmente, el PVA presenta una cadena principal de enlaces carbono-carbono (C-C) con numerosos grupos hidroxilo laterales. La presencia y distribución de estos grupos hidroxilo le confieren características distintivas como la biodegradabilidad, alta hidrofobicidad inicial y una excelente capacidad para formar películas. No obstante, estos mismos grupos hidroxilo también determinan una significativa sensibilidad a la humedad, derivada de su naturaleza hidrofílica [2].

Las propiedades específicas del PVA están influenciadas principalmente por factores tales como el grado de hidrólisis, el peso molecular, la presencia de uniones head-to-head, contenido de agua residual, la presencia de aditivos, y en cierta medida, el método específico de síntesis empleado [3].

El grado de hidrólisis tiene una importancia crucial, determinando propiedades mecánicas, térmicas y de solubilidad. El PVAc inicial, hidrofóbico, se vuelve progresivamente más hidrofílico al aumentar el grado de hidrólisis debido al incremento en la proporción de grupos hidroxilo, lo cual incrementa su afinidad con el agua. Generalmente, el PVAc comienza a ser soluble en agua cuando el grado de hidrólisis alcanza alrededor del 80%, aunque esta solubilidad disminuye ligeramente a medida que aumenta el grado de polimerización [4][5].

Además, cuando el grado de hidrólisis supera aproximadamente el 90%, la solubilidad en agua del PVA disminuye gradualmente tras el secado. Por encima del 98% de hidrólisis, el polímero deja de ser soluble en agua a temperatura ambiente debido a la fuerte formación de enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares, lo cual incrementa su cristalinidad. De hecho, los tratamientos térmicos o el estiramiento mecánico también disminuyen notablemente su solubilidad en agua [6].

Existen tres grados principales de hidrólisis definidos por el porcentaje molar de grupos acetato residuales, los cuales son:

Completamente hidrolizado (98-99%): grupos acetato residuales 0.6-1.5%

Intermedio (91-97%): grupos acetato residuales 2.7-6.9%

Parcialmente hidrolizado (85-90%): grupos acetato residuales 10-15% [7].

El grado de cristalinidad del PVA también depende directamente del grado de hidrólisis. Un PVA parcialmente hidrolizado presenta aproximadamente un 23.4% de cristalinidad, mientras que uno completamente hidrolizado alcanza alrededor del 46.5% [8]. Esta alta cristalinidad es responsable de sus excelentes propiedades mecánicas en estado seco, así como de sus notables propiedades de barrera al oxígeno.

A pesar de estas ventajas, la elevada sensibilidad del PVA al agua y a la humedad limita significativamente su uso en aplicaciones que requieren condiciones húmedas o alta estabilidad frente al agua [9]. Por este motivo, diversos enfoques se han explorado para mejorar estas propiedades, incluyendo la preparación de

nanocompuestos con rellenos como arcilla y grafeno [9], mezclas polímero-polímero [10], y métodos sol-gel con agentes acoplantes de silano [11].

La presencia de grupos hidroxilo en las unidades repetitivas del polímero permite una amplia gama de modificaciones químicas, facilitando la creación de redes tridimensionales mediante la interacción con compuestos multifuncionales. Estas modificaciones mejoran considerablemente la estabilidad térmica, resistencia mecánica y resistencia al agua [12] [13].

Adicionalmente, técnicas como la ultrasonificación inducen cambios estructurales notables en las películas de PVA, incrementando la viscosidad, cristalinidad y compatibilidad estructural de las cadenas poliméricas, lo que mejora significativamente sus propiedades funcionales y aplicaciones prácticas [14][15][16].

El alcohol polivinílico se destaca como un polímero clave en múltiples aplicaciones industriales debido a su estructura versátil y modificable, propiedades físicas sobresalientes, bajo costo, biodegradabilidad y compatibilidad ambiental, especialmente en aplicaciones como películas de embalaje, adhesivos, emulsiones, aprestos textiles y recubrimientos para papel [17].

1.2 Puentes de Hidrógeno

Los puentes de hidrógeno juegan un papel importante en el grado de cristalinidad de los polímeros, ya que estos se generan intra e inter molecularmente. Las propiedades del PVA se mantienen relacionadas a los puentes de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares formados con sus propias moléculas o con otras.

Los puentes de hidrógeno son vitales para la estabilización de las estructuras secundarias y terciarias de los biosistemas, y también son capaces de dotar a los materiales poliméricos de una extraordinaria resistencia [18].

El alcohol polivinílico es un polímero rico en grupos hidroxilo (-OH) a lo largo de su cadena, lo que le permite formar abundantes enlaces de hidrógeno tanto dentro de una misma cadena (intramoleculares) como entre distintas cadenas (intermoleculares). Un enlace de hidrógeno ocurre cuando un átomo de hidrógeno unido a un átomo electronegativo (como el oxígeno del -OH) interactúa fuertemente con otro átomo electronegativo cercano (otro oxígeno de un -OH vecino, por ejemplo). En PVA sólido las moléculas se asocian mediante una extensa red de puentes de hidrógeno que actúan como reticulaciones físicas entre cadenas [19]. Este entramado de enlaces H confiere al PVA una estructura semicristalina: regiones ordenadas (cristalitas) estabilizadas por enlaces de hidrógeno, intercaladas con zonas amorfas más desordenadas.

En el PVA coexisten interacciones intramoleculares e interacciones intermoleculares, principalmente a través de enlaces de hidrógeno, y cada tipo afecta de forma distinta las propiedades:

Enlaces intramoleculares: Ocurren cuando grupos -OH dentro de una misma macromolécula forman puentes de hidrógeno entre sí. Dado que las unidades vinílicas con -OH están separadas por sólo dos átomos de carbono en la cadena (estructura 1,3-diol), es posible que un grupo -OH establezca un enlace H con otro -OH vecino en la misma cadena si la conformación lo permite. Como resultado, los puentes intramoleculares tienden a reducir la cohesión intermolecular y pueden facilitar la penetración de moléculas de agua u otras en la matriz. Estudios recientes muestran que los enlaces H intramoleculares pueden mejorar la solubilidad del PVA, al impedir en parte que las cadenas se asocien firmemente entre sí. Asimismo, a nivel de una sola molécula, la formación de estos enlaces internos influye en la conformación y rigidez de la cadena. Esto sugiere un efecto de refuerzo intrínseco: los puentes H internos pueden estabilizar ciertas conformaciones (menos flexibles) y así mejorar las propiedades mecánicas a nivel molecular del PVA [20].

Enlaces intermoleculares: Son las interacciones entre grupos -OH de *distintas* cadenas de PVA. Estas son las responsables directas de la formación de zonas cristalinas ordenadas donde varias cadenas se alinean en láminas o haces unidos

por puentes H. Los enlaces intermoleculares actúan como puntos de unión entre macromoléculas, creando una red tridimensional física. Una intensificación de los puentes H intermoleculares conduce a una mayor cristalinidad y a una estructura más rígida: las cadenas se ordenan de forma paralela y compacta, reduciendo el volumen libre. Por ejemplo, durante el envejecimiento o secado de un hidrogel de PVA, la pérdida de agua conlleva que las cadenas formen más enlaces H entre sí, incrementando la fase cristalina del material [21][22][23].

En general, los puentes de hidrógeno refuerzan mecánicamente a los polímeros. Al enlazar cadenas entre sí, distribuyen esfuerzos y evitan deslizamientos fáciles entre macromoléculas. Esto se traduce en mayores módulos (rigidez) y frecuentemente mayor resistencia a la tracción y dureza. Por ejemplo, en termoplásticos semicristalinos como POM o nylon, las regiones cristalinas cohesionadas por enlaces H- son responsables de su alta resistencia y tenacidad. Incluso en ausencia de cristalinidad, una red de puentes de -hidrógeno puede aumentar notablemente la resistencia tensil de un polímero, como se ha demostrado en hidrogeles de PVA [24].

El PVA es un polímero vinílico con grupos -OH en cada unidad monomérica, lo que le confiere una enorme capacidad de formar puentes de hidrógeno tanto intramoleculares como intermoleculares. En estado sólido, las cadenas de PVA establecen densas redes de puentes de hidrógeno -OH···O- entre sí, favoreciendo una estructura semi-cristalina. Por otro lado, en estado hidratado (hidrogeles de PVA), el agua puede ocupar sitios de puentes de hidrogeno y separa parcialmente las cadenas; aun así, los segmentos de cadena pueden formar microcristalitos unidos por puentes de hidrógeno que actúan como puntos de entrecruzamiento físico. Estudios han demostrado que al aumentar la cantidad de puentes de hidrógeno intercadena (por envejecimiento térmico o eliminación de agua), el PVA forma un arreglo molecular más ordenado y mejora sus propiedades mecánicas, como la resistencia tensil.

1.3 Hexaferrita de estroncio

Las hexaferritas tipo M constituyen una destacada categoría de materiales cerámicos magnéticos, reconocidos por su amplia gama de aplicaciones tecnológicas. Estos materiales se clasifican principalmente por ser imanes duros. Los imanes duros son generalmente compuestos de óxidos metálicos y presentan propiedades magnéticas ideales para ser utilizados como imanes permanentes [25][26][27].

Las propiedades magnéticas fundamentales de estos materiales están determinadas tanto por la estructura electrónica de sus átomos o iones magnéticos como por su estructura cristalina. Estos factores influyen notablemente en aspectos clave como la fuerza del acoplamiento magnético, la magnetización de saturación (M_s) y la anisotropía magnetocristalina (MCA). Particularmente, el valor de M_s depende directamente de la magnitud de los momentos magnéticos individuales y de la geometría espacial, específicamente la distancia y ángulo entre los átomos o iones magnéticos adyacentes. En cristales magnéticos anisotrópicos, los momentos magnéticos suelen alinearse a lo largo de direcciones cristalográficas preferenciales, denominadas ejes fáciles. En materiales con MCA uniaxial, existe únicamente una dirección preferida para la alineación magnética [28].

Entre las ferritas magnéticas permanentes, las hexaferritas tipo M han sido ampliamente estudiadas desde su descubrimiento en 1950. Estas poseen una fórmula química general del tipo $MFe_{12}O_{19}$ ($M = Ba, Sr, Pb$) [29][30][31]. Un ejemplo relevante es la hexaferrita de estroncio ($SrFe_{12}O_{19}$). Esta hexaferrita se caracteriza por una alta coercitividad y permeabilidad magnética, lo que se traduce en una gran dificultad para ser desmagnetizada y una fuerte magnetización. Además, la hexaferrita de estroncio se destaca por su elevada anisotropía magnetocristalina, estabilidad química, alta resistividad eléctrica, resistencia al calor, alta resistencia a la corrosión y un costo relativamente bajo comparado con materiales magnéticos que contienen tierras raras [31][32][33][34].

Estructuralmente, la hexaferrita de estroncio pertenece al tipo magnetoplumbita, compuesta por unidades estructurales más pequeñas: un bloque tipo espinela (S) y un bloque hexagonal (R) que contiene un cation de estroncio (Sr). En su celda unitaria se encuentran 24 cationes de hierro trivalente (Fe^{3+}) distribuidos en cinco sitios cristalográficos específicos: tres sitios octaédricos ($12k$, $2a$, $4f_2$), un sitio tetraédrico ($4f_1$) y un sitio bipiramidal trigonal ($2b$). Del total de 12 cationes Fe^{3+} , cuatro tienen sus espines orientados hacia abajo (2 en $4f_1$ y 2 en $4f_2$), mientras que los restantes ocho tienen espines hacia arriba (6 en $12k$, 1 en $2a$, 1 en $2b$). Las propiedades magnéticas de la hexaferrita de estroncio se originan principalmente por el orden ferrimagnético colineal y las interacciones de superintercambio entre los iones Fe^{3+} mediadas por oxígeno ($\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{3+}$) [35][36][37][38].

Una particularidad notable en las hexaferritas es que su momento magnético está fuertemente ligado a su eje cristalográfico c . Al aplicar un campo magnético externo, se puede controlar no solo la posición, sino también la orientación e incluso inducir la rotación coherente de las nanopartículas de hexaferrita [39]. Estas hexaferritas exhiben una anisotropía característica en su crecimiento cristalino, desarrollándose preferentemente en el plano basal (ab) con crecimiento limitado a lo largo del eje c . Esta combinación única de elevada MCA y morfología anisotrópica da como resultado que la magnetización no se alinee dentro del plano basal (efecto esperado por anisotropía de forma, la cual es mucho menor en magnitud), sino que se orienta perpendicularmente a este plano, siguiendo el eje cristalográfico C [40].

En sistemas formados por nanopartículas magnéticas (MNPs), las principales interacciones magnéticas involucradas son las interacciones dipolo-dipolo y las interacciones de intercambio. Las interacciones de intercambio prevalecen en nanopartículas extremadamente pequeñas (unos pocos nanómetros) y actúan a distancias cortas (≤ 2.5 nm), mientras que las interacciones dipolares predominan a mayores distancias y son responsables de la aglomeración de nanopartículas [41][42][43][44].

La hexaferrita de estroncio encuentra diversas aplicaciones tecnológicas, incluyendo medios de grabación magnética, dispositivos electrónicos,

telecomunicaciones y aplicaciones biomédicas, gracias a sus propiedades magnéticas y eléctricas [45][46][47][48][49].

1.4 Compuestos nanoestructurados de matriz polimérica

Con el desarrollo y la evolución tecnológica durante el último siglo, ha surgido una creciente necesidad de materiales avanzados capaces de satisfacer diversos requerimientos específicos. Desde la década de 1930, se inició un proceso histórico que sentó las bases para las composiciones actuales de materiales compuestos. Posteriormente, en la década de 1960, se consolidó el concepto de compuestos de matriz polimérica (PMC, por sus siglas en inglés), especialmente impulsado por la industria aeroespacial, buscando desarrollar materiales más resistentes a la corrosión y al daño por fatiga.

Un material compuesto se define como aquel que combina al menos dos materiales constituyentes o fases claramente diferenciadas, cuya unión genera propiedades superiores a las de cada componente por separado. Típicamente, estos compuestos constan de una matriz polimérica que proporciona soporte y una fase de refuerzo más rígida y resistente que mejora las propiedades globales del material. Las matrices poliméricas pueden ser polímeros termoplásticos o termoestables.

Los polímeros presentan numerosas ventajas, tales como facilidad en su procesamiento y moldeo, buena estabilidad termomecánica, alta resistencia dieléctrica y bajos costos de producción. Esto ha motivado que gran parte de la investigación reciente se haya orientado hacia la creación de nanocompuestos cerámico-poliméricos. Dichos materiales, gracias a su capacidad para adoptar formas complejas y ofrecer elasticidad y flexibilidad, son ideales para dispositivos adaptativos. Diversos estudios han demostrado que la incorporación de nanopartículas adecuadas permite mejorar significativamente las propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y ópticas de los polímeros [50][51].

Aunque los estudios realizados hasta ahora se han enfocado mayormente en aspectos mecánicos [52][53], se ha evidenciado que una distribución uniforme de nanopartículas magnéticas en la matriz polimérica tiene un notable impacto sobre propiedades como la conductividad, las características dieléctricas [52][54] y magnéticas [52][55][56], influenciadas por la fracción volumétrica efectiva de las nanopartículas.

Cuando las partículas incorporadas a la matriz polimérica tienen dimensiones nanométricas, el material compuesto resultante se denomina nanocompuesto polimérico. Uno de los principales desafíos en el diseño y fabricación de estos nanocompuestos es evitar la agregación o aglomeración de las nanopartículas, factor que puede deteriorar significativamente las propiedades funcionales del material.

La clasificación de los rellenos utilizados en nanocompuestos poliméricos generalmente se basa en su forma, pero también existen otras clasificaciones relacionadas con su función específica dentro de la matriz. Las interacciones atractivas en la interfaz matriz-relleno son fundamentales, ya que generan efectos de confinamiento que mejoran notablemente las propiedades finales del material compuesto; un ejemplo destacado son los puentes de hidrógeno [57].

Las nanopartículas magnéticas anisotrópicas (AMNPs) pueden emplearse como entidades individuales dispersas en matrices poliméricas; no obstante, sus aplicaciones pueden ampliarse significativamente más allá del magnetismo puro. Esto se logra mediante una funcionalización específica de su superficie o hibridación con otras entidades funcionales, permitiendo aplicaciones en campos como la biomedicina [58][59] y el blindaje electromagnético [60][61].

1.5 Films *Spin Coating*

El *spin coating* (recubrimiento por giro) es una técnica ampliamente utilizada para depositar películas delgadas uniformes de materiales (típicamente orgánicos o

poliméricos) sobre sustratos planos [62][63]. Consiste en aplicar una pequeña cantidad de solución (el polímero disuelto en un solvente, a modo de “tinta”) sobre el sustrato y hacerlo girar a alta velocidad, de modo que la solución se distribuya uniformemente por efecto centrífugo mientras el solvente evapora, dejando una capa sólida homogénea [63]. Este proceso permite obtener películas de grosor controlado desde unos pocos nanómetros hasta algunas micras, de forma rápida y reproducible [64].

El proceso de *spin coating* se divide típicamente en cuatro etapas principales:

- (1) *Depósito* de la solución sobre el sustrato (usualmente mediante pipeteo en el centro)
- (2) *Spin-up* o aceleración inicial, donde el sustrato comienza a girar y la solución empieza a extenderse radialmente
- (3) *Spin-off*, en la cual el sustrato gira a velocidad constante expulsando el exceso de líquido fuera de los bordes y adelgazando la película, y
- (4) *Evaporación* del solvente mientras la película sigue girando.

Durante la aceleración, la solución inicialmente puede girar a distinta velocidad que el sustrato, pero luego la fricción viscosa hace que el líquido y el sustrato alcancen la misma tasa de rotación, logrando una capa líquida más nivelada [63]. En la fase de giro a velocidad constante, las fuerzas centrífugas expulsan el exceso de solución hacia los bordes mientras la viscosidad del líquido y la tensión superficial contribuyen a *estirar* y uniformar la capa restante. Simultáneamente, el flujo de aire sobre la superficie (generado por el propio giro) acelera la evaporación del solvente, solidificando progresivamente la película. El resultado es una película delgada sólida, cuya uniformidad y espesor dependen de varios parámetros del proceso.

En *spin coating*, el adelgazamiento de la película líquida se rige por un balance de fuerzas. La fuerza centrífuga (proporcional a la velocidad de rotación y que empuja el líquido radialmente hacia afuera) compite con la fuerza viscosa interna del líquido (que resiste el flujo) y con la tensión superficial (que tiende a mantener uniforme la superficie del líquido). En las primeras etapas domina la expulsión centrífuga del líquido, mientras que en etapas finales, cuando la capa es muy delgada, las fuerzas

viscosas y la tensión superficial contribuyen a estabilizar y homogeneizar la película. Además, la evaporación del solvente introduce gradientes de concentración y viscosidad en la película: a medida que se evapora solvente, la solución se vuelve más viscosa, frenando el flujo y *congelando* la estructura de la película [65][66].

1.6 Técnicas de caracterización

1.6.1 Difracción de Rayos X

Difracción de rayos X es una técnica de caracterización estructural basada en la interferencia constructiva de rayos X al interactuar con un sólido cristalino. Cuando un haz colimado de rayos X monocromáticos incide sobre un cristal, los planos atómicos del cristal actúan como redes de difracción que dispersan la radiación. Los máximos de difracción ocurren cuando las ondas dispersadas por planos cristalinos adyacentes están en fase, satisfaciendo la condición de Bragg, ecuación 1.

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (1)$$

Donde d es la distancia interplanar, θ es el ángulo de incidencia (y difracción) y λ es la longitud de onda de los rayos X (n es un entero, orden de la reflexión). Esta es la ley de Bragg, fundamento de la DRX, y permite calcular espaciamientos interplanares a partir de posiciones angulares de picos de difracción [67][68]. En otras palabras, la difracción ocurre a ángulos específicos 2θ determinados por las distancias interplanares del cristal, generando un patrón de difracción característico de la estructura cristalina de la muestra.

Cada sustancia cristalina produce un patrón único de picos de difracción. Las posiciones de los picos dependen de la geometría reticular (tamaño y simetría de la celda unitaria) y de la longitud de onda utilizada, mientras que las intensidades dependen de la naturaleza y disposición de los átomos en la celda (factores de estructura) [69]. Por ello, no existen dos compuestos con idéntico patrón de DRX, lo

que permite identificar fases cristalinas comparando el difractograma experimental con bases de datos de patrones de referencia. Mediante esta comparación se pueden determinar qué fases cristalinas están presentes en una muestra desconocida y en qué proporción aproximada. Adicionalmente, de un patrón de difracción pueden deducirse parámetros de red (por ej., constantes de celda) y detectar si una muestra es monofásica o contiene mezcla de fases sólidas [68].

Un aspecto importante es que DRX distingue materiales cristalinos de materiales amorfos. Los materiales cristalinos producen picos nítidos a ángulos definidos, mientras que las sustancias amorfas o desordenadas *no poseen orden periódico de largo alcance* y por tanto no producen picos, sino un fondo de dispersión difusa. En DRX de polvos, un material amorfo se manifiesta típicamente como una banda ancha y débil (“halo amorfo”) en lugar de picos definidos. En cambio, si la muestra es cristalina, aun cuando sea policristalina con microcristalitos orientados aleatoriamente, se obtendrá un difractograma con picos cuya posición e intensidad revelan la estructura cristalina [70][71].

Además de identificar la estructura/fase cristalina, la técnica de difracción de rayos X permite cuantificar características microestructurales. Un ejemplo clave es la determinación del tamaño de cristalito promedio en materiales policristalinos. Para ello se emplea la ecuación de Scherrer, una relación empírica que vincula el anchamiento de un pico de difracción con el tamaño de los dominios coherentes de difracción llamados cristalitos, en la dirección perpendicular al plano difractante.

Al aplicar DRX al estudio de nanopartículas cristalinas, surgen particularidades debidas a las dimensiones nanométricas de los cristalitos y a los efectos de superficie asociados. Un fenómeno clave es el ensanchamiento de las líneas de difracción (picos) provocado por el tamaño de cristalito finito. En un cristal idealmente infinito, los picos de difracción serían extremadamente agudos. Sin embargo, en nanocristales, el número limitado de planos reticulares que contribuyen a la difracción provoca picos más anchos y de menor intensidad [72]. De hecho, a menor tamaño de cristalito, mayor anchura de los picos en el difractograma. Esto se debe a que la *coherencia cristalina* está limitada: cuantos menos planos

periódicos contribuyen, más difusa (menos definida) es la condición de interferencia constructiva [68]. En otras palabras, la alta densidad de bordes/cristalitos pequeños introduce incertidumbre en las posiciones reticulares, dando lugar a reflexiones difusas.

1.6.2 Método de Refinamiento Rietveld

El método de refinamiento Rietveld es una técnica de análisis estructural ampliamente utilizada en cristalografía de polvos. Desarrollada por Hugo Rietveld a finales de la década de 1960, revolucionó la forma de interpretar los patrones de difracción de materiales policristalinos al introducir el ajuste de todo el perfil de difracción, en lugar de considerar picos individuales [73][74]. A diferencia de métodos anteriores, el refinamiento Rietveld emplea un ajuste iterativo por mínimos cuadrados no lineales para hacer coincidir punto a punto el difractograma experimental con el calculado a partir de un modelo estructural propuesto [75]. Esta innovación permitió por primera vez lidiar de forma confiable con reflexiones Bragg fuertemente superpuestas en muestras policristalinas [73][74], lo que supuso un avance significativo en el análisis por difracción de polvos.

El refinamiento Rietveld se basa en el principio de ajustar matemáticamente el patrón de difracción completo calculado a partir de un modelo cristalográfico, hasta lograr la mejor concordancia con el patrón experimental registrado [73]. En esencia, el método minimiza la diferencia entre intensidades observadas y calculadas utilizando un algoritmo de mínimos cuadrados no lineales, refinando iterativamente los parámetros del modelo. Esto incluye parámetros de la estructura cristalina (constantes de red, posiciones atómicas, factores de ocupación, factores térmicos, etc.) junto con parámetros instrumentales y de la muestra (fondo difuso, función de forma de pico, anisotropía de ensanchamiento, orientación preferencial, desplazamiento de cero, entre otros) [76][77][78]. Mediante este ajuste punto a punto del difractograma, el método consigue reproducir la forma e intensidades de

todos los picos de Bragg simultáneamente, en lugar de analizar cada pico por separado.

Mediante refinamiento Rietveld, es posible refinar estructuras cristalinas completas: validar y ajustar modelos estructurales propuestos, o incluso determinar estructuras nuevas cuando se combina con técnicas complementarias. Se pueden identificar y cuantificar fases presentes en una mezcla policristalina con gran exactitud, algo crucial en campos como la mineralogía, ciencia del cemento, metalurgia de polvos y farmacología (polimorfos cristalinos). De hecho, uno de los usos destacados del método es el análisis cuantitativo de fases en muestras con varias fases cristalinas: el Rietveld calcula las fracciones en peso de cada fase con base en sus patrones cristalográficos, llegando a precisiones mejores al 1 % en condiciones ideales [79][80]. Por ejemplo, se ha aplicado exitosamente en cuantificar fases de SiC con diferentes politipos, problema que de otro modo sería intratable por el fuerte solapamiento de picos [81].

Otra contribución importante es en la caracterización microestructural: a partir del perfil de difracción refinado, se pueden obtener parámetros como el tamaño medio de cristalitas y la microdeformación de la red cristalina (mediante el análisis del ensanchamiento de picos). El refinamiento Rietveld típicamente modela este ensanchamiento usando términos de tamaño y microstrain según la aproximación de Williamson-Hall o modelos más avanzados, permitiendo cuantificar que tan nanocristalino es un material, o cuánta tensión reticular existe debido a dislocaciones o defectos. Además, el método puede refinar parámetros de textura cristalográfica (orientación preferencial de los granos) en muestras policristalinas, mediante funciones que reproducen la variación de intensidades relativa a dicha orientación. Esto es de gran relevancia en materiales procesados con orientación (por ejemplo, cerámicas sinterizadas, películas delgadas, metales laminados, etc.), ya que la textura influye en propiedades físicas y el Rietveld permite cuantificarla para correlacionarla con dichas propiedades.

1.6.3 Espectroscopia infrarroja

Espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica de análisis basada en la interacción de la radiación infrarroja con la materia, provocando transiciones vibracionales en las moléculas. En el espectro electromagnético, el infrarrojo abarca aproximadamente desde el borde rojo del visible (≈ 780 nm) hasta longitudes de onda del orden de 1 mm, situándose entre la región del visible y las microondas. La absorción de fotones infrarrojos por una molécula puede excitar los modos vibracionales de sus enlaces, siempre que la frecuencia del fotón coincida con la frecuencia vibracional y que la vibración implique un cambio en el momento dipolar de la molécula. Es decir, solo las vibraciones que alteran el dipolo molecular son “activas” en IR, lo cual constituye la regla de selección fundamental de esta técnica [82].

Cada tipo de enlace químico y entorno funcional presenta frecuencias de vibración características. Existen dos categorías principales de vibraciones moleculares: estiramientos y flexiones. En una vibración de estiramiento cambia la distancia entre átomos a lo largo del enlace (pudiendo ser estiramiento simétrico o asimétrico), mientras que en una vibración de flexión varía el ángulo entre enlaces (incluyendo submodos como flexión angular plana tipo tijera, balanceo, y fuera de plano como alabeo o torsión). Por ejemplo, los enlaces simples vibran a menor frecuencia (energía) que los dobles o triples, y los enlaces con átomos más pesados vibran más lentamente que aquellos con átomos ligeros. Estas consideraciones determinan las posiciones de banda en un espectro IR. En general, las vibraciones de estiramiento X–H (X = C, O, N) aparecen en la región de alta frecuencia (≈ 4000 – 2500 cm^{-1}), las vibraciones múltiples de enlaces dobles (C=C, C=O) en 2000 – 1500 cm^{-1} , las flexiones y estiramientos simples C–C, C–O en la región 1500 – 500 cm^{-1} , etc. Cada grupo funcional produce un “patrón” de absorciones reconocible, lo que permite identificar grupos funcionales presentes en una muestra mediante su espectro IR [83][84][85].

Existen distintas modalidades instrumentales para obtener espectros IR, aunque comparten el mismo principio vibracional. En la actualidad, la técnica predominante

es la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que utiliza un interferómetro de Michelson para medir simultáneamente todas las frecuencias y luego aplicar una transformada de Fourier a la señal interferente para obtener el espectro en función del número de onda. FTIR ofrece varias ventajas sobre los instrumentos dispersivos tradicionales:

- (1) Mayor relación señal/ruido por la colección simultánea de datos de todo el rango espectral (ventaja de multiplexado de Fellgett)
- (2) Mayor rendimiento luminoso al no requerir rendijas estrechas (ventaja de Jacquinot), lo que mejora la sensibilidad, y
- (3) Mejor calibración de frecuencia al usar un láser interno como referencia metrológica. Estas cualidades hacen que FTIR sea muy adecuado para detectar bandas débiles o muestras pequeñas, con alta resolución y rapidez en la adquisición [82].

Existen diversos métodos de muestreo en espectroscopía IR. Uno de los más difundidos para sólidos y películas es la espectroscopía IR por reflectancia total atenuada (ATR) acoplada a FTIR. En ATR-FTIR, la muestra se pone en contacto con un cristal de alto índice de refracción (ej. diamante, ZnSe o germanio) y la luz IR penetra evanescentemente unos pocos micrómetros en la muestra. Este método presenta *ventajas prácticas*: no requiere preparar pastillas de KBr ni películas autoportantes, permite medir directamente muestras opacas o gruesas, y es rápido y reproducible. La ATR proporciona espectros equivalentes a transmisión (con pequeñas diferencias en intensidad relativa) y es particularmente útil en análisis de polímeros, recubrimientos y materiales compuestos, ya que muchas veces se dispone de ellos en forma de película o sólido irregular. Otras variantes incluyen la espectroscopía IR de reflectancia difusa (DRIFTS) para polvos y superficies rugosas, y la microscopía FTIR para análisis espacialmente resuelto de muestras heterogéneas [86][87][88].

1.6.4 Espectroscopia de Fluorescencia

La fluorescencia se define como la propiedad de ciertas sustancias de absorber luz a una longitud de onda específica y posteriormente reemitirla a una longitud de onda más larga. Esta reemisión ocurre cuando los electrones excitados por la absorción de fotones regresan a su estado fundamental. La espectroscopia de fluorescencia ha evolucionado hasta convertirse en una técnica analítica angular, indispensable en una miríada de disciplinas científicas [89][90].

La interacción de la luz con la materia fluorescente da lugar a una serie de parámetros fotofísicos observables que son intrínsecos a la molécula y a su entorno. Estos parámetros, como el desplazamiento de Stokes, el rendimiento cuántico, la vida media de fluorescencia y la anisotropía, proporcionan información invaluable sobre la estructura electrónica, la dinámica del estado excitado y las interacciones moleculares.

La medición precisa y sensible de la fluorescencia requiere instrumentación especializada, conocida como espectrofluorómetros o fluorímetros. Estos instrumentos están diseñados para controlar la excitación de la muestra y detectar la luz emitida, permitiendo la caracterización de los parámetros fotofísicos discutidos anteriormente.

Un espectrofluorómetro típico consta de varios componentes esenciales que trabajan en conjunto para medir la fluorescencia.¹ La configuración más común implica una trayectoria óptica donde la luz de excitación incide sobre la muestra y la emisión se detecta en un ángulo de 90° con respecto a la trayectoria de excitación. Esta geometría ortogonal ayuda a minimizar la detección de la luz de excitación dispersada [89][91][92].

La fuente de luz proporciona la energía necesaria para excitar los fluoróforos en la muestra. Las características deseables incluyen alta intensidad, estabilidad y una

amplia cobertura espectral o la capacidad de emitir a longitudes de onda específicas.

Los monocromadores son dispositivos ópticos que seleccionan una banda estrecha de longitudes de onda de una fuente de luz más amplia (monocromador de excitación) o dispersan la luz emitida por la muestra para el análisis espectral (monocromador de emisión).

El detector convierte la señal de fluorescencia óptica en una señal eléctrica medible. La elección del detector es crítica y depende de la sensibilidad requerida, la respuesta temporal y el tipo de medición.

Además de los monocromadores, se utilizan varios tipos de filtros ópticos para refinar aún más la selección de longitudes de onda, eliminar la luz parásita o separar la luz de excitación de la emisión. Estos incluyen filtros de paso de banda (transmiten un rango específico de longitudes de onda), filtros de paso largo (transmiten longitudes de onda más largas que una de corte) y filtros de paso corto (transmiten longitudes de onda más cortas que una de corte). Los espejos dicróicos son filtros especializados que reflejan selectivamente ciertas longitudes de onda mientras transmiten otras, y son componentes cruciales en los microscopios de epifluorescencia.

La espectroscopia de fluorescencia abarca una variedad de técnicas que se pueden clasificar ampliamente en mediciones de estado estacionario y resueltas en el tiempo. Cada enfoque proporciona diferentes tipos de información sobre el fluoróforo y su entorno. Por otro lado, en la espectroscopia de fluorescencia de estado estacionario, la muestra se ilumina continuamente (o con una fuente pulsada de alta frecuencia de repetición tal que la respuesta del detector promedia la emisión en el tiempo), y se mide la intensidad de fluorescencia promedio en el tiempo en función de la longitud de onda. Esta es la forma más común de espectroscopia de fluorescencia y proporciona información valiosa sobre la identidad, concentración y entorno de los fluoróforos [93][94][95][96] [97][98] [99][100][101].

1.6.5 Microscopía Electrónica de Barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscopy*) es una técnica de visualización y análisis de materiales que utiliza un haz focalizado de electrones para escanear la superficie de una muestra y producir imágenes de alta resolución. El SEM emplea electrones acelerados con longitudes de onda mucho menores, lo que le permite superar el límite de resolución de la luz y revelar detalles a escala nanométrica [102]. Aquí, el haz de electrones interactúa con los átomos de la muestra y genera diversas señales (electrones secundarios, retrodispersados, rayos X, etc.), las cuales son detectadas y transformadas en imágenes o espectros composicionales. Gracias a este principio, el SEM es capaz de producir imágenes con gran aumento (hasta del orden de 10^5 veces o más) y con profundidades de campo extensas, proporcionando vistas pseudotrídimensionales de la topografía superficial [103].

El principio de operación del SEM se basa en las interacciones entre un haz de electrones acelerados y la materia. Al incidir sobre la muestra, los electrones (generalmente con energías de 1–30 keV en un SEM convencional) se propagan con una corta longitud de onda de Broglie (por ejemplo, $\sim 0,03$ nm a 2 keV) muy inferior a la de la luz visible. Esta pequeña longitud de onda potencialmente permite una resolución espacial extremadamente alta, del orden del nanómetro o incluso subnanométrica en SEM modernos con emisión de campo (FEG). En la práctica, la resolución del SEM está limitada no por difracción (como en óptica), sino por la capacidad de enfocar el haz en un punto muy pequeño. El diámetro de la sonda electrónica viene determinado por la *fente de electrones* y la calidad de las *lentes electromagnéticas* que lo concentran. Imperfecciones ópticas como las aberraciones esférica y cromática de las lentes, así como la difracción en la apertura final, imponen un límite inferior al tamaño del punto de electrones sobre la muestra [102][104][105].

Cuando el haz de electrones incide en la muestra, interactúa con los átomos del material en una región en forma de lágrima conocida como volumen de interacción [106]. Los electrones del haz sufren múltiples procesos de dispersión al penetrar en la superficie: pueden ser dispersados elásticamente (colisiones de ángulo alto o “retrodispersión”) o inelásticamente (perdiendo energía dentro del material). Como resultado, se generan varias señales que constituyen la base de las distintas modalidades de imagen y análisis en SEM. En la parte superior de la región interactuada (cercana a la superficie), las colisiones inelásticas expulsan electrones secundarios de baja energía (decenas de eV), provenientes de las capas atómicas externas de la muestra [107]. Simultáneamente, algunas colisiones elásticas desvían electrones del haz original de regreso fuera de la muestra sin absorber demasiada energía; estos son los *electrones retrodispersados* (backscattered) de mayor energía. Además, si un electrón del haz es capaz de ionizar un átomo del sólido (expulsando un electrón interno de capa K, L, etc.), la relajación de ese átomo produce emisión de fotones de rayos X característicos de la composición elemental del material. Incluso pueden emitirse electrones Auger a partir de átomos excitados, aunque estos son de muy baja energía y solo provienen de la capa superficial más externa [107][108].

1.6.6 Microscopía de Fuerza Atómica

La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM, por sus siglas en inglés Atomic Force Microscopy) es una técnica de microscopía de sonda de barrido de ultra-alta resolución que permite estudiar superficies a escala nanométrica e incluso atómica. Fue introducida en 1986 por Gerd Binnig, Calvin Quate y Christoph Gerber, quienes demostraron por primera vez su capacidad de obtener imágenes de resolución atómica de diversas superficies [109].

AFM funciona detectando las fuerzas de interacción entre una punta nanoscópica y la superficie de la muestra conforme la punta explora la topografía punto por punto. La punta está afilada (radio de curvatura típicamente decenas de nanómetros o

menor) y se encuentra montada en el extremo libre de una pequeña palanca elástica. Esta palanca actúa como un resorte y obedece la ley de Hooke [110]. A medida que la punta se aproxima a la superficie, entran en juego diversas fuerzas físicas que determinan la deflexión de la palanca y, por tanto, la respuesta del AFM. Las más importantes son:

- Fuerzas de Van der Waals, de naturaleza atractiva a largas distancias
- Fuerzas electrostáticas o coulombianas, que incluyen la repulsión de corto alcance debida al solapamiento de las nubes electrónicas (principio de repulsión de Pauli) y posibles atracciones/repulsiones si existen cargas netas o polarización
- Fuerzas capilares o adhesivas, relevantes en condiciones ambientales debido a la capa de humedad: al acercarse la punta en aire, se forma un menisco de líquido que puede generar una atracción capilar significativa; además de
- Interacciones magnéticas (si la punta o muestra son magnéticas) u otras interacciones específicas de la superficie. A distancias grandes (varios nanómetros), suele predominar la atracción de Van der Waals debido a dipolos fluctuantes, la cual puede sentirse hasta ~ 10 nm o más de separación [111].

Un sistema AFM consta de diversos componentes integrados que permiten la detección precisa de las interacciones punta-muestra, el escaneo controlado de la superficie y el aislamiento de perturbaciones externas:

Palanca elástica (cantilever) y punta: La pieza central del AFM es una viga en voladizo diminuta (de silicio, nitruro de silicio u otro material elástico) que hace las veces de *resorte* y de soporte para la punta afilada. La palanca (cantilever) suele tener longitudes de 100–200 μm y constante elástica seleccionada según la aplicación (cantilevers blandos para detectar fuerzas débiles, cantilevers rígidos para alta resonancia o muestras duras). En el extremo libre de la palanca va integrada la punta nanoscópica (tip), con radio de curvatura típico de 5–50 nm (aunque puede ser aún menor en puntas especiales), Esta punta es la “sonda” que

interactúa directamente con la muestra: al recorrer la superficie, la punta toca o siente las irregularidades y produce una deflexión en la palanca proporcional a la fuerza local. La punta suele estar fabricada del mismo material que la palanca y muchas veces recubierta con capas metálicas finas (ej. oro) para mejorar la reflectividad o propiedades específicas [112][110].

Sistema de detección de deflexión: Para convertir el pequeño desplazamiento de la palanca en una señal eléctrica medible, el AFM emplea típicamente un método óptico conocido como detector de haz láser y fotodiodo (*optical lever*). En este arreglo, un láser de baja potencia (generalmente un láser rojo o infrarrojo) enfoca un haz sobre la parte posterior reflectante de la palanca, y el reflejo se dirige hacia un fotodiodo segmentado. A medida que la palanca se flexiona hacia arriba o abajo por las fuerzas de la superficie, cambia el ángulo del haz reflejado y consecuentemente la posición del punto láser sobre el fotodetector. El fotodiodo, típicamente dividido en cuadrantes o en dos mitades (arriba/abajo), convierte este cambio de posición en una señal eléctrica proporcional a la deflexión de la palanca. Esta señal de deflexión es el parámetro fundamental en modos de contacto, y se utiliza como entrada para el sistema de control (*setpoint* de fuerza). La sensibilidad del detector óptico suele permitir resolver deflexiones del orden de menos de un nanómetro, gracias a la amplificación geométrica del brazo óptico (una pequeña rotación de la palanca se convierte en un desplazamiento mayor sobre el fotodiodo).

Actuadores piezoeléctricos y sistema de escaneo: Para lograr el movimiento controlado necesario entre la punta y la muestra, el AFM emplea actuadores piezoeléctricos capaces de desplazamientos precisos a nivel nanométrico. Usualmente, el montaje consiste en un *escáner piezoeléctrico* de tres ejes (x, y, z) que posiciona la muestra bajo la punta (o viceversa, en algunos diseños se mueve la punta sobre la muestra). Estos actuadores aprovechan la deformación de materiales piezoeléctricos (cerámicas tipo PZT) al aplicar voltajes: un tubo o conjunto de pilares piezoeléctricos expande/contrae del orden de 0.1–1 nm por volt aplicados, permitiendo desplazamientos totales típicos de decenas de micrómetros con resolución subnanométrica. En la configuración clásica, la muestra va montada

en una platina unida al escáner piezoeléctrico, el cual rasteriza la muestra en el plano x - y bajo la punta y ajusta la posición z según las necesidades de feedback.

Control electrónico y retroalimentación: El corazón del funcionamiento del AFM es un bucle de control retroalimentado (feedback) que mantiene constante la interacción punta-muestra mientras la punta explora la superficie. Este sistema de control, típicamente implementado por electrónica analógica o digital (controladores PID), toma como entrada la señal del detector (por ejemplo, la deflexión de la palanca en modo contacto, o la amplitud/frecuencia en modos dinámicos) y compara dicho valor con un valor deseado (*setpoint*). La diferencia (error) se usa para ajustar instantáneamente la posición relativa punta-muestra en z a través del piezo, de forma que se restaure el valor deseado de deflexión o amplitud.

Aislamiento vibracional y control del entorno: Dada la extrema sensibilidad del AFM, es crucial minimizar las perturbaciones externas. Vibraciones mecánicas del entorno y ruido acústico (sonido ambiente, voces, etc.) pueden acoplarse al microscopio y producir oscilaciones indeseadas en la señal, generando artefactos periódicos en la imagen.

Una de las principales ventajas de la Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) radica en la diversidad de modos de operación que ofrece, los cuales pueden adaptarse tanto al tipo de muestra como a la información que se desea obtener. Estos modos se dividen principalmente en modos estáticos (o de contacto) y modos dinámicos (no-contacto e intermitente), dependiendo de si la punta mantiene un contacto continuo con la muestra o si oscila cerca de la superficie sin llegar a tocarla directamente.

En el modo de contacto, la punta permanece en contacto físico constante con la superficie mientras se realiza el escaneo. Este es un modo estático, ya que la deflexión de la palanca se mide como un indicador directo de la fuerza de interacción entre la punta y la muestra. Operativamente, el AFM utiliza la señal de deflexión, o la fuerza normal calculada, como entrada para el sistema de retroalimentación, con el fin de mantener constante dicha deflexión durante el escaneo. Alternativamente,

en el modo de altura constante, se registra la deflexión variable para mapear la topografía de la muestra.

En el modo de no-contacto, la punta no llega a tocar la superficie durante el escaneo; en su lugar, oscila a una distancia de unos pocos nanómetros de la muestra. Para medir la topografía, este modo detecta las interacciones atractivas de largo alcance, principalmente las fuerzas de Van der Waals, presentes en el régimen de no-contacto. Este modo es dinámico en su esencia, ya que la palanca es excitada para vibrar cerca de su frecuencia de resonancia natural, mediante un piezo oscilador montado en el soporte de la palanca o mediante excitación magnética o acústica.

Por último, el modo tapping (también conocido como modo semi-contacto o AC mode) combina características de los anteriores. En este modo dinámico, la punta oscila cerca de la superficie con una amplitud relativamente grande, de manera que toca brevemente la superficie en cada oscilación. Durante cada ciclo de vibración, la punta alterna entre un régimen de no-contacto (atractivo) y un régimen de contacto momentáneo (repulsivo) con la muestra. Este enfoque permite aprovechar las ventajas del contacto, como una interacción fuerte y una buena señal, minimizando simultáneamente el tiempo de contacto para reducir la fricción y el daño a la muestra.

1.6.7 Magnetometría de muestra vibrante

El magnetómetro de muestra vibrante (VSM, por sus siglas en inglés) es un instrumento de laboratorio diseñado para medir el momento magnético (o magnetización) de una muestra en presencia de un campo magnético estático. Fue desarrollado originalmente por Simon Foner a mediados de la década de 1950 (reportado en 1959), basándose en la ley de inducción de Faraday. En esencia, el principio de operación es el siguiente: la muestra se coloca dentro de un campo magnético constante suficientemente intenso para magnetizarla; luego, se hace

vibrar mecánicamente la muestra cerca de un conjunto de bobinas detectoras fijas, de modo que el movimiento relativo entre la muestra magnetizada y las bobinas genera un flujo magnético variable en estas últimas. De acuerdo con la ley de Faraday, ese flujo magnético variable induce una fuerza electromotriz (f.e.m.) o voltaje en las bobinas, cuya amplitud es proporcional al momento magnético de la muestra. En otras palabras, la vibración convierte la magnetización estática de la muestra en una señal de corriente alterna mensurable [113].

Un esquema simplificado de la operación es el siguiente: la muestra, al vibrar sinusoidalmente en presencia del campo magnético uniforme del electroimán, produce un dipolo magnético oscilante que induce una corriente alterna en las bobinas detectoras; esta señal a la frecuencia de vibración es aislada y amplificada mediante detección sincrónica, y finalmente convertida en una medida de magnetización por el sistema electrónico de control. El resultado típico que proporciona un VSM es la curva de magnetización en función del campo de la muestra, también conocida como lazo de histéresis magnética cuando el material es ferro- o ferrimagnético. A partir de dicha curva, se deducen propiedades magnéticas clave como la magnetización de saturación, la coercitividad (campo requerido para anular la magnetización remanente) y la remanencia (magnetización retenida al remover el campo) [113][114].

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado, se abordará detalladamente la elaboración de compuestos de PVA mediante la técnica de *spin coating*, enfatizando en la metodología utilizada para lograr una adecuada dispersión de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) en la matriz polimérica del alcohol polivinílico (PVA). Asimismo, se presentarán las características y especificaciones técnicas de los equipos empleados para la caracterización estructural, morfológica, magnética, óptica y topográfica de los compuestos PVA/ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$.

2.1 Síntesis de nanopartículas de hexaferrita de estroncio

Las partículas utilizadas en el presente trabajo fueron obtenidas mediante el método Pechini. Aunque la síntesis no se realizó dentro del marco de este proyecto, sí se llevó a cabo la caracterización correspondiente de las nanopartículas. A continuación, se presenta un diagrama general de la **Figura 1** que ilustra el proceso de síntesis empleado para la obtención de dichas nanopartículas.

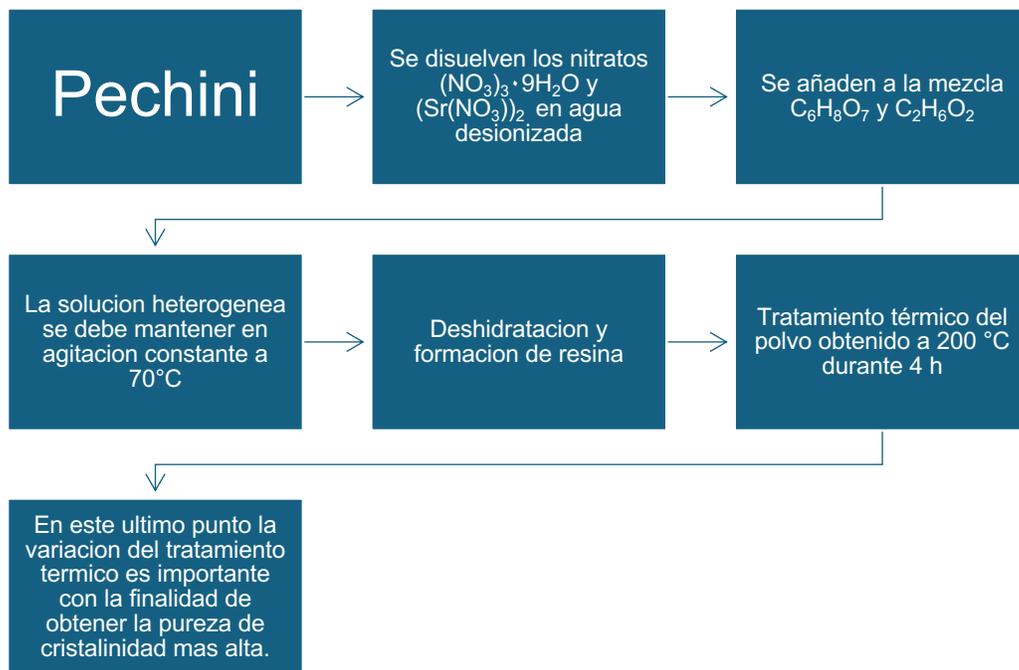


Figura 1. Esquematación general del método Pechini para la fabricación nanopartículas de hexaferrita de estroncio.

2.2 Preparación de alcohol polivinílico para la elaboración de películas

Para la obtención de alcohol polivinílico para ser usado como matriz y apto para la elaboración de películas poliméricas se usaron 10 g de PVA (Sigma Aldrich, PM 89000-98000), estos fueron adicionados a 100 mL de agua desionizada. Para diluir el PVA en el agua desionizada la mezcla se tuvo a 60 °C y en agitación constante durante 24 h, como se muestra en la **Figura 2**. Posteriormente, en la **Figura 3**, se sónico la mezcla durante 2h hasta obtener una mezcla homogénea, y transparente.

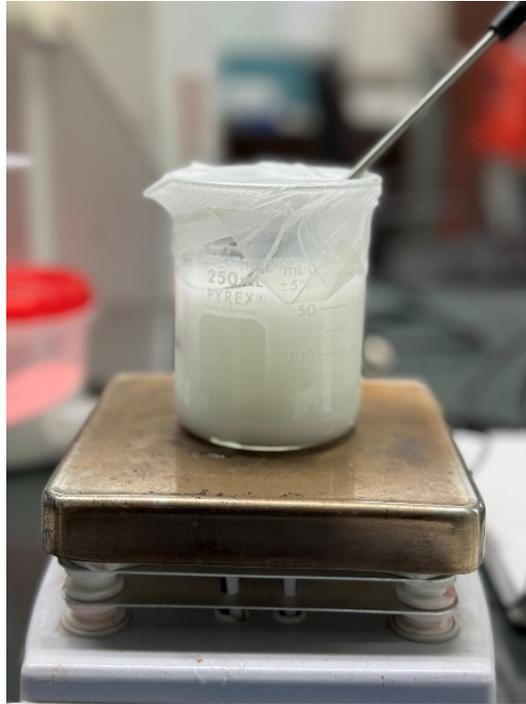


Figura 2. PVA diluido en agua desionizada en agitación constante a 60 °C.

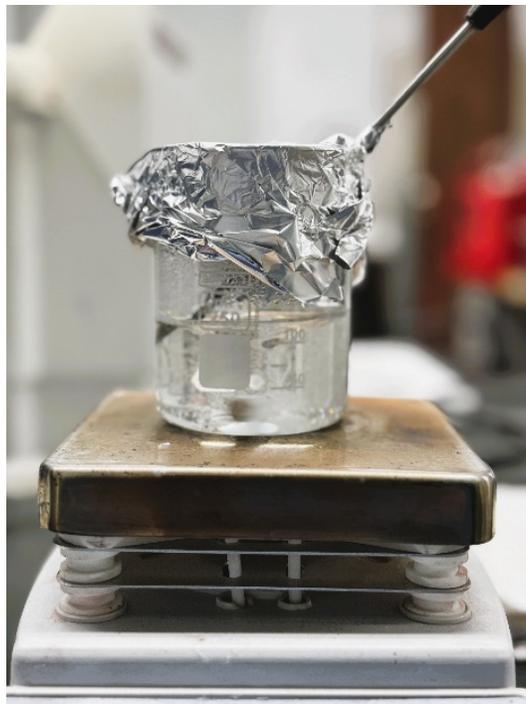


Figura 3. PVA posterior a la sonicación, transparente y con apariencia cristalina.

2.3 Elaboración de películas del compuesto PVA/SrFe₁₂O₁₉

Para la elaboración de las películas compuestas de alcohol polivinílico con hexaferrita de estroncio (PVA/SrFe₁₂O₁₉), se emplearon diferentes condiciones experimentales, siendo la primera variable considerada el porcentaje en peso de las nanopartículas de SrFe₁₂O₁₉. Se prepararon composiciones con 0.25, 1.0, y 10 % en peso (wt%) de nanopartículas (**Figura 4**). Cada una de estas mezclas fue sometida a un proceso de sonicación a 40 kHz y 80 °C, lo cual permitió obtener dispersiones homogéneas con adecuada distribución de las nanopartículas dentro de la matriz polimérica y se evitó su aglomeración. Además, este tratamiento contribuyó a la reducción del tamaño de las nanopartículas.

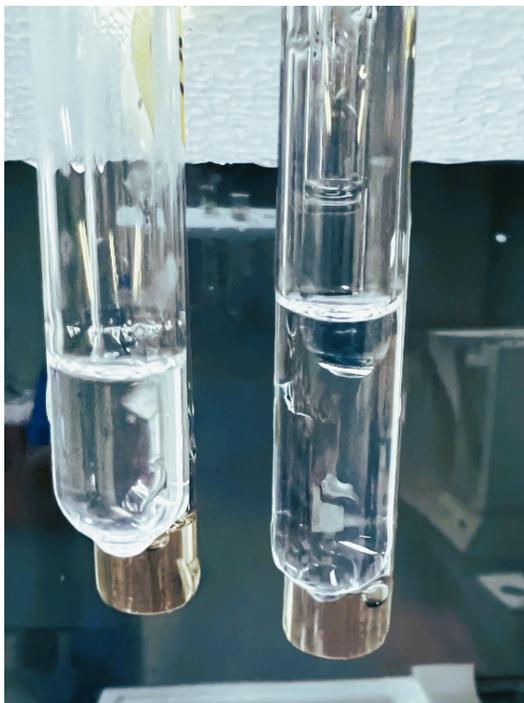


Figura 4. Se muestran los tubos de ensayo con PVA puro y con las composiciones 0.25, 1.0, y 10 % en peso de nanopartículas.

Con el objetivo de obtener películas homogéneas y delgadas, el proceso se realizó sobre sustratos de vidrio de 20 mm × 20 mm, sobre los cuales se depositaron alícuotas de 300 µL de la solución mediante la técnica de *spin coating*. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando un equipo Laurell modelo WS-650MZ-23NPPB, mostrado en la **Figura 5**, configurado a una velocidad de 2000 rpm durante 2 minutos. Estas condiciones permitieron la formación de películas uniformes, con buena cobertura y adecuada dispersión del material sobre el sustrato.



Figura 5. Equipo de *Spin coating*.

A partir de las condiciones previamente descritas para la elaboración de películas, se exploraron dos variantes experimentales: La deposición de películas bajo la influencia de un campo magnético inducido de 120 G y sin aplicación de campo magnético se muestra en la **Figura 6**. Para ello, se caracterizó previamente la bobina utilizada en la generación del campo, con el objetivo de asegurar que la intensidad magnética aplicada fuera adecuada y controlada durante el proceso de formación de cada película. Es importante señalar que también se fabricaron

películas exclusivamente de PVA, las cuales fueron elaboradas siguiendo las mismas condiciones experimentales descritas anteriormente.

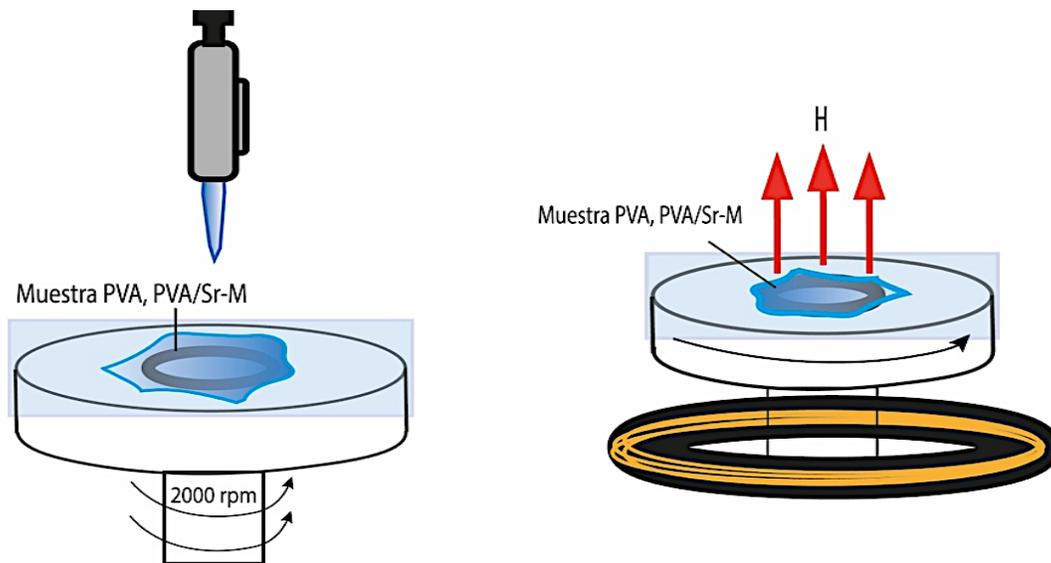


Figura 6. Diagrama de elaboración de películas de PVA y PVA/SrFe₁₂O₁₉ mediante la técnica de *Spin coating*.

2.4 Caracterización

2.4.1 Difracción de Rayos X

La confirmación de la formación de la fase deseada de hexaferrita tipo M se realizó a través del análisis de la fase cristalina, estructura, pureza, tamaño de cristalito y orientación preferencial. Para ello, se utilizó un difractómetro Inel Equinox 2000 con una fuente de cobalto ($\lambda = 1.7890 \text{ \AA}$). Los datos de difracción se adquirieron en un rango de 10 a 80° en 2θ , con un incremento de paso de 0.02° .

2.4.2 Refinamiento Rietveld

La caracterización estructural de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) se complementó mediante el refinamiento Rietveld aplicado a los patrones de difracción de rayos X obtenidos experimentalmente. Para ello, se utilizó el software MAUD, empleando como modelo estructural inicial la estructura cristalina reportada por Obradors et al., correspondiente a la hexaferrita tipo M (grupo espacial $P6_3/mmc$).

Durante el proceso de refinamiento, se ajustaron iterativamente diversos parámetros estructurales, incluyendo los parámetros de celda unitaria (a y c), las posiciones atómicas, los factores de ocupación y los factores térmicos isotrópicos. Asimismo, se evaluó la presencia de fases secundarias, y en su caso, se integraron en el modelo de refinamiento para determinar cuantitativamente su fracción másica.

La calidad del ajuste se evaluó a través de los factores de confiabilidad R_{wp} , R_{exp} y el parámetro de bondad del ajuste χ^2 , además del análisis visual del residuo entre el patrón experimental y el calculado. Este procedimiento permitió confirmar la formación de la fase pura de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, así como obtener información precisa sobre su microestructura y grado de cristalinidad.

2.4.3. Espectroscopia Infrarroja

La caracterización estructural de los materiales se llevó a cabo mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizando un espectrómetro Perkin Elmer Frontier (Waltham, MA, USA) operado en modo de reflectancia total atenuada (ATR). Las mediciones se realizaron en un rango espectral de 4000 a 400 cm^{-1} .

2.4.4 Espectroscopia de Fluorescencia

La caracterización óptica de las muestras se llevó a cabo mediante espectroscopia de fluorescencia, utilizando un espectrofotómetro PerkinElmer LS55, operado a temperatura ambiente. Las mediciones se realizaron en modo de excitación, con una longitud de onda $\lambda_{ex}=320$ nm.

Para las películas compuestas de PVA/SrFe₁₂O₁₉, el análisis espectroscópico permitió evaluar cambios en la intensidad y posición de los picos de emisión en función de la concentración de nanopartículas. La posible interacción entre la matriz polimérica y la superficie de las nanopartículas, evidenciada mediante desplazamientos espectrales o modulación de la intensidad. El efecto de la restricción de movimientos moleculares inducida por las nanopartículas, que puede favorecer los procesos de emisión radiativa, reduciendo las vías de desactivación no radiativa.

2.4.5 Microscopia electrónica de Barrido

La caracterización morfológica de las muestras se realizó mediante microscopia electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) utilizando un microscopio Jeol JSM-6010LA. Este equipo opera con un haz de electrones que barre la superficie de la muestra, generando señales secundarias que permiten obtener imágenes con alta resolución y gran profundidad de campo.

En el caso del alcohol polivinílico (PVA) puro, el SEM permitió observar la morfología superficial del polímero, identificando características como la uniformidad de la película. En los compuestos PVA/SrFe₁₂O₁₉, el SEM fue empleado para estudiar la

dispersión de las nanopartículas dentro de la matriz polimérica, así como su anclaje en la superficie y la homogeneidad del sistema híbrido. El análisis morfológico permitió también evaluar la interacción física entre matriz y nanopartículas, lo cual es fundamental para correlacionar la microestructura con las propiedades funcionales del material.

2.4.6 Microscopia de Fuerza atómica

La caracterización topográfica de las muestras se realizó mediante microscopía de fuerza atómica (AFM), utilizando un equipo Nanoview 1000 operado en modo de contacto, de acuerdo con la naturaleza y estabilidad superficial de las películas. Esta técnica permite obtener imágenes tridimensionales de la superficie con resolución nanométrica.

El análisis permitió evaluar parámetros como la rugosidad superficial promedio (R_a), la altura máxima (R_z), la uniformidad de la película, la presencia de estructuras superficiales o microdefectos, así como los cambios en la morfología topográfica inducidos por la incorporación de nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. También se analizó el aumento o disminución de la rugosidad, lo cual puede correlacionarse con modificaciones en las propiedades ópticas, magnéticas o mecánicas del material.

Los datos topográficos obtenidos fueron procesados y analizados mediante el software WSxM 5.0, lo que permitió extraer parámetros cuantitativos y generar imágenes tridimensionales de alta resolución.

2.4.7 Magnetometría de muestra vibrante

La caracterización de las propiedades magnéticas de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) se realizó mediante magnetometría de muestra vibrante (VSM, *Vibrating Sample Magnetometry*), utilizando un equipo Princeton Micromag 2900 con sistema de gradiente alternante (AGM). Esta técnica permite obtener curvas de magnetización (M–H) en función del campo magnético aplicado, lo que proporciona información detallada sobre el comportamiento magnético de los materiales a temperatura ambiente.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Difracción de Rayos X y Refinamiento Rietveld

Las nanopartículas de hexaferrita de estroncio, sintetizadas mediante el método Pechini, fueron caracterizadas estructuralmente mediante difracción de rayos X (DRX) y refinamiento por el método de Rietveld. La **Figura 7** presenta el patrón experimental (I_{obs}) superpuesto al ajuste calculado (I_{calc}), evidenciando una concordancia sobresaliente con el modelo teórico correspondiente a la fase hexagonal tipo M de $SrFe_{12}O_{19}$ (grupo espacial $P6_3/mmc$). Las marcas de posición de los picos simulados indican la presencia exclusiva de esta fase, sin señales atribuibles a fases secundarias como $\alpha-Fe_2O_3$ o $SrCO_3$. Esta pureza estructural es esencial para garantizar un comportamiento magnético reproducible y adecuado para aplicaciones funcionales.

En la **Figura 7**, la línea punteada en color negro corresponde al patrón de difracción de rayos X experimental de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio, mientras que la línea continua en color rojo, es el ajuste obtenido a partir del refinamiento Rietveld de a la fase $SrFe_{12}O_{19}$. Las marcas verdes indican las posiciones de los máximos de difracción obtenidos para dicha fase. Finalmente, la línea azul indica la diferencia entre los datos experimentales y calculados.

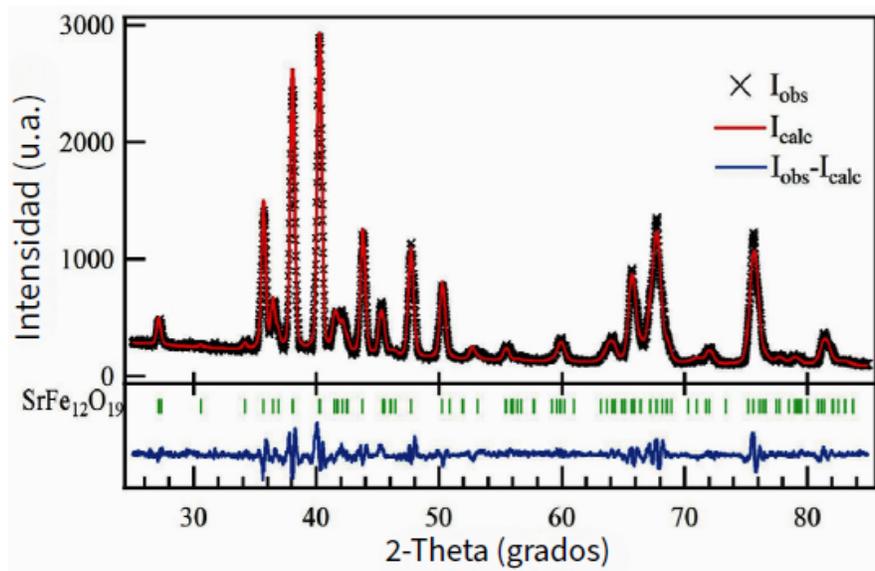


Figura 7. Patrón de difracción de rayos X experimental (línea negra) de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio, junto con el ajuste del refinamiento Rietveld (línea roja) correspondiente a la fase $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$.

Los parámetros estructurales obtenidos a partir del refinamiento destacan una celda unitaria con constantes de red $a=5.8358 \text{ \AA}$ y $c=22.8655 \text{ \AA}$. El tamaño medio de cristalito estimado fue de 87 nm, coherente con observaciones por SEM, lo cual indica que las partículas presentan dominios monocristalinos bien definidos. El modelo presentó una densidad de rayos X de 5.22 g/cm^3 y valores estadísticos satisfactorios de ajuste ($R_b = 5.78 \%$, $R_{\text{exp}} = 5.63 \%$, $\chi^2 = 1.33$), lo que valida la fiabilidad del refinamiento.

Estos resultados son consistentes con los reportados por otros autores [115], quienes informaron tamaños de cristalito en el rango de 80–90 nm para $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ sintetizado mediante rutas similares. Asimismo, estos hallazgos coinciden con los reportes de diversos investigadores [116], quienes destacaron que el control preciso de la temperatura es un factor clave para evitar el crecimiento excesivo de los cristalitos y la formación de fases secundarias[117].

Se analizó el efecto estructural que produce la incorporación de estas nanopartículas magnéticas en la matriz polimérica de alcohol polivinílico. La **Figura**

8 muestra el patrón de DRX comparativo entre el PVA puro y el sistema compuesto PVA/SHF-NPs. Se observa un desplazamiento del pico principal del PVA hacia mayores ángulos (corrimiento a la derecha), acompañado de una disminución significativa en la intensidad y definición de dicha banda. Este fenómeno se atribuye a la alteración de la fracción cristalina del polímero y a la perturbación de la organización molecular, particularmente en la región amorfa, debido a la estrecha interacción entre las cadenas del PVA y la superficie de las nanopartículas. Se observa la comparación entre ambos sistemas, donde se identifican los picos característicos de difracción asociados a las fases presentes. Los índices de Miller han sido asignados tanto para el PVA como para las nanopartículas de hexaferrita de estroncio incorporadas en la matriz polimérica.

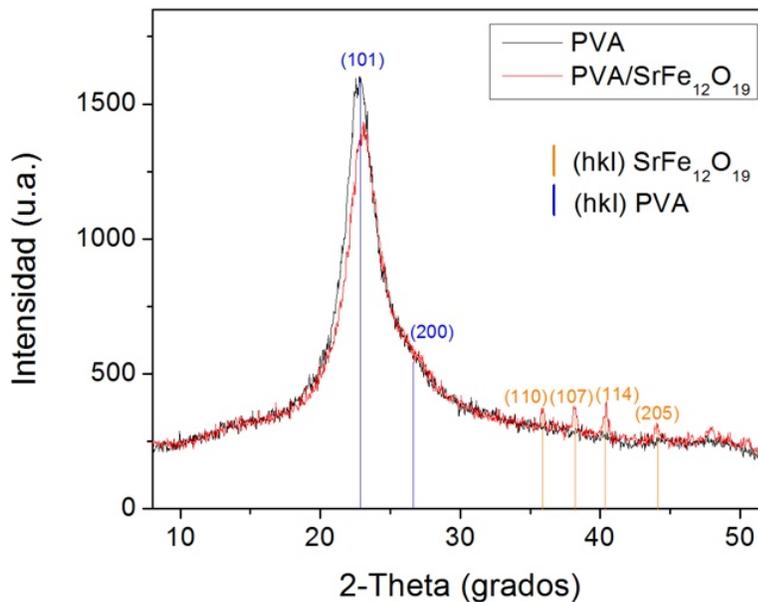


Figura 8. Patrón de difracción de rayos X correspondiente a la película de PVA y al compuesto PVA/SrFe₁₂O₁₉.

Estos hallazgos son consistentes con lo reportado en estudios previos [118], quienes demostraron que la incorporación de nanopartículas de Cu₂O reduce la cristalinidad del PVA y provoca un ensanchamiento de los picos de difracción. De

manera similar, otros investigadores [119], señalaron que la adición de nanorrellenos afecta directamente la ordenación molecular del polímero y modifica sus propiedades funcionales. En el caso particular de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio, su alta cristalinidad y la presencia de superficies ricas en oxígeno favorecen la formación de interacciones físico-químicas, como los puentes de hidrógeno, con los grupos hidroxilo del PVA, lo que induce restricciones en la movilidad de las cadenas poliméricas y altera su morfología estructural.

En conjunto, estos resultados indican que la interacción entre las nanopartículas de hexaferrita de estroncio y el PVA no solo es estructuralmente significativa, sino que también sienta las bases para modificaciones en las propiedades ópticas y estructurales del sistema compuesto, que serán discutidas en los apartados siguientes.

Adicionalmente, se ha reportado que al incrementar la carga de nanopartículas de ferrita en la matriz de PVA, se puede observar un aumento en la intensidad de los picos de DRX del polímero, lo cual sugiere un grado de cristalinidad más alto o un mejor ordenamiento molecular inducido por el relleno inorgánico. Este efecto ha sido atribuido al comportamiento de las nanopartículas como agentes nucleantes, que favorecen el crecimiento de regiones cristalinas en la matriz polimérica [120][121][122].

3.2 Espectroscopia Infrarroja

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permitió estudiar las interacciones estructurales entre el alcohol polivinílico y las nanopartículas de hexaferrita de estroncio en películas compuestas con diferentes concentraciones de carga magnética. En los espectros mostrados en la **Figura 9** se comparan las señales características para evaluar los cambios inducidos por la incorporación de las nanopartículas magnéticas en la matriz polimérica. Se observa la banda

característica del estiramiento O–H del PVA en 3265 cm^{-1} , atribuida a los grupos hidroxilo libres. Adicionalmente, se identificaron bandas asociadas al estiramiento simétrico de los grupos $-\text{CH}_2-$ ($2920\text{--}2940\text{ cm}^{-1}$), a la flexión C–H (1416 cm^{-1}), y a las vibraciones de deformación del esqueleto polimérico (908 y 844 cm^{-1}). La banda a 1745 cm^{-1} , por su parte, corresponde al estiramiento del grupo carbonilo ($\nu\text{C}=\text{O}$) de los residuos acetilo, los cuales permanecen en menor proporción tras la hidrólisis parcial del precursor del PVA.

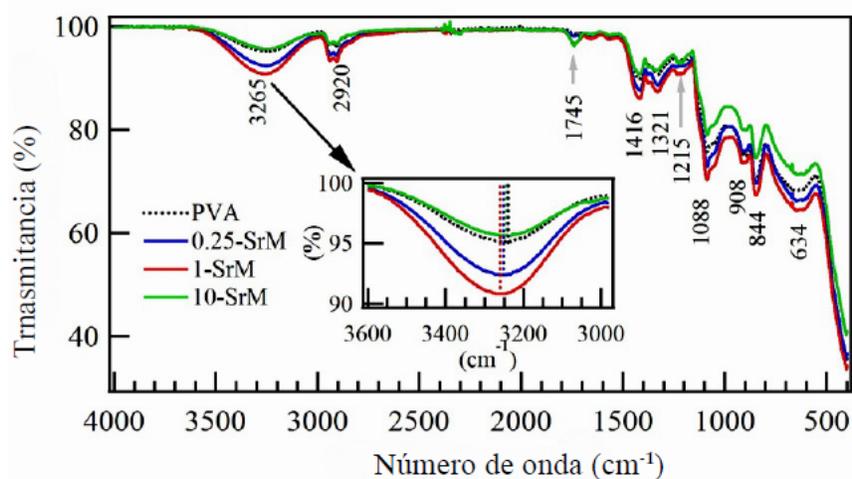


Figura 9. Espectros FTIR correspondientes al PVA puro y a los compósitos de PVA con nanopartículas embebidas de hexaferrita de estroncio.

Con la incorporación progresiva de las nanopartículas, se evidenció un desplazamiento hacia números de onda más altos en la banda O–H, acompañado por un aumento en la transmitancia tanto de esta banda como de la correspondiente al grupo C=O. Estas modificaciones espectrales sugieren la presencia de interacciones físicas por puente de hidrógeno entre los grupos funcionales del PVA y la superficie oxigenada de las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Este tipo de interacción ha sido ampliamente documentado en la literatura. Por ejemplo, algunos autores han observado que la inclusión de ferritas de Mg/Co en matrices de PVA provoca desplazamientos similares en la región O–H, atribuibles a una reorganización local de la red de enlaces de hidrógeno del polímero [123]. De

manera análoga, otros investigadores reportaron que las nanopartículas de ZnO inducen desplazamientos y variaciones en la intensidad de las bandas del PVA, actuando como agentes nucleantes que promueven un mayor orden molecular [124].

La aparición de nuevas bandas en el rango 450–650 cm^{-1} en los compuestos se atribuye a las vibraciones Fe–O en ambientes octaédricos ($\sim 450 \text{ cm}^{-1}$) y tetraédricos ($\sim 550\text{--}650 \text{ cm}^{-1}$), típicas de las hexaferritas tipo M. Estas bandas confirman la incorporación efectiva de nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ en la matriz polimérica.

Cabe destacar que, en los compuestos sólidos obtenidos mediante técnicas como el vaciado por casting, las nanopartículas quedan embebidas dentro de la red polimérica. La aplicación de técnicas de mezclado asistidas, como la sonicación *in situ*, favorece una dispersión homogénea de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio en la matriz de PVA, reduciendo la aglomeración y maximizando el área de contacto. No obstante, diversos estudios han señalado que no se forman enlaces covalentes entre el PVA y las nanopartículas de ferrita, sino que se trata de una mezcla física íntima estabilizada por interacciones superficiales [125].

Este tipo de interacción física define lo que en ciencia de materiales se denomina zona de interfase: una región tridimensional que se forma alrededor de las nanopartículas, donde las propiedades estructurales y fisicoquímicas del polímero cambian con respecto a su fase continua. La **Figura 10** ilustra este fenómeno, evidenciando un aumento del orden local en las regiones amorfas del PVA como consecuencia de la presencia de nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Esta reorganización puede deberse tanto a restricciones de movimiento de las cadenas como a la nucleación inducida por la topografía superficial de las nanopartículas.

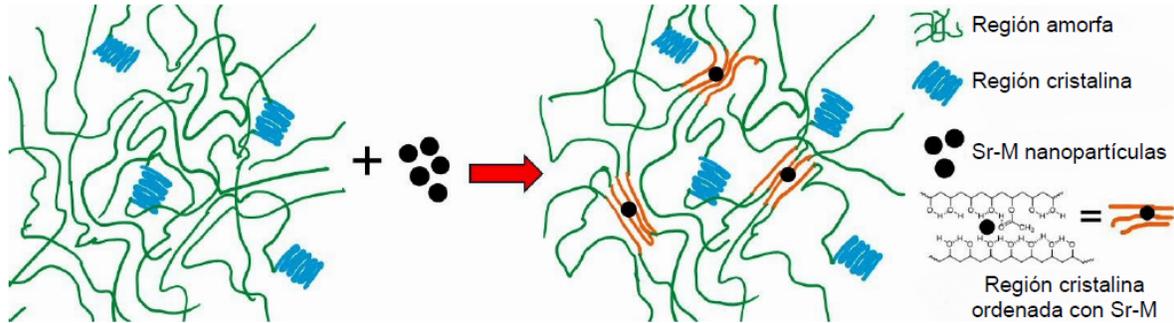


Figura 10. Ilustración esquemática del incremento en el orden molecular dentro de las regiones amorfas del PVA inducido por la presencia de nanopartículas.

La influencia de un campo magnético externo de 120 G aplicado durante la formación de películas PVA/ SrFe₁₂O₁₉ se estudió con mayor profundidad mediante FTIR. La **Figura 11(a)** muestra los espectros agrupados según el porcentaje de nanopartículas incorporadas, donde el PVA sin carga se incluye como referencia. En las muestras con campo aplicado, se observa una disminución en la transmitancia de la banda de absorción a 3265 cm⁻¹, lo cual se interpreta como una disminución en el número de enlaces de hidrógeno. Este fenómeno se atribuye a un aumento en el volumen de la zona de interfase, donde las interacciones entre nanopartículas magnetizadas inducen reorganizaciones moleculares que modifican la red de enlaces O–H del PVA. Este fenómeno puede asociarse a interacciones no enlazadas entre el PVA y las nanopartículas de hexaferrita de estroncio magnetizadas, las cuales, al estar confinadas y bien dispersas, pueden inducir una reorientación de las cadenas poliméricas en la interfase. Estas interacciones magnéticas residuales permanecen incluso después de retirar el campo aplicado, como ha sido reportado en nanocompuestos con materiales ferrimagnéticos [126].

Para comprobar que estos efectos no provienen exclusivamente del campo magnético, se fabricó una película de control de PVA sin nanopartículas de hexaferrita de estroncio y se sometió a un campo de 120 G. Como se muestra en la **Figura 11(b)**, no se detectaron cambios en la banda correspondiente al grupo hidroxilo, lo que confirma que el campo magnético, por sí solo, no altera la estructura

química del PVA. Este resultado refuerza la hipótesis de que la magnetización de las nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ es el factor clave que modifica las interacciones en la interfase.

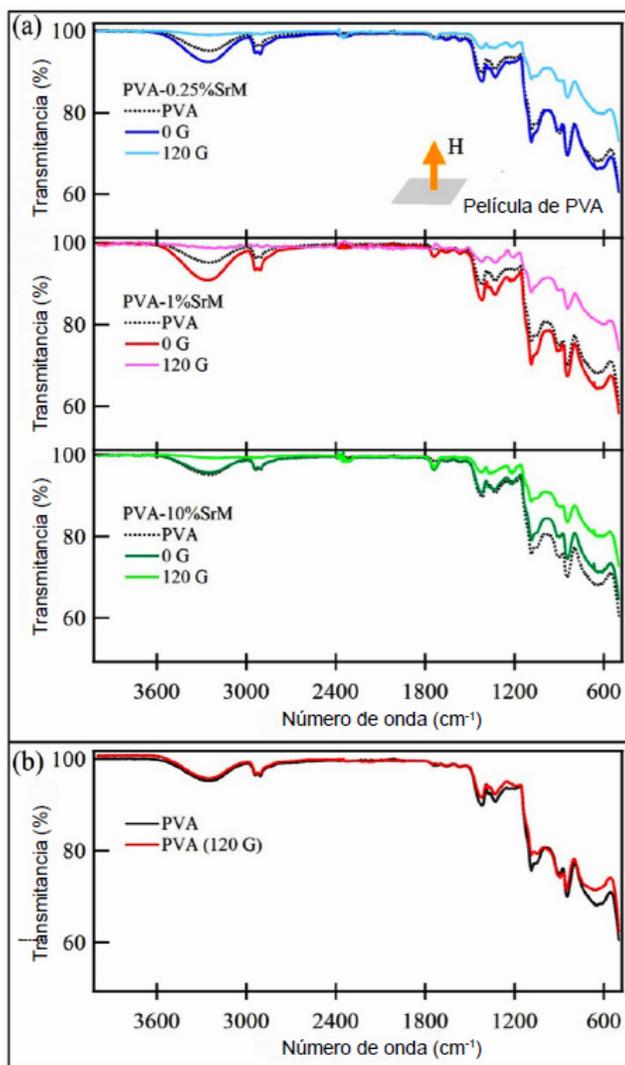


Figura 11. (a) Efecto de un campo magnético externo sobre las películas de PVA con 0.25, 1 y 10 % en peso de nanopartículas. (b) Para el caso de una película de PVA sin nanopartículas no se observan cambios significativos al aplicar un campo magnético externo.

En conjunto, los resultados FTIR indican que las propiedades estructurales de la matriz de PVA se ven influenciadas tanto por la concentración de nanopartículas

magnéticas como por su estado magnetizado durante la formación del compuesto. Así, se establece que el diseño de materiales funcionales basados en PVA y hexaferritas no solo depende de la composición, sino también de las condiciones externas de síntesis, que afectan directamente las interacciones intermoleculares y la organización estructural a escala nanométrica.

3.3 Espectroscopia de Fluorescencia

La espectroscopía de fluorescencia en estado estacionario permitió evaluar los efectos ópticos derivados de la incorporación de nanopartículas magnéticas de hexaferrita de estroncio en matrices de alcohol polivinílico, así como el impacto de un campo magnético externo durante la formación de las películas. En la **Figura 12(a)** se presentan los espectros de emisión obtenidos a una longitud de onda de excitación de 320 nm para distintas concentraciones de nanopartículas magnéticas de hexaferrita de estroncio. Se observa que la intensidad de fluorescencia aumenta sistemáticamente con la concentración de nanopartículas dispersas en la matriz polimérica. Este efecto puede atribuirse a modificaciones estructurales en la zona de interfase entre el PVA y las nanopartículas, donde se genera un entorno más rígido que favorece los procesos radiativos.

El PVA, al ser un polímero semicristalino, forma redes tridimensionales estabilizadas por puentes de hidrógeno entre sus grupos hidroxilo. Estas redes son capaces de alojar entidades fluorescentes y restringir su movimiento rotacional y vibracional, lo que suprime las vías de desactivación no radiativa y, en consecuencia, favorece la emisión de fluorescencia. Con la incorporación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio, se genera un entorno estructuralmente confinado que modifica la dinámica local de las cadenas poliméricas. Este efecto se intensifica a medida que aumenta la concentración de nanopartículas, fenómeno que también ha sido reportado en otros sistemas. Por ejemplo, en el trabajo de algunos autores [127], se

observó que la interacción nanopartícula-polímero en compósitos de PVA promovió un aumento significativo en la emisión luminosa. De manera similar, otros investigadores [92] señalaron que la presencia de nanopartículas actúa como una barrera física que restringe el movimiento molecular de las cadenas poliméricas, favoreciendo transiciones radiativas más eficientes.

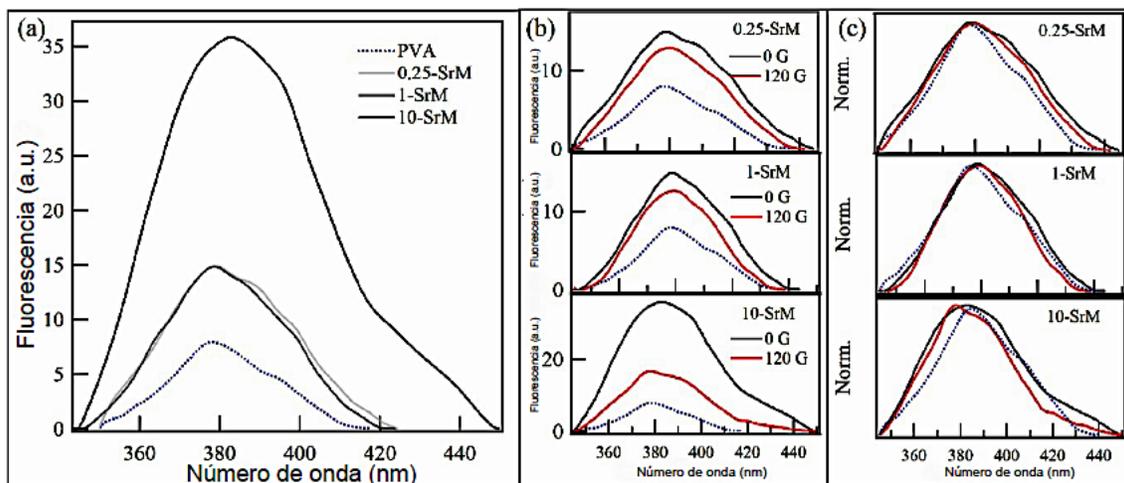


Figura 12. (a) Espectros de fluorescencia correspondientes a la película de PVA pura y a los compósitos con incorporaciones de 0.25, 1.0 y 10.0 % en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. (b) Comparación del efecto de un campo magnético externo de 120 G aplicado durante el proceso de fabricación de las películas. (c) Espectros de fluorescencia normalizados que permiten visualizar los desplazamientos en la emisión. Las líneas punteadas representan la señal de referencia del PVA sin nanopartículas.

No obstante, cuando las muestras son fabricadas bajo la acción de un campo magnético de 120 G, los espectros de la **Figura 12(b)** revelan una disminución en la intensidad de fluorescencia proporcional a la concentración de SHF-NPs. Este fenómeno, conocido como quenching magnético, se ha asociado con la magnetización inducida de las nanopartículas durante el proceso de secado, la cual puede favorecer interacciones no radiativas por acoplamiento magnético o reorganización estructural.

Este fenómeno ha sido documentado también por diversos autores [128], quienes demostraron que las nanopartículas de ferrita, al ser magnetizadas, pueden actuar como centros disipativos de energía excitada, lo que disminuye la eficiencia de emisión fluorescente en matrices poliméricas. De manera complementaria, estudios más recientes han sugerido que la orientación espacial inducida por campos magnéticos externos favorece la formación de dominios ópticamente anisotrópicos dentro del polímero, lo que modifica su comportamiento lumínico global.

Un caso análogo de relevancia para la comprensión de los mecanismos magneto-luminiscentes es el descrito por distintos autores [129], quienes investigaron un sistema constituido por un polímero conjugado luminescente (PT2U) y nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) con estructura espinela. Aunque el polímero base difiere del alcohol polivinílico (PVA), el fenómeno observado presenta similitudes significativas con lo descrito en el presente trabajo. En dicho estudio, el incremento en la concentración de nanopartículas promovió su agregación dentro de la matriz polimérica, lo que generó una disminución progresiva de la emisión fluorescente (*quenching*), atribuida a interacciones específicas entre los iones Fe y las cadenas macromoleculares, las cuales favorecieron rutas de desactivación no radiativa. Asimismo, se demostró que la aplicación de un campo magnético externo indujo la reorientación de las nanopartículas, propiciando la formación de dominios más ordenados que intensificaron el *quenching* debido a la perturbación del apilamiento molecular y de la organización supramolecular del sistema polimérico.

La **Figura 12(c)**, con los espectros de fluorescencia normalizados, muestra además un ligero desplazamiento hacia el rojo (red shift) en las bandas de emisión de las películas expuestas al campo magnético. Este corrimiento espectral podría deberse a una mayor polarización local o a una redistribución de densidad electrónica en la zona de interfase, donde el confinamiento polimérico y la magnetización de las partículas alteran el entorno. En conjunto, estos resultados evidencian una correlación entre la microestructura interfacial del nanocompuesto y sus propiedades ópticas, controlada tanto por la concentración de partículas como por condiciones externas de procesamiento.

3.4 Microscopia electrónica de Barrido

Las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) revelan cómo la incorporación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio y la aplicación de un campo magnético externo influyen en la morfología superficial de las películas de alcohol polivinílico (PVA) sin presencia de poros, fisuras ni burbujas.

En la película de PVA puro **Figura 13** (a-b), se observa una superficie homogénea y continua, sin defectos como grietas o burbujas, y con una morfología laminar atribuida a las tensiones superficiales generadas durante el secado.

Al incorporar un 0.25% en peso de nanopartículas **Figura 13**(c), la superficie muestra un patrón de contraste en forma de "islas", que indica cambios en las propiedades estructurales del PVA debido a la presencia de las nanopartículas. Estas "islas" se atribuyen a la reorganización de las cadenas poliméricas en la zona interfacial cercana a las nanopartículas, donde se favorece un aumento del orden estructural en las regiones amorfas del polímero. Este fenómeno ha sido documentado en estudios previos, donde se observa que las nanopartículas actúan como agentes nucleantes, promoviendo una mayor cristalinidad en la matriz polimérica [130]. Diversos estudios [130, 131] describen esta región como una zona tridimensional de transición donde las propiedades difieren de las del volumen del polímero, y donde la cristalinidad local puede incrementarse debido a la interacción físico-química entre fases.

Al aumentar la concentración de nanopartículas al 10% en peso **Figura 13** (e), la superficie de la película se vuelve más uniforme, y las "islas" observadas anteriormente disminuyen. Asimismo, se observa una evolución en la morfología conforme se incrementa la carga de nanopartículas y se introduce el campo magnético, lo cual sugiere una modificación estructural inducida por la interacción entre las nanopartículas y la matriz polimérica durante el proceso de *spin coating*.

Estudios similares han reportado que la incorporación de nanopartículas de ferrita en matrices poliméricas mejora la uniformidad y las propiedades estructurales del material [132].

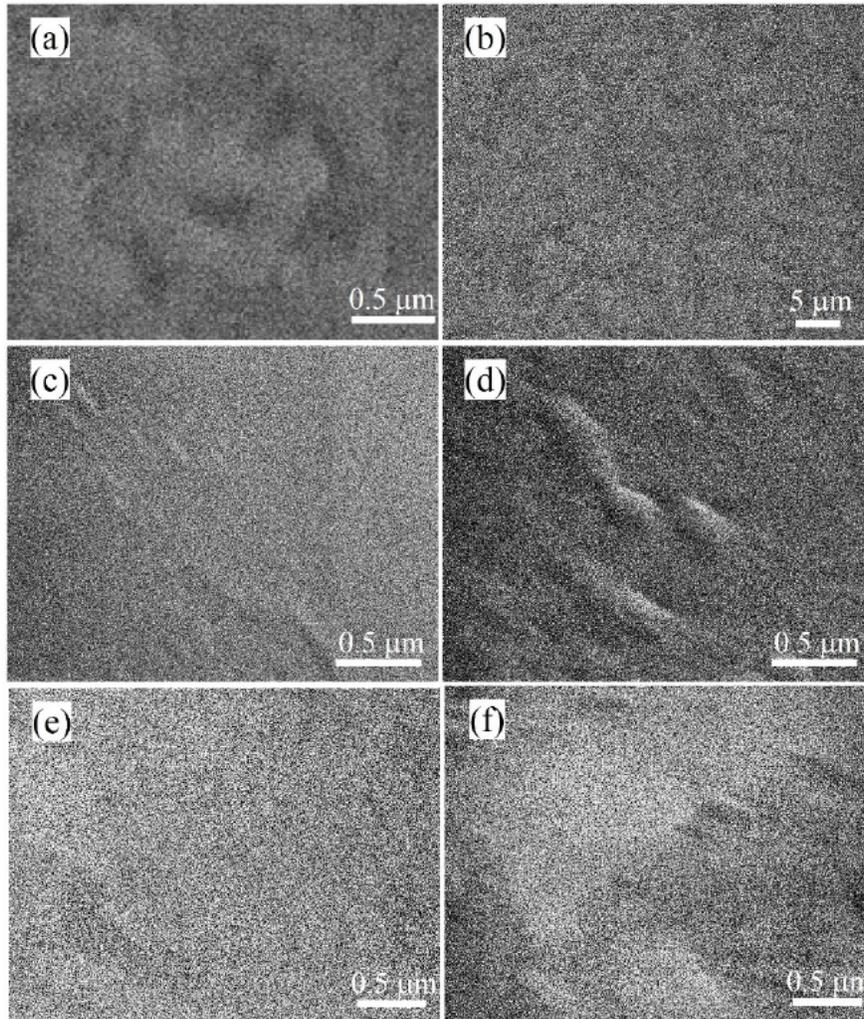


Figura 13. Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) correspondientes a: (a-b) película pura de alcohol polivinílico (PVA), (c) nanocompuesto con 0.25% en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio, (d) la misma composición con aplicación de un campo magnético de 120 G durante la síntesis, (e) nanocompuesto con 10% en peso de nanopartículas, y (f) su contraparte bajo la influencia de un campo magnético externo de 120 G.

La aplicación de un campo magnético externo de 120 G durante la fabricación de las películas también afecta la morfología superficial. En las muestras con 0.25% en peso de nanopartículas, el campo magnético suaviza la superficie y elimina la morfología laminar observada en la película de PVA puro. En las películas con 10% en peso de nanopartículas, el campo magnético induce la aparición de regiones oscuras y brillantes en la superficie, posiblemente asociadas con cambios en las propiedades estructurales del PVA debido a la interacción entre las nanopartículas magnetizadas y la matriz polimérica. Este efecto puede atribuirse a la orientación inducida de las nanopartículas bajo el campo magnético, lo que afecta la organización de las cadenas poliméricas y, por ende, la morfología del material. Este tipo de efecto ha sido documentado en la literatura, donde se ha señalado que los campos magnéticos son capaces de inducir orientaciones anisotrópicas en polímeros compuestos con nanopartículas magnéticas, alterando de manera significativa su microestructura superficial [18, 133].

Estos resultados indican que tanto la concentración de nanopartículas como la aplicación de un campo magnético externo influyen significativamente en la morfología superficial de las películas de PVA, mediante la modificación de la zona interfacial y el ordenamiento estructural del polímero.

3.5 Microscopia de Fuerza atómica

El análisis de las micrografías obtenidas mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) permitió evaluar cómo la incorporación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio y la aplicación de un campo magnético externo influyen en la topografía superficial de películas de alcohol polivinílico (PVA).

Las imágenes de AFM en 2D y 3D, junto con los perfiles topográficos, revelaron que la película de PVA puro (**Figura 14**) presenta una superficie homogénea con variaciones suaves en la topografía, atribuibles a las condiciones de procesamiento

como la viscosidad del polímero y la velocidad de rotación durante el spin-coating. Estas características son consistentes con estudios previos que señalan que las propiedades reológicas del PVA y las condiciones de secado afectan la formación de patrones superficiales [134].

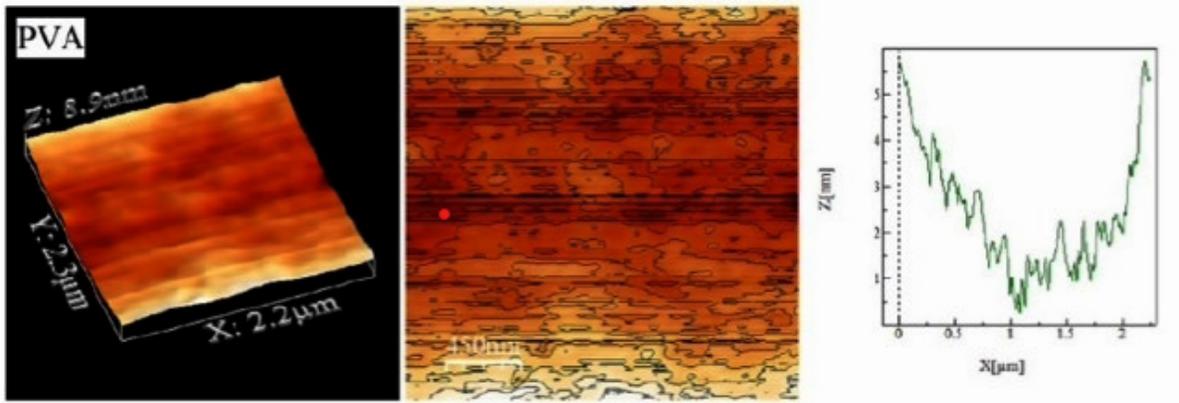


Figura 14. Imágenes bidimensionales y tridimensionales obtenidas mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) correspondientes a la película de PVA sin la incorporación de nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Se incluye también el perfil topográfico transversal de una región representativa de la superficie de la película.

Al incorporar un 0.25% (**Figura 15**) en peso de nanopartículas magnéticas, se observó un aumento en la rugosidad superficial y la desaparición de las pistas lineales características del PVA puro. Este cambio sugiere la formación de una zona de interfase entre las nanopartículas y la matriz polimérica, donde las interacciones físicas modifican la organización local del polímero. La aplicación de un campo magnético de 120 G durante la fabricación de la película con 0.25% de nanopartículas resultó en una ligera disminución de la rugosidad, indicando que el campo puede influir en la orientación y distribución de las nanopartículas, afectando así la topografía superficial.

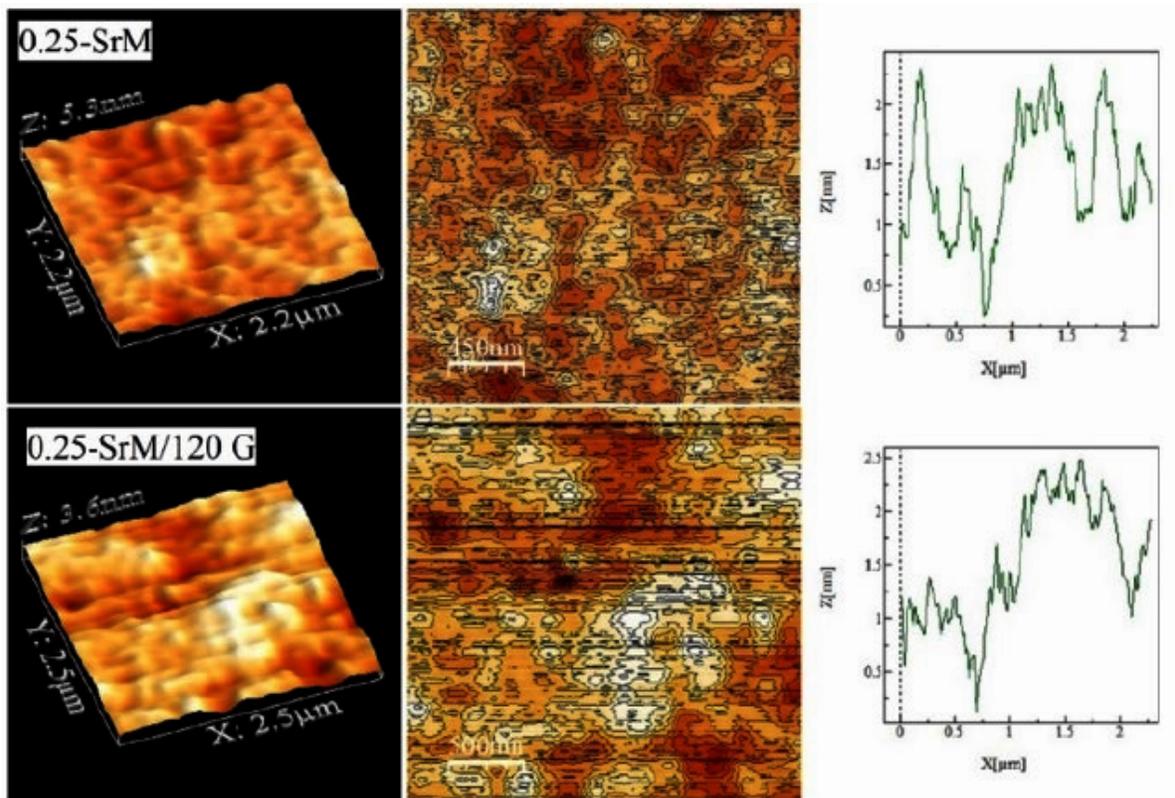


Figura 15. Imágenes de microscopía AFM correspondientes a las películas de PVA con una incorporación del 0.25% en peso de nanopartículas magnéticas, sin aplicación de campo magnético externo (0.25-SrM) y con la aplicación de un campo de 120 G (0.25-SrM/120G).

Con un aumento en la concentración de nanopartículas magnéticas al 1% en peso (**Figura 16**), la superficie de la película mostró un patrón ondulado más pronunciado, con pequeñas ondas superpuestas sobre crestas más grandes. Este comportamiento puede atribuirse a una combinación de la densidad de las nanopartículas dispersas y una fuerte interacción a nivel molecular entre las nanopartículas y el PVA. La aplicación del campo magnético en esta concentración resultó en una superficie más lisa, evidenciando que el campo puede inducir una reorganización de las nanopartículas y, por ende, de la matriz polimérica.

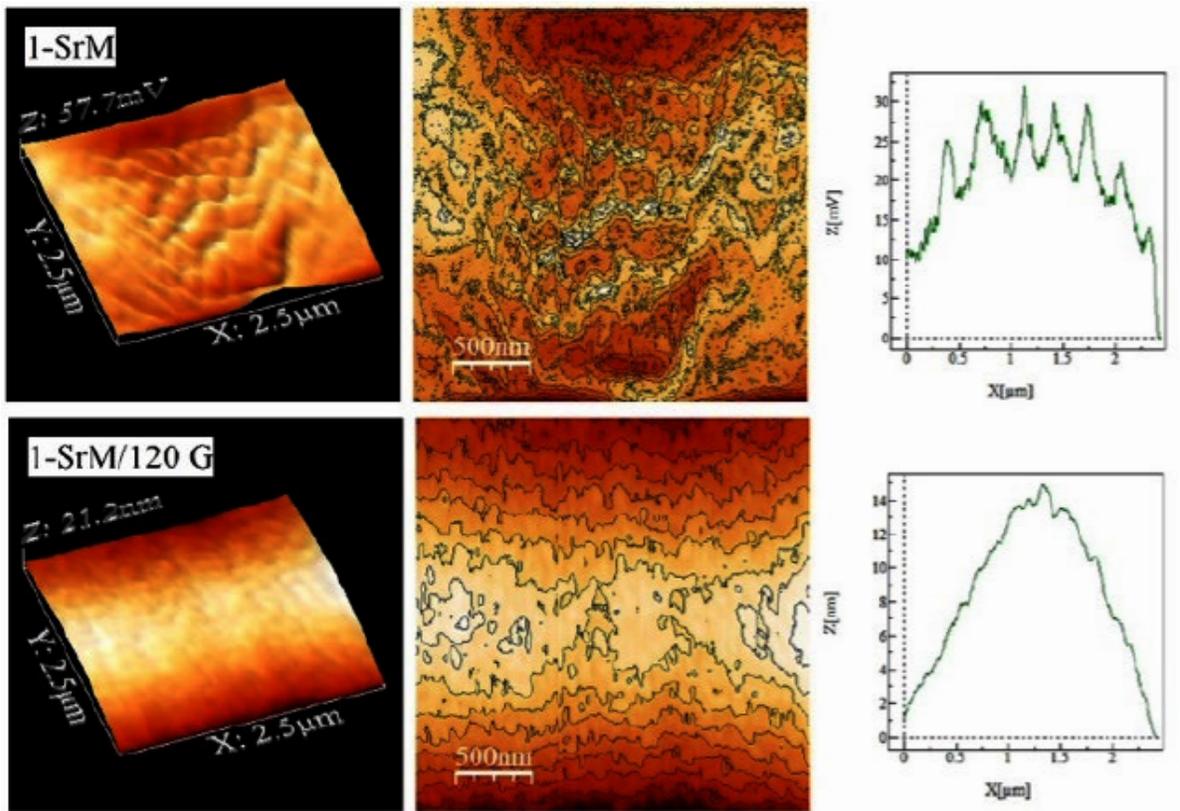


Figura 16. Imágenes obtenidas mediante microscopía AFM de películas de PVA con un 1% en peso de nanopartículas magnéticas, analizadas en dos condiciones: sin campo magnético externo (1-SrM) y con la aplicación de un campo de 120 G (1-SrM/120G).

En la muestra con 10% en peso de nanopartículas de hexaferrita de estroncio (**Figura 17**), se observó una superficie altamente uniforme sin evidencia discernible de aglomeración de partículas. Sin embargo, la superficie exhibió regiones oscuras y brillantes, probablemente asociadas con cambios en las propiedades estructurales del PVA inducidos por la presencia de las nanopartículas y la aplicación del campo magnético. Este fenómeno sugiere que, a altas concentraciones de nanopartículas, el campo magnético puede promover una distribución más homogénea y una mayor interacción en la zona de interfase, afectando la topografía y potencialmente las propiedades funcionales del material.

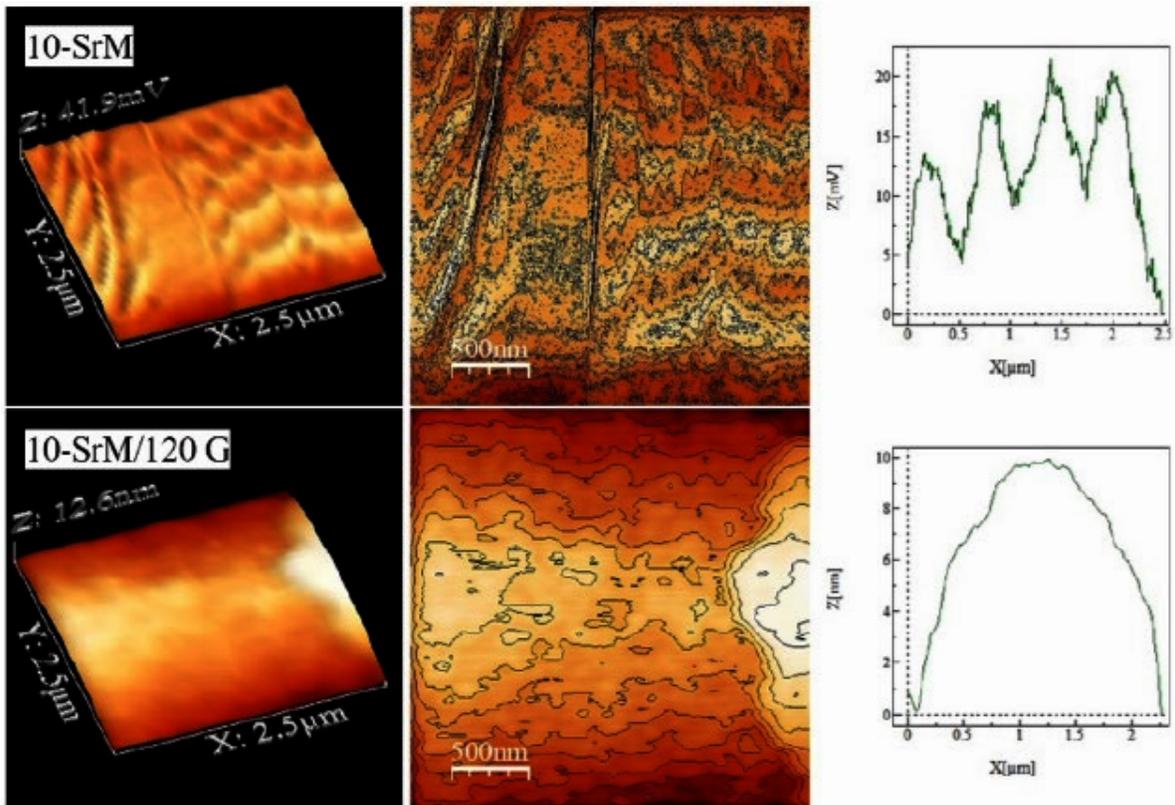


Figura 17. Imágenes de microscopía AFM correspondientes a la película de PVA con un 10% en peso de nanopartículas magnéticas, analizadas sin campo magnético externo (10-SrM) y con la aplicación de un campo de 120 G (10-SrM/120 G).

Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que han demostrado que la incorporación de nanopartículas en matrices poliméricas puede modificar significativamente la topografía superficial y las propiedades mecánicas del material [135]. Además, la aplicación de campos magnéticos durante la fabricación de nanocompuestos ha sido reportada como una estrategia efectiva para controlar la orientación y distribución de las nanopartículas, lo que a su vez influye en las propiedades estructurales y funcionales del material [136].

En resumen, la combinación de nanopartículas magnéticas y la aplicación de un campo magnético durante la fabricación de películas de PVA permite modular la topografía superficial del material.

3.6 Magnetometría de muestra vibrante

La magnetometría de muestra vibrante nos da como resultado el bucle de histéresis (**Figura 18**) de las nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) obtenido mediante la aplicación de un campo magnético máximo de 10 kOe. Las nanopartículas muestran una respuesta típicamente ferromagnética, destacando por su elevada coercitividad, así como por altos valores de magnetización de saturación y remanente. La curva de magnetización revela un comportamiento característico de materiales ferrimagnéticos duros, evidenciado por una alta magnetización remanente ($M_r = 40.14 \text{ emu/g}$) y un campo coercitivo significativo ($H_c = 5.54 \text{ kOe}$). La magnetización de saturación (M_s) alcanza los 68.46 emu/g , resultando en una relación M_r/M_s del 58%, lo que indica una notable anisotropía magnética y una orientación preferencial de los dominios magnéticos.

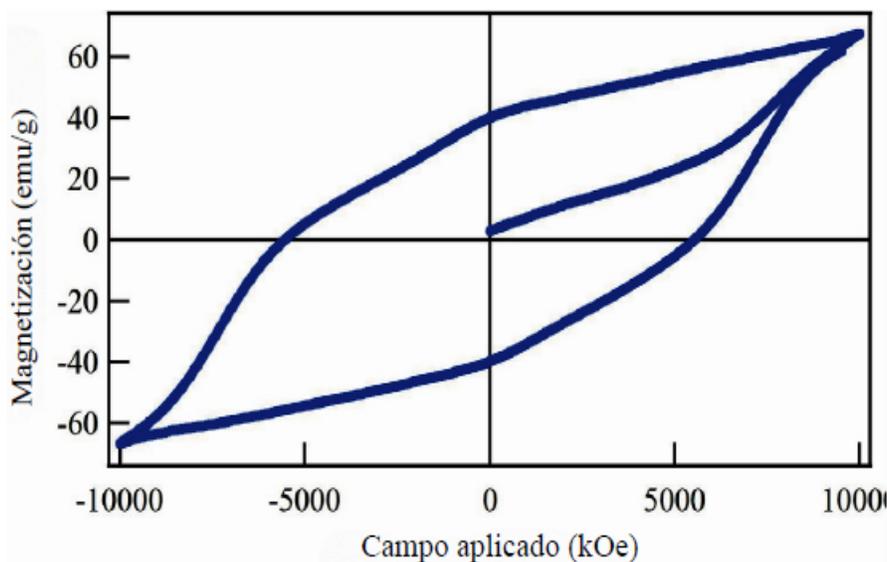


Figura 18. Curva de histéresis correspondiente a las nanopartículas de hexaferrita de estroncio, registrado bajo la aplicación de un campo magnético máximo de 10 kOe.

Estos valores son consistentes con los reportados en la literatura para nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ sintetizadas mediante métodos similares. Por ejemplo, en un estudio publicado en *Scientific Reports*, se observaron propiedades magnéticas características de materiales duros en nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ obtenidas por molienda mecánica y sinterización por plasma de chispa, con valores de H_c que variaron en función del tiempo de molienda [137]. Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que la coercividad y la magnetización remanente de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ pueden ser optimizadas mediante el control de la morfología y el tamaño de las partículas [138].

La forma del bucle de histéresis sugiere la presencia de interacciones magnéticas entre las nanopartículas, posiblemente debido a la aglomeración durante el proceso de síntesis. Este fenómeno ha sido previamente documentado y se ha asociado con la formación de estructuras de dominio múltiple que afectan las propiedades magnéticas globales del material [139].

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió la fabricación y caracterización de películas nanocompuestas basadas en alcohol polivinílico (PVA) con distintas concentraciones de nanopartículas de hexaferrita de estroncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$), explorando adicionalmente el efecto de un campo magnético externo aplicado durante el proceso de formación por *spin coating*. Los resultados obtenidos permiten concluir lo siguiente:

Desde el punto de vista estructural, el análisis por difracción de rayos X y refinamiento Rietveld confirmó que las nanopartículas presentan una fase pura tipo M (grupo espacial $P6_3/mmc$), con excelente cristalinidad y sin evidencia de fases secundarias. El tamaño de cristalito y los parámetros de red concuerdan con lo reportado en la literatura reciente, lo cual valida la calidad estructural de las nanopartículas sintetizadas.

Por otro lado, por medio de espectroscopía infrarroja, se observaron desplazamientos en la banda de estiramiento O–H y cambios en la intensidad de bandas asociadas a los grupos carbonilo y CH_2 , lo que indica la formación de puentes de hidrógeno en la zona de interfase. Estos resultados fueron más notorios con el aumento de la concentración de nanopartículas y en las muestras con aplicación de campo magnético, lo que sugiere una reorganización local de la red de enlaces del polímero. Este comportamiento estructural tiende a fortalecer la estabilidad estructural del sistema sin requerir enlaces covalentes, confirmando una mezcla física estabilizada por interacciones fisicoquímicas.

En el ámbito óptico, la espectroscopía de fluorescencia evidenció un incremento en la intensidad de emisión con el aumento de nanopartículas, debido a la restricción de los movimientos moleculares en la interfase. Sin embargo, bajo un campo magnético externo, se demostró que la emisión óptica del sistema es sensible tanto a la carga de nanopartículas como al entorno magnético.

La caracterización morfológica mediante SEM y AFM confirmó que la incorporación de las nanopartículas magnéticas altera profundamente la topografía superficial y la organización microestructural de la matriz polimérica. Se identificaron cambios en la rugosidad, patrones ondulados y reorganización de las cadenas de PVA, con una respuesta distinta en función del contenido de nanopartículas y la presencia de campo magnético. Este comportamiento se interpreta como el resultado de una autoorganización inducida en la zona de interfase, que puede ser controlada de forma precisa por condiciones externas.

Este estudio demostró que es posible diseñar nanocompuestos magneto-ópticos mediante la incorporación controlada de nanopartículas de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ en matrices de PVA. Las propiedades resultantes pueden ser moduladas de forma sinérgica por la composición y por la aplicación de campos magnéticos durante el procesamiento, lo que abre un abanico de posibilidades para el desarrollo de dispositivos avanzados en áreas como sensores, recubrimientos inteligentes, fotónica y materiales con respuesta externa programable.

CAPÍTULO 5. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO

A partir de los hallazgos estructurales, ópticos, magnéticos y morfológicos obtenidos en este trabajo, se abren diversas líneas de investigación que permitirían profundizar en la comprensión y aplicación de nanocompuestos basados en alcohol polivinílico y nanopartículas de hexaferrita de estroncio. Una de las principales perspectivas consiste en explorar las propiedades eléctricas y dieléctricas de estos materiales, ya que la presencia de zonas interfaciales definidas por la interacción entre el PVA y las nanopartículas puede alterar significativamente el transporte iónico y la conductividad del sistema. Estudios de permitividad eléctrica, pérdida dieléctrica y respuesta a frecuencias variables permitirían evaluar su viabilidad en dispositivos sensores o elementos de almacenamiento de carga.

Asimismo, resulta de gran interés la implementación de herramientas de modelado computacional, como simulaciones de dinámica molecular o cálculos de primeros principios (DFT), con el fin de investigar a nivel atómico las interacciones específicas entre los grupos hidroxilo del PVA y las superficies oxigenadas de las nanopartículas. Esta aproximación teórica permitiría correlacionar los desplazamientos observados en los espectros FTIR con mecanismos energéticos y conformacionales plausibles en la zona de interfase.

Otra dirección relevante consiste en el estudio de nuevos métodos de alineamiento de las nanopartículas durante la formación de las películas, incluyendo campos eléctricos, gradientes térmicos o presión mecánica, lo que podría inducir anisotropías estructurales útiles en aplicaciones fotónicas o magneto-ópticas. En

paralelo, la funcionalización química de la superficie de las nanopartículas — mediante grupos silano, carboxilo o amino— podría mejorar su compatibilidad con la matriz polimérica, fortaleciendo las interacciones interfaciales y otorgando nuevas funcionalidades al compuesto.

Desde el punto de vista aplicado, la evaluación de la estabilidad térmica, fotoquímica y ambiental del nanocompuesto representa un paso esencial para validar su uso en condiciones reales. Ensayos de envejecimiento acelerado, exposición a humedad o radiación UV podrían brindar información clave sobre su durabilidad. Adicionalmente, el fenómeno observado de quenching fluorescente inducido por magnetización sugiere un potencial significativo para el desarrollo de sensores ópticos sensibles a campos magnéticos o a la presencia de especies ferroeléctricas, abriendo posibilidades en el diseño de plataformas de detección avanzadas.

Finalmente, ampliar el estudio a otros polímeros matrices como PVP, PEG o biopolímeros como el quitosano permitiría evaluar la versatilidad de la hexaferrita de estroncio como agente funcional en diferentes sistemas, y optimizar propiedades mecánicas, ópticas o biodegradables según la aplicación deseada. Complementariamente, la caracterización reológica y mecánica de los compuestos obtenidos permitiría validar su resistencia a deformaciones, su módulo elástico y su viabilidad como recubrimientos funcionales o materiales estructurales ligeros.

REFERENCIAS

- [1] Tang, X., Alavi, S. (2011). Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. *Carbohydrate polymers*, 85(1), 7-16.
- [2] Bao, Y., Huang, X., Xu, J., Cui, S. (2021). Effect of intramolecular hydrogen bonds on the single-chain elasticity of poly (vinyl alcohol): Evidencing the synergistic enhancement effect at the single-molecule level. *Macromolecules*, 54(15), 7314-7320.
- [3] Olabisi, O., Adewale, K. (Eds.). (2016). *Handbook of thermoplastics*. CRC press.
- [4] Satoh, K. (2014). Poly(vinyl alcohol) (PVA). In: Kobayashi, S., Müllen, K. (eds) *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5] Nord, F. F., Bier, M., Timasheff, S. N. (1951). Investigations on proteins and polymers. IV. 1 Critical phenomena in polyvinyl alcohol-acetate copolymer solutions. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 289-293.
- [6] Pereda, C. (2020). *Obtención, caracterización y testeo de perlas magnéticas de polivinil alcohol para tratamientos de descontaminación de aguas* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina).
- [7] Goodship, Vanessa and Jacobs, D. K. (2009) Polyvinyl alcohol: materials, processing and applications. Rapra review reports, Vol.16 (No.12). Shrewsbury, Shropshire: Smithers Rapra Technology. ISBN 9781847350954
- [8] Lim, M., Kwon, H., Kim, D., Seo, J., Han, H., Khan, S. B. (2015). Highly-enhanced water resistant and oxygen barrier properties of cross-linked poly (vinyl alcohol) hybrid films for packaging applications. *Progress in Organic Coatings*, 85, 68-75.
- [9] Sapalidis, A. A., Katsaros, F. K., Steriotis, T. A., Kanellopoulos, N. K. (2012). Properties of poly (vinyl alcohol)—Bentonite clay nanocomposite films in relation to polymer—clay interactions. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(3), 1812-1821.

- [10] Zhang, Z., Liu, Y., Lin, S., Wang, Q. (2020). Preparation and properties of glutaraldehyde crosslinked poly (vinyl alcohol) membrane with gradient structure. *Journal of Polymer Research*, 27(8), 228.
- [11] Bandyopadhyay, A., De Sarkar, M., Bhowmick, A. K. (2005). Poly (vinyl alcohol)/silica hybrid nanocomposites by sol-gel technique: Synthesis and properties. *Journal of materials science*, 40, 5233-5241.
- [12] Krumova, M., Lopez, D., Benavente, R., Mijangos, C., Perena, J. M. (2000). Effect of crosslinking on the mechanical and thermal properties of poly (vinyl alcohol). *Polymer*, 41(26), 9265-9272.
- [13] Ding, B., Kim, H. Y., Lee, S. C., Shao, C. L., Lee, D. R., Park, S. J., Choi, K. J. (2002). Preparation and characterization of a nanoscale poly (vinyl alcohol) fiber aggregate produced by an electrospinning method. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 40(13), 1261-1268.
- [14] Abrial, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2477-2486.
- [15] Cheng, W., Chen, J., Liu, D., Ye, X., Ke, F. (2010). Impact of ultrasonic treatment on properties of starch film-forming dispersion and the resulting films. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 707-711.
- [16] lida, Y., Tuziuti, T., Yasui, K., Towata, A., Kozuka, T. (2008). Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 140-146.
- [17] Mohamed Saat, A., Johan, M. R. (2014). The surface structure and thermal properties of novel polymer composite films based on partially phosphorylated poly (vinyl alcohol) with aluminum phosphate. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 439839.
- [18] Liu, T., Peng, X., Chen, Y. N., Bai, Q. W., Shang, C., Zhang, L., Wang, H. (2018). Hydrogen-bonded polymer–small molecule complexes with tunable mechanical properties. *Macromolecular Rapid Communications*, 39(9), 1800050.
- [19] Chen, C., Liu, X., Wang, J., Guo, H., Chen, Y., Wang, N. (2024). Research on the Thermal Aging Mechanism of Polyvinyl Alcohol Hydrogel. *Polymers*, 16(17), 2486.

- [20] Li, Y., Xie, J., Cheng, H., Wei, X., Chen, J., You, L., Chen, W. (2025). Polyvinyl alcohol-based polarizers for new displays: molecules, processing and properties. *Soft Matter*, 21(17), 3148-3167.
- [21] Chen, C., Liu, X., Wang, J., Guo, H., Chen, Y., Wang, N. (2024). Research on the Thermal Aging Mechanism of Polyvinyl Alcohol Hydrogel. *Polymers*, 16(17), 2486.
- [22] Li, L., Xu, X., Liu, L., Song, P., Cao, Q., Xu, Z., Wang, H. (2021). Water governs the mechanical properties of poly (vinyl alcohol). *Polymer*, 213, 123330.
- [23] Shi, L., Han, Q. (2018). Molecular dynamics study of deformation mechanisms of poly (vinyl alcohol) hydrogel. *Molecular Simulation*, 44(17), 1363-1370.
- [24] Chen, C., Liu, X., Wang, J., Guo, H., Chen, Y., Wang, N. (2024). Research on the Thermal Aging Mechanism of Polyvinyl Alcohol Hydrogel. *Polymers*, 16(17), 2486.
- [25] Özgür, Ü., Alivov, Y., Morkoç, H. (2009). Microwave ferrites, part 1: fundamental properties. *Journal of materials science: Materials in electronics*, 20, 789-834.
- [26] Buschow, K. H. J. (1992). Electronic and magnetic properties of metals and ceramics.
- [27] Eliseev, A. A., Eliseev, A. A., Trusov, L. A., Chumakov, A. P., Boesecke, P., Anokhin, E. O., Kazin, P. E. (2018). Rotational dynamics of colloidal hexaferrite nanoplates. *Applied Physics Letters*, 113(11).
- [28] Lisjak, D., Mertelj, A. (2018). Anisotropic magnetic nanoparticles: A review of their properties, syntheses and potential applications. *Progress in Materials Science*, 95, 286-328.
- [29] Sánchez-De Jesús, F., Bolarín-Miró, A. M., Cortés-Escobedo, C. A., Valenzuela, R., Ammar, S. (2014). Mechano-synthesis, crystal structure and magnetic characterization of M-type SrFe₁₂O₁₉. *Ceramics International*, 40(3), 4033-4038.
- [30] Brito, P. C. A., Gomes, R. F., Duque, J. G. S., Macêdo, M. A. (2006). SrFe₁₂O₁₉ prepared by the proteic sol-gel process. *Physica B: Condensed Matter*, 384(1-2), 91-93.
- [31] Roohani, E., Arabi, H., Sarhaddi, R., Sudkhah, S., Shabani, A. (2015). Effect of annealing temperature on structural and magnetic properties of strontium hexaferrite nanoparticles synthesized by sol-gel auto-combustion method. *International Journal of modern physics B*, 29(27), 1550190.

- [32] Rehman, M. R., Akram, M. A., Gul, I. H. (2022). Improved electrical properties of strontium hexaferrite nanoparticles by Co^{2+} substitutions. *Acs Omega*, 7(48), 43432-43439.
- [33] Javadi, S., Mirsalim, M. (2008). A coreless axial-flux permanent-magnet generator for automotive applications. *IEEE transactions on magnetics*, 44(12), 4591-4598.
- [34] 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.
- [35] Palomino, R. L., Miró, A. B., Tenorio, F. N., De Jesús, F. S., Escobedo, C. C., Ammar, S. (2016). Sonochemical assisted synthesis of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanoparticles. *Ultrasonics sonochemistry*, 29, 470-475.
- [36] Park, J., Hong, Y. K., Kim, S. G., Kim, S., Liyanage, L. S., Lee, J., An, S. Y. (2014). Maximum energy product at elevated temperatures for hexagonal strontium ferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) magnet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 355, 1-6.
- [37] Mahmood, N., Khan, H., Tran, K., Kuppe, P., Zavabeti, A., Atkin, P., Kalantar-Zadeh, K. (2021). Maximum piezoelectricity in a few unit-cell thick planar ZnO -A liquid metal-based synthesis approach. *Materials Today*, 44, 69-77.
- [38] Kürşat, İ. Ç. İ. N., Öztürk, S., ÇAKIL, D. D., SÜN BÜL, S. E. (2021). Mechanochemical synthesis of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ from recycled mill scale: Effect of synthesis time on phase formation and magnetic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159787.
- [39] Anokhin, E. O., Trusov, L. A., Kozlov, D. A., Chumakov, R. G., Sleptsova, A. E., Uvarov, O. V., Kazin, P. E. (2019). Silica coated hard-magnetic strontium hexaferrite nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 30(9), 1976-1984.
- [40] 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.
- [41] Altbir, D., e Castro, J. D. A., Vargas, P. (1996). Magnetic coupling in metallic granular systems. *Physical Review B*, 54(10), R6823.
- [42] Zeng, H., Sun, S., Vedantam, T. S., Liu, J. P., Dai, Z. R., Wang, Z. L. (2002). Exchange-coupled FePt nanoparticle assembly. *Applied physics letters*, 80(14), 2583-2585.

- [43] Tsouris, C., Scott, T. C. (1995). Flocculation of paramagnetic particles in a magnetic field. *Journal of colloid and interface science*, 171(2), 319-330.
- [44] Scholten, P. C. (1983). How magnetic can a magnetic fluid be?. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 39(1-2), 99-106.
- [45] Sözeri, H., Deligöz, H., Kavas, H., Baykal, A. (2014). Magnetic, dielectric and microwave properties of M–Ti substituted barium hexaferrites (M= Mn²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺). *Ceramics International*, 40(6), 8645-8657.
- [46] Sadamura, H., Sugita, N., Maekawa, M., Nagai, N. (1994). Magnetic properties of modified Ba-ferrite particles. *Journal of Applied Physics*, 75(10), 5559-5561.
- [47] Ishikawa, A., Tanahashi, K., Futamoto, M. (1996). Magnetic and structural properties of Ba–ferrite films prepared by sol-gel processing. *Journal of applied physics*, 79(9), 7080-7083.
- [48] Sanida, A., Stavropoulos, S., Speliotis, T., Psarras, G. C. (2018). Magneto-dielectric behaviour of M-type hexaferrite/polymer nanocomposites. *Materials*, 11(12), 2551.
- [49] Acharya, S., Ray, J., Patro, T. U., Alegaonkar, P., Datar, S. (2018). Microwave absorption properties of reduced graphene oxide strontium hexaferrite/poly (methyl methacrylate) composites. *Nanotechnology*, 29(11), 115605.
- [50] Hanemann, T., Szabó, D. V. (2010). Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications. *Materials*, 3(6), 3468-3517.
- [51] Schadler, L. S., Brinson, L. C., Sawyer, W. G. (2007). Polymer nanocomposites: A small part of the story. *Jom*, 59, 53-60.
- [52] Sanida, A., Stavropoulos, S. G., Speliotis, T., Psarras, G. C. (2018). Magnetic nanoparticles–polymer matrix nanodielectrics: Manufacturing, characterization and functionality. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 27491-27499.
- [53] Psarras, G. C. (2018). Editorial corner—a personal view A'backstage force': magnetic properties of polymer composites. *Express Polymer Letters*, 12(9), 767-767.
- [54] Psarras, G. C. (2010). Conductivity and dielectric characterization of polymer nanocomposites. In *Physical properties and applications of polymer nanocomposites* (pp. 31-69). Woodhead Publishing.
- [55] Mallakpour, S., Behranvand, V. J. E. P. L. (2016). Polymeric nanoparticles: Recent development in synthesis and application. *Express Polymer Letters*, 10(11), 895.

- [56] Ouyang, Z. W., Chen, E. C., Wu, T. M. (2015). Thermal stability and magnetic properties of polyvinylidene fluoride/magnetite nanocomposites. *Materials*, 8(7), 4553-4564.
- [57] Rittigstein, P., Torkelson, J. M. (2006). Polymer–nanoparticle interfacial interactions in polymer nanocomposites: confinement effects on glass transition temperature and suppression of physical aging. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(20), 2935-2943.
- [58] Safronov, A. P., Mikhnevich, E. A., Lotfollahi, Z., Blyakhman, F. A., Sklyar, T. F., Larrañaga Varga, A., Kurlyandskaya, G. V. (2018). Polyacrylamide ferrogels with magnetite or strontium hexaferrite: Next step in the development of soft biomimetic matter for biosensor applications. *Sensors*, 18(1), 257.
- [59] Khabirova, S., Aleshin, G., Anokhin, E., Shchukina, A., Zubenko, A., Fedorova, O., Kalmykov, S. (2023). Novel candidate theranostic radiopharmaceutical based on strontium hexaferrite nanoparticles conjugated with azacrown ligand. *Dalton Transactions*, 52(6), 1731-1741.
- [60] Modoga, D. U. I., Antes, R., de la Pavimentación, d. Y. D. 1. Materiales compuestos de matriz polimérica usados para el blindaje de interferencia electromagnética.
- [61] Maramu, N., Sriramulu, G., Ramesh, T., Ravinder, D., Katlakunta, S., Babu, T. A., Prasad, N. K. (2021). Crystal chemistry, Rietveld analysis, magnetic and microwave properties of Cu-doped strontium hexaferrites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 10376-10387.
- [62] Sahu, N., Parija, B., Panigrahi, S. (2009). Fundamental understanding and modeling of spin coating process: A review. *Indian Journal of Physics*, 83(4), 493-502.
- [63] Mera-Córdoba, J. A., Mera-Córdoba, M. A., Córdoba-Barahona, C. A. (2017). Spin Coating technique for obtaining nanometric thin films in the system $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(44), 125-133.
- [64] Wantana, K., Aniwat, P., Bunlue, S., Alongkot, T., Anusit, K., Pisist, K. (2017). Study of thin film coating technique parameters for low cost organic solar cells fabrication. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 6626-6632.
- [65] Lawrence, C. J. (1988). The mechanics of spin coating of polymer films. *The Physics of fluids*, 31(10), 2786-2795.
- [66] Reiter, G., Ramezani, F., Baschnagel, J. (2022). The memory of thin polymer films generated by spin coating. *The European Physical Journal E*, 45(5), 51.

- [67] Nha, T. T. N., Nam, P. H., Thanh, T. D., Phong, P. T. (2023). Determination of the crystalline size of hexagonal $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0.3$) nanoparticles from X-ray diffraction—a comparative study. *RSC advances*, 13(36), 25007-25017.
- [68] Mora-Herrera, D., Pal, M. (2022). A comprehensive study of X-ray peak broadening and optical spectrum of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanocrystals for the determination of microstructural and optical parameters. *Applied Physics A*, 128(11), 1008.
- [69] Giannini, C., Ladisa, M., Altamura, D., Siliqi, D., Sibillano, T., De Caro, L. (2016). X-ray diffraction: a powerful technique for the multiple-length-scale structural analysis of nanomaterials. *Crystals*, 6(8), 87.
- [70] Rostek, A., Loza, K., Heggen, M., Epple, M. (2019). X-ray powder diffraction to analyse bimetallic core–shell nanoparticles (gold and palladium; 7–8 nm). *RSC advances*, 9(46), 26628-26636.
- [71] Andronenko, S. I., Nikolaev, A. M., Suharzhevsky, S. M., Sinelnikov, A. A., Kovalenko, A. S., Ivanova, A. G., Shilova, O. A. (2023). Phase composition and magnetic properties of nanoparticles with magnetite–maghemite structure. *Ceramics*, 6(3), 1623-1631.
- [72] Nha, T. T. N., Nam, P. H., Thanh, T. D., Phong, P. T. (2023). Determination of the crystalline size of hexagonal $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x=0.3$) nanoparticles from X-ray diffraction—a comparative study. *RSC advances*, 13(36), 25007-25017.
- [73] Dittrich, H., Bieniok, A. (2009). Measurement methods| structural properties: X-ray and neutron diffraction.
- [74] Hassanzadeh-Tabrizi, S. A. (2023). Precise calculation of crystallite size of nanomaterials: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 968, 171914.
- [75] Leineweber, A. (2023). The cu–sn system: A comprehensive review of the crystal structures of its stable and metastable phases. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 44(3), 343-393.
- [76] Baerlocher, C., McCusker, L. B. (1994). Practical aspects of powder diffraction data analysis. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 85, 391-428.
- [77] Misture, S. T. (2021). X-ray powder diffraction.
- [78] Hassanzadeh-Tabrizi, S. A. (2023). Precise calculation of crystallite size of nanomaterials: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 968, 171914.
- [79] Runcevski, T., Brown, C. M. (2021). The Rietveld refinement method: Half of a century anniversary. *Crystal Growth & Design*, 21(9), 4821-4822.

- [80] dos Santos, A. G., Fontes, F. A., de Sousa, J. F., de Souza, C. P. (2011). Síntesis y Refinado por el Método Rietveld de la fase perovskita obtenida a partir del Método de Co-precipitación vía Oxalato. *Información tecnológica*, 22(1), 17-28.
- [81] Landeros-Velázquez, V. I., Herrera-Pérez, G., Vargas-Bernal, R., Ramos-Ramírez, E. (2021). Aplicación del refinamiento Rietveld para la identificación de fases del ZnO obtenido por precipitación química. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9, 90-96.
- [82] El-Azazy, M. (Ed.). (2019). *Infrared Spectroscopy: Principles, Advances, and Applications*.
- [83] Ikan, R., Crammer, B. (2003). *Organic Chemistry, Compound Detection*.
- [84] Michael B. Eyring, (2003). *Spectroscopy in Forensic Science, Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, Academic Press, Pages 637-643.
- [85] Thompson, J. M. (2018). *Infrared spectroscopy*. Jenny Stanford Publishing.
- [86] Anderson, J. M., Voskerician, G. (2010). The challenge of biocompatibility evaluation of biocomposites. In *Biomedical composites* (pp. 325-353). Woodhead Publishing.
- [87] Frost, M. S., Dempsey, M. J., Whitehead, D. E. (2017). The response of citrate functionalised gold and silver nanoparticles to the addition of heavy metal ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 518, 15-24.
- [88] Hu, R. G., Zhang, S., Bu, J. F., Lin, C. J., Song, G. L. (2012). Recent progress in corrosion protection of magnesium alloys by organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 73(2-3), 129-141.
- [89] Zacharioudaki, D. E., Fitis, I., Kotti, M. (2022). Review of fluorescence spectroscopy in environmental quality applications. *Molecules*, 27(15), 4801.
- [90] Berezin, M. Y., Achilefu, S. (2010). Fluorescence lifetime measurements and biological imaging. *Chemical reviews*, 110(5), 2641-2684.
- [91] English, C., Kitzhaber, Z., Williams, J., Humphries, A., Myrick, M. (2021). Challenges of Spectrofluorometry, Part 1: Collect Data Right the First Time.
- [92] French, S. A., Territo, P. R., Balaban, R. S. (1998). Correction for inner filter effects in turbid samples: fluorescence assays of mitochondrial NADH. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 275(3), C900-C909.
- [93] Bigger, S. W., Bigger, A. S., Ghiggino, K. P. (2014). FluSpec: A Simulated Experiment in Fluorescence Spectroscopy.

- [94] Karoui, R., Blecker, C. (2011). Fluorescence spectroscopy measurement for quality assessment of food systems—a review. *Food and Bioprocess technology*, 4, 364-386.
- [95] Li, X. Y., Li, N., Luo, H. D., Lin, L. R., Zou, Z. X., Jia, Y. Z., Li, Y. Q. (2011). A novel synchronous fluorescence spectroscopic approach for the rapid determination of three polycyclic aromatic hydrocarbons in tea with simple microwave-assisted pretreatment of sample. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(11), 5899-5905.
- [96] Sunuwar, S., Haddad, A., Acheson, A., Manzanares, C. E. (2024). Synchronous Fluorescence as a Sensor of Trace Amounts of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Sensors*, 24(12), 3800.
- [97] Oleksiievets, N., Thiele, J. C., Weber, A., Gregor, I., Nevskiy, O., Isbaner, S., Enderlein, J. (2020). Wide-field fluorescence lifetime imaging of single molecules. *The Journal of Physical Chemistry A*, 124(17), 3494-3500.
- [98] Shen, T., Zhan, Y., Shi, L. (2022). Time-Resolved Spectroscopy for the Study of Perovskite. *Chinese Journal of Electronics*, 31(6), 1053-1071.
- [99] Prasad, R. D., Sarvalkar, P. D., Prasad, N., Prasad, S. R., Prasad, R. S., Prasad, R. B., Ghosh, J. (2024). A Review on Spectroscopic Techniques for Analysis of Nanomaterials and Biomaterials. *ES Energy & Environment*, 27, 1264.
- [100] Viger, M. L., Sheng, W., McFearin, C. L., Berezin, M. Y., Almutairi, A. (2013). Application of time-resolved fluorescence for direct and continuous probing of release from polymeric delivery vehicles. *Journal of Controlled Release*, 171(3), 308-314.
- [101] Ronceray, N., Bennani, S., Mitsioni, M. F., Siegel, N., Marcaida, M. J., Bruschini, C., Radenovic, A. (2024). Wide-field fluorescence lifetime imaging of single molecules with a gated single-photon camera. *bioRxiv*, 2024-09.
- [102] Ali, A., Zhang, N., Santos, R. M. (2023). Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): a review of the fundamentals, advancements, and research directions. *Applied Sciences*, 13(23), 12600.
- [103] Cao, Y., Zhang, K., Liu, S., Wang, Y. (2024). A review of advancements in the theory and characterization of soil macropore structure. *PeerJ*, 12, e18442.
- [104] Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S. R., Chougule, M. B., Tekade, R. K. (2019). Importance of physicochemical characterization of nanoparticles in pharmaceutical product development. In *Basic fundamentals of drug delivery* (pp. 369-400). Academic Press.

- [105] Omid, M., Fatehinya, A., Farahani, M., Akbari, Z., Shahmoradi, S., Yazdian, F., Vashae, D. (2017). Characterization of biomaterials. In *Biomaterials for oral and dental tissue engineering* (pp. 97-115). Woodhead Publishing.
- [106] L.T. Gibson (2005), ARCHAEOOMETRY AND ANTIQUE ANALYSIS | Art and Conservation, Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition), pp 123-127, Elsevier.
- [107] Gutierrez, R., Perez M., Mendez J. V., Vazquez I., (2007). A novel approach to the oral delivery of bionanostructures for systemic disease. *Nanostructures for oral medicine*. Elsevier. 27-59.
- [108] Zhou, Weilie. Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM)." *Scanning microscopy for nanotechnology: techniques and applications* (2007): 1-40.
- [109] Pavko, A., (2014), Slovenica, Acta Chimica. Anniversary Issue.
- [110] Butt, H., Brunero C., and Kappl M., (2005). Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. *Surface science reports* 59.1-6 (2005): 1-152.
- [111] Garcia, R., Perez R., (2002). Dynamic atomic force microscopy methods. *Surface science reports*, 47, 197-301.
- [112] García, A., Kikut, K., (2020), Microscopía de fuerza atómica como herramienta en la investigación de asfaltos. *Infraestructura vial*, 20-27,
- [113] Ali, Arbab, et al. (2021), Review on recent progress in magnetic nanoparticles: Synthesis, characterization, and diverse applications. *Frontiers in chemistry*.
- [114] Mittal, A., Roy, I., Gandhi, S., (2022). Magnetic nanoparticles: An overview for biomedical applications. 107, *Magnetochemistry*.
- [115] 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.
- [116] 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.

- [117] Zhang, C., Liu, X., Rehman, K. M. U., Liu, C., Li, H., Meng, X. (2017). Structural and properties of hydrothermally synthesised M-type hexaferrites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 4593-4597.
- [118] Tang, C. M., Tian, Y. H., Hsu, S. H. (2015). Poly (vinyl alcohol) nanocomposites reinforced with bamboo charcoal nanoparticles: mineralization behavior and characterization. *Materials*, 8(8), 4895-4911.
- [119] Arya, A., Sharma, A. L. (2018). Structural, microstructural and electrochemical properties of dispersed-type polymer nanocomposite films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(4), 045504.
- [120] Mostafa, M., Abdelhakim, N. A., Hemeda, O. M., Shalaby, R. M., & Salem, B. I. (2024). Incorporation of magnetic filler (Co_{0.2}Zn_{0.2}Cd_{0.6}Fe₂O₄) in PVA matrix and studying the structural, optical and mechanical properties of nanocomposite films. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 34(8), 3736-3753.
- [121] García-Cerda, L. A., Escareno-Castro, M. U., Salazar-Zertuche, M. (2007). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol–cobalt ferrite nanocomposites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(8-10), 808-810.
- [122] Al-Sagheer, L. A. M., Rajeh, A. (2023). Synthesis, characterization, electrical, and magnetic properties of polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose blend doped with nickel ferrites nanoparticles for magneto-electronic devices. *Polymer Composites*, 44(10), 7156-7169.
- [123] Mngadi, S., Singh, M., Mokhosi, S. (2021). PVA coating of ferrite nanoparticles triggers pH-responsive release of 5-fluorouracil in cancer cells. *Journal of Polymer Engineering*, 41(7), 597-606.
- [124] Mostafa, M., Abdelhakim, N. A., Hemeda, O. M., Shalaby, R. M., Salem, B. I. (2024). Incorporation of magnetic filler (Co_{0.2}Zn_{0.2}Cd_{0.6}Fe₂O₄) in PVA matrix and studying the structural, optical and mechanical properties of nanocomposite films. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 34(8), 3736-3753.
- [125] Zahid, M., Khan, H. M., Buzdar, S. A., Akhter, T., Nadeem, M., Anjum, R., Imran, M. (2022). Structural, dielectric, and magnetic properties of Sr_{0.7}Cr_{0.3}Fe₁₂O₁₉–polyvinyl alcohol nano-composites. *Applied Physics A*, 128(12), 1051.
- [126] Liang, T., Shan, T. R., Cheng, Y. T., Devine, B. D., Noordhoek, M., Li, Y., Sinnott, S. B. (2013). Classical atomistic simulations of surfaces and heterogeneous interfaces with the charge-optimized many body (COMB) potentials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(9), 255-279.

- [127] Dhanaraju, G., Ben, B. S., Pittala, R. K. (2022). Thermally remendable bismaleimide-MWCNT/DA-epoxy nanocomposite via Diels-Alder bonding. *Polymer*, 245, 124734.
- [128] Belaya, S., Korolkov, I., Maksimovskii, E., Rakhmanova, M., Asanov, I., Shayapov, V., Shapovalova, A. (2021). Investigation of the phase composition and photoluminescence of CVD $(Y_x Gd_y Eu_z)_{2O_3}$ films on Si substrates after annealing in the air. *Journal of Luminescence*, 233, 117842.
- [129] Ortiz-Vergara, V. A., Garza-Navarro, M. A., González-González, V. A., López-Cuellar, E., Estrada-de la Vega, A. (2025). Interactions between magnetic and luminescent phases in hybrid nanomaterials composed of magnetite nanoparticles assembled within a cross-conjugated polymer. *Materials Science and Engineering: B*, 313, 117901.
- [130] Rahman, M. L., Rahman, S., Biswas, B., Ahmed, M. F., Rahman, M., Sharmin, N. (2023). Investigation of structural, morphological and magnetic properties of nanostructured strontium hexaferrite through co-precipitation technique: Impacts of annealing temperature and Fe/Sr ratio. *Heliyon*, 9(3).
- [131] Schadler, L. (2007). Model interfaces. *Nature materials*, 6(4), 257-258.
- [132] Mahmood, H. S., Habubi, N. F. (2022). Structural, mechanical and magnetic properties of PVA-PVP: iron oxide nanocomposite. *Applied Physics A*, 128(11), 956.
- [133] Zhu, S., Huang, K., Ni, J., Kan, X., Lv, Q., Cheng, Y., Liu, X. (2022). Magnetic and microwave absorption properties of Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄/SrFe₁₂O₁₉ composites. *Materials Chemistry and Physics*, 288, 126398.
- [134] Zouari, M., Stanciu, S. G., Jakes, J., Marrot, L., Fiorentis, E., Stanciu, G. A., DeVallance, D. B. (2023). Investigations on the topography and micro-mechanical properties of polyvinyl alcohol thin-film composites reinforced with hardwood biocarbon particles. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 5533-5540.
- [135] Usawattanakul, N., Torgbo, S., Sukyai, P., Khantayanuwong, S., Puangsin, B., Srichola, P. (2021). Development of nanocomposite film comprising of Polyvinyl Alcohol (PVA) incorporated with bacterial cellulose nanocrystals and magnetite nanoparticles. *Polymers*, 13(11), 1778.
- [136] Li, L., Wang, W., Sun, J., Chen, Z., Ma, Q., Ke, H., Yang, J. (2022). Improved properties of polyvinyl alcohol films blended with aligned nanocellulose particles induced by a magnetic field. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100985.

- [137] Stingaciu, M., Topole, M., McGuinness, P., Christensen, M. (2015). Magnetic properties of ball-milled SrFe₁₂O₁₉ particles consolidated by Spark-Plasma Sintering. *Scientific reports*, 5(1), 14112.
- [138] Wang, S., Zheng, J., Cai, W., Qiao, L., Ying, Y., Chen, H., Che, S. (2024). High coercivity in Sm-doped SrFe₁₂O₁₉ powders with spherical morphology prepared by ultrasonic spray pyrolysis. *Ceramics International*, 50(6), 9510-9519.
- [139] Nikolenko, P. I., Nizamov, T. R., Bordyuzhin, I. G., Abakumov, M. A., Baranova, Y. A., Kovalev, A. D., Shchetinin, I. V. (2022). Structure and magnetic properties of SrFe_{12-x}In_xO₁₉ compounds for magnetic hyperthermia applications. *Materials*, 16(1), 347.

Artículos publicados

1. *Magnetic, structural, and fluorescence properties of Sr-hexaferrite nanoparticles embedded in a PV-OH film.* **B.N. López-Gutiérrez**, A.M. Herrera-González, S. Aranda-Espinoza, K. Alemán-Ayala, V. E. Salazar-Muñoz, J.G. Cabal-Velarde, I.E. Castaneda-Robles, A. Lobo-Guerrero. *Physica B: Physics of Condensed Matter*. Vol 632 (2022) 413764. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413764>
2. *Optical and structural behavior of a magneto-polymer film obtained under low magnetic field exposure.* A. Lobo Guerrero, **B.N. López-Gutiérrez**, A.M. Herrera-González, J.R. Martínez, M. Villanueva Ibañez, K. Alemán-Ayala, E.E. Hernández-Vázquez, G. Ortega Zarzosa. *Physica B: Condensed Matter*. Vol 700 (2025) 416956. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.416956>
3. *Influence of strontium hexaferrite nanoparticles incorporation on polyvinyl alcohol films topography.* F.A. Duarte Escorza, B.N. López Gutiérrez, M. Villanueva Ibañez, G. Ortega Zarzosa, A. Lobo Guerrero. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI* (Aceptado para su publicación)