

Obtención, caracterización y aplicaciones de materiales nanoestructurados para el desarrollo fenológico del cultivo de la lechuga

Obtaining, characterization and applications of magnetic materials in the phenological development of lettuce cultivation

Pedro Antonio Mariño-Castellanos^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-1199-0567>

Eduardo Fernández-Santiesteban¹ <https://orcid.org/000-0002-8313-2100>

Arles Vega-García¹ <https://orcid.org/0000-0002-0147-2910>

Yadir Hidalgo-Peña¹ <https://orcid.org/0009-0002-9072-1030>

Nuris Ludmila Castellanos Hall¹ <https://orcid.org/0009-0008-8340-441X>

¹Departamento Física, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Universidad de Holguín, Cuba.

*Autor para la correspondencia: pamarcast@uho.edu.cu

Recibido: 13 de octubre de 2023

Aprobado: 5 de diciembre de 2023

Resumen

En esta investigación, se aplican expresiones semiempíricas, para el cálculo de los principales parámetros cinéticos de obtención de fases del tipo: $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Dp}^{2+}, \text{Dj}^{4+})_x\text{O}_{19}$ ($\text{BaM}+(\text{Dp}^{2+}, \text{Dj}^{4+})_x$). Fue actualizada la última variante de un modelo fenomenológico, de distribución de cationes en los diferentes sitios de la estructura cristalográfica, para la predicción de algunas propiedades físicas, antes y después de ser dopadas las muestras. La interpretación física de las caracterizaciones estructurales, micro-estructurales, y magnéticas de las fases obtenidas, fue realizada. La interpretación física de las caracterizaciones físico-químicas realizadas, da lugar al diseño potencial de aplicaciones de estos compuestos, como imanes permanentes. En esta propuesta se da como ejemplo de aplicación a escala de laboratorio, la utilización de uno de estos imanes de $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x\text{O}_{19}$ ($\text{BaM}+(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$) para el estudio cualitativo, de todo el desarrollo fenológico de plantas de lechugas, en un campo magnético permanente.

Palabras clave: modelo fenomenológico, materiales nanoestructurados, hexaferritas tipo-M, Lechugas.

Abstract

In this research, semi-empirical expressions are applied to calculate the main kinetic parameters for obtaining phases of the type: $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Dp}^{2+}, \text{Dj}^{4+})_x\text{O}_{19}$ ($\text{BaM} + (\text{Dp}^{2+}, \text{Dj}^{4+})_x$). The latest variant of a phenomenological model of cations distribution in the different sites of the crystallographic structure was updated for the prediction of some physical properties, before and after the samples are doped. The physical interpretation of the structural, microstructural, thermal, and magnetic characterizations of the phases obtained were carried out. The physical interpretation of the physical-chemical characterizations carried out gives rise to the potential design of applications of these compounds, as permanent magnets. This proposal proposes as an example of application, on a laboratory scale, the use of these $\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x\text{O}_{19}$ ($\text{BaM} + (\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$) magnets for the qualitative study of the entire phenological development of lettuce plants, in a permanent magnetic field.

Keywords: Phenomenological model, Nanostructured materials, M-type hexaferrite, Lettuce plants.

INTRODUCCIÓN

La comprensión del efecto de diferentes cationes en la microestructura y propiedades magnéticas de la hexaferritas tipo M, es una de las tareas más importantes relacionadas con las investigaciones científicas y el uso de estos materiales en aplicaciones tecnológicas.^(1,2,3,4) Hay varias formas de modificar las propiedades físicas de las ferritas tipo M; mediante el uso de dopantes: la sustitución en el sitio cristalográfico del catión diamagnético (Ba^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+}),^(2,5) la sustitución en los sitios $\text{Fe}^{3+(2-5)}$ y tanto en los sitios del catión divalente como en los sitios del Fe^{3+} , simultáneamente.^(1,2,4)

Pocos estudios teóricos se han reportado sobre las hexaferritas tipo M, en relación con la distribución de cationes en los diferentes sitios cristalográficos de esta estructura cristalina.^(5,6)

La finalidad de la modelación fenomenológica es obtener el mejor modelo en el contexto científico del problema que se analiza. En ese sentido, se reporta la modificación del modelo de distribución de cationes dopantes para la hexaferrita de bario tipo-M (BaM),^(7,8) tanto en los sitios del hierro, como en el sitio del bario. En el modelo ya reportado,⁽⁷⁻⁸⁾ las expresiones básicas se fundamentan en la comparación entre los parámetros fenomenológicos de los cationes sustitutos, respecto al “dueño” de cada sitio.

En la modificación presentada en este trabajo, se supone que cada catión involucrado en la red cristalina, puede ser descrito por cada uno de los parámetros independientes relacionados con el cumplimiento, de las cinco reglas de Pauling: poliedro de coordinación (relacionada con los radios iónicos y los poliedros de coordinación; principio electrostático de valencia, “fuerza de enlace”, (referido al potencial iónico, la carga por sitio y el número atómico efectivo); compartición de poliedros que implica una concentración crítica por sitio en el interior de cada estructura; evasión de cationes (límita la valencia de los cationes involucrados) y principio de parsimonia (homogeneidad ambiental), referida a la preferencia de entornos análogos para cationes químicamente similares. El dopaje, puede ocurrir, en los sitios cristalográficos Ba^{2+} o Fe^{3+} , con uno y dos dopantes (Dj, sustituto trivalente o cuatrivalente y Dp, ion di o trivalente); expresadas por distribuciones estadísticas del tipo gaussianas. Este enfoque permite una mejor interpretación de la cinética de obtención de las

muestras, mayor congruencia entre las predicciones de las propiedades estructurales, térmicas, y magnéticas respecto a los datos experimentales.

Por otra parte, aunque desde la década de los 50 del siglo pasado se realizan intervenciones magnéticas a semillas y cultivos para aumentar su calidad y productividad, aún no se ha logrado que esta técnica física puede ser establecida, como de uso frecuente en la agricultura. El principal obstáculo radica en la determinación de la densidad de campo magnético por utilizar, y el tiempo en que la planta será sometida al mismo.⁽⁹⁾ Las plantas que crecen en la tierra se ven afectadas por el campo geomagnético de la misma con una intensidad de 50–60 μT .⁽⁹⁾

Muchos aspectos del crecimiento de plantas, germinación de semillas, rendimiento, calidad y productividad de las cosechas, en presencia de campos magnéticos, son investigados en la actualidad.⁽¹⁰⁾

El objetivo de este trabajo es reportar la congruencia entre las predicciones del modelo fenomenológico modificado y los resultados experimentales de la caracterización del sistema bajo estudio ($\text{BaFe}_{12-2x}(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x\text{O}_{19}$), así como el uso de los imanes obtenidos de la fase $\text{BaFe}_{11,60}(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_{0,2}\text{O}_{19}$, para el estudio fenomenológico, desde el punto de vista cualitativo, del cultivo de lechuga a escala de laboratorio, durante toda la cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se obtuvieron por el método cerámico tradicional, utilizando BaCO_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 y CoO , como compuestos iniciales. Se mezclaron en la relación estequiométrica requerida, de acuerdo con la fórmula química $\text{BaFe}_{(12-2x)}\text{Dp}_x\text{Dj}_x\text{O}_{19}$, donde $\text{Dp} = \text{Co}^{2+}$ y $\text{Dj} = \text{Ti}^{4+}$.^(7,8)

La caracterización estructural se realizó a partir de los patrones de difracción de rayos X, y la longitud de onda de la radiación fue $\text{Co } (\lambda [k\alpha 1]) = 1,7889 \text{ \AA}$. El análisis de fase cualitativa se llevó a cabo mediante el método de Hanawalt, implementado en el software Match Phase Identification from Powder Diffraction. Cada patrón de difracción fue refinado por el método de Rietveld, utilizando el software Fullprof.^(8,11,12)

El estudio magnético fue realizado con un Magnetómetro de la Muestra Vibrante (VSM) del tipo Versalab-Quantum Design, modelo MPMS-5, con sistema de instrumentación de alta tecnología y sensor SQUID. Fueron medidas las curvas de magnetización inicial desde 0 hasta 25 KOe y los lazos de histéresis de -25 hasta 25 KOe.

Ejemplo de aplicación de intervención magnética en la lechuga, variedad Fomento

En este estudio, fueron utilizados discos de 9,0 milímetros de diámetros y 6,0 milímetros de espesor, de la fase, BaM dopados con $(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_{0,2}$ en los sitios del hierro. Fue escogida esta fase por ser el conjunto de imanes (40) con el campo adecuado para esta planta. El campo magnético remanente de estos pequeños imanes, en promedio, fue de 32,5 mT. Los imanes fueron colocados pegados a las semillas de lechuga durante todo el tiempo de germinación. Luego de germinada la planta, se mantuvo el campo magnético en la raíz de la misma durante todo el tiempo de duración del experimento. La germinación fue realizada en dos bandejas de aluminio, una para el control o testigo, y la otra para el experimento. Hasta su trasplante, se mantuvieron en el laboratorio de investigación del Departamento de Física de la Universidad de Holguín, y posteriormente fueron sembradas en un cantero semiprotegido en el organopónico "Lidia Doce", del municipio Holguín. El estudio fue realizado entre los meses de mayo y junio del 2021.

Aspectos esenciales del modelo fenomenológico de distribución de cationes

Desde el punto algorítmico, la modificación fundamental respecto a lo reportado en la referencia ⁽⁸⁾ es: el cálculo de los factores de cota

y el factor de electronegatividad.

Para el primer caso, ahora se tienen en cuenta (1,1a,1b)

Factor de cota de cada dopante ($F_{cota_{aj}}$)

$$F_{cota_{aj}} = \text{abs}(f_{\min} - f_{\max}) \quad (1)$$

donde

$$f_{\min} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r_{dj}/r_{O}-V_{\min}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1a)$$

$$f_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{V_{\max}-r_{dj}/r_{O}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1b)$$

siendo: $f_{\min}(f_{\max})$ factor de cota mínima y máxima, r_{dj} radio del catión dopante en el sitio i-esimo, $V_{\min}(V_{\max})$, valor mínimo y máximo del poliedro estructural en función del número de coordinación para el sitio i-esimo, radio del oxígeno en el sitio i-esimo.

siendo $\sigma = 0,15$

Definido de forma análoga para el factor de cota del segundo dopante; $F_{cota_{Dp}}$ y el catión involucrado (en nuestro caso Fe^{3+}).

De modo análogo, el factor de cota para el catión, dueño del sitio (2, 2a, 2b), queda:

$$F_{cota_c} = \text{abs}(f_{\min_c} - f_{\max_c}) \quad (2)$$

donde

$$f_{\min_c} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r_c/r_{O}-V_{\min}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2a)$$

$$f_{\max_c} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{V_{\max}-r_c/r_{O}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2b)$$

Para el caso del parámetro de electronegatividad definido, ahora, teniendo en cuenta los cationes del entorno de un mismo sitio cristalográfico (catión dueño del sitio, anión de oxígeno y ambos dopantes (Dj, Dp)), tendremos (3):

Siendo: Ent^{Dp} la electronegatividad debida al "entorno" del dopante Dp formado por las electronegatividades del dopante, los oxigenos, el catión dueño del sitio y el dopante Dj ; definido. A continuación de forma análoga para la electronegatividad debida al "entorno" del dopante Dj (3a)

$$Ent^{Dp} = \sum_1^3 \frac{1}{3} [\exp^{-0.25(E^{Dp}-E^O)^2} + \exp^{-0.25(E^{Dp}-E^C)^2} + \exp^{-0.25(E^{Dp}-E^{Dj})^2}] \quad (3)$$

$$Ent^{Dj} = \sum_1^3 \frac{1}{3} [\exp^{-0.25(E^{Dj}-E^O)^2} + \exp^{-0.25(E^{Dj}-E^C)^2} + \exp^{-0.25(E^{Dp}-E^{Dj})^2}] \quad (3a)$$

$$FE^{DpDj} = 1 - \frac{1}{2} [Ent^{Dj} + Ent^{Dp}] \quad (3b)$$

(Parámetro de electronegatividad de la pareja de dopante)

$$FE^C = 1 - e^{\left(-0.25(E^C - E^O)^2\right)} \quad (3c)$$

(Parámetro de electronegatividad del catión)

De aquí que teniendo en cuenta las expresiones (1), (3b) y los parámetros fenomenológicos tal y como fueron definidos en,^(7,8) se redefinen el índice de sustitución general IS_g^{Dj} :

$$IS_g^{Dj} = F_{cota}^{Dj} FE^{DpDj} \prod_{k=1}^4 F_k^{Dj} \quad (4)$$

(Índice de sustitución general para el dopante j-ésimo)

De igual modo, teniendo en cuenta las expresiones (1), (3b) y los parámetros fenomenológicos tal y como fueron definidos en(7,8), se redefinen el índice de sustitución general IS_g^{Dp} :

$$IS_g^{Dp} = F_{cota}^{Dp} FE^{DpDj} \prod_{k=1}^4 F_k^{Dp} \quad (5)$$

(Índice de sustitución general para el dopante principal)

Análogamente las expresiones (1), (3c) y los parámetros fenomenológicos tal y como fueron definidos en(7,8), se redefina el índice de sustitución general IS_g^C :

$$IS_g^C = F_{cota}^C F_e^C \prod_{k=1}^4 F_k^C \quad (6)$$

(Índice general para el catión)

donde se observa, que ahora todas las expresiones para cada catión dueño de sitio y los dopantes investigados, son tratados de formas independientes a diferencia de las expresiones reportadas en,⁽⁸⁾ usando, a partir de aquí, las mismas expresiones de cantidad de cationes del dueño de la posición cristalográfica por sitio (CCS_i), cantidad cationes dopantes Dj (CCD_jS_i) y de la cantidad de cationes del dopante principal Dp (CCD_pS_i), determinadas en las referencias.^(7,8)

La magnetización de saturación teórica fue calculada a través de la expresión (7), de una generalización de la fórmula de Goter, discutidas en las referencias^(7,8):

$$M_S = \sum_{i=1}^5 (CCS_i * \mu_{Fe^{3+}} + CCD_jS_i * \mu_{Dj} + CCD_pS_i * \mu_{Dp}) \quad (7)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1a. se reportan los resultados de la DRX para el sistema BaM+ (Co²⁺, Ti⁴⁺)_x.

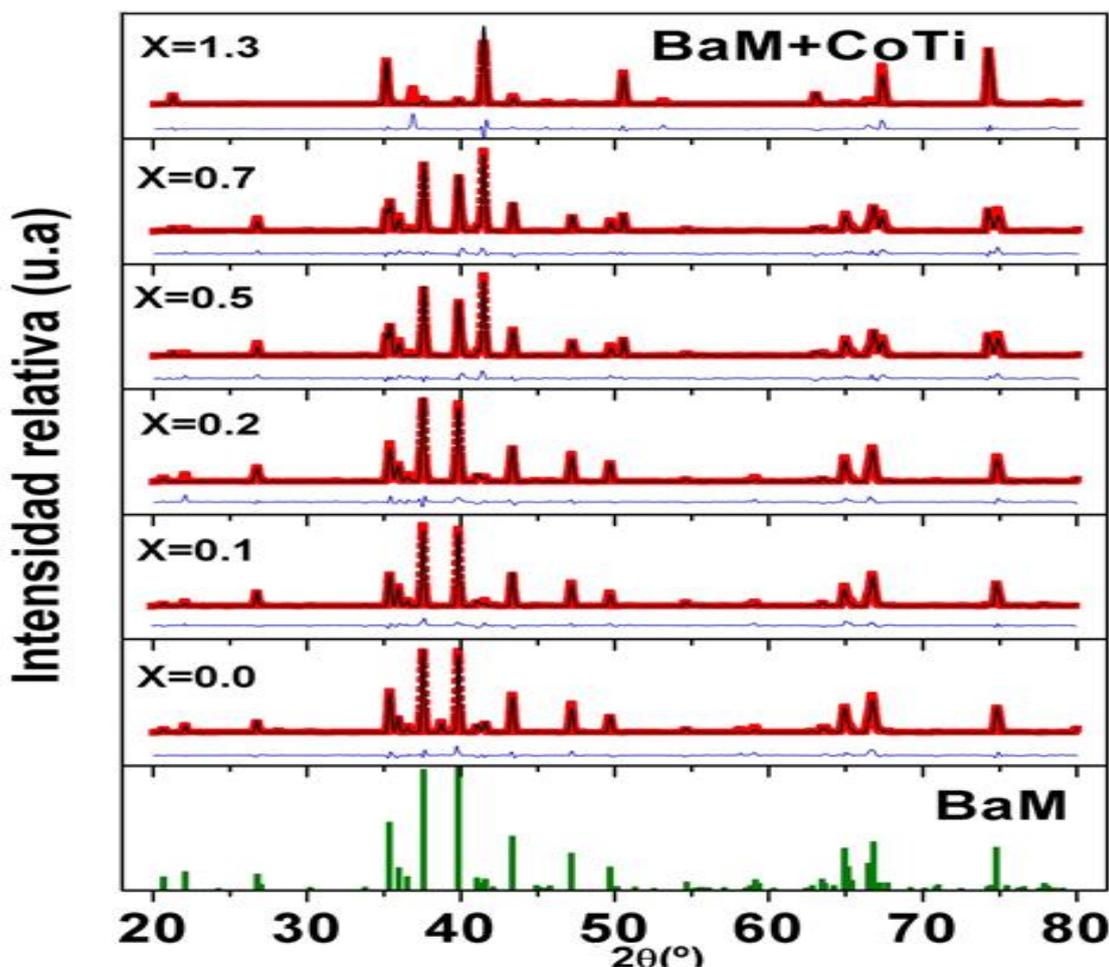
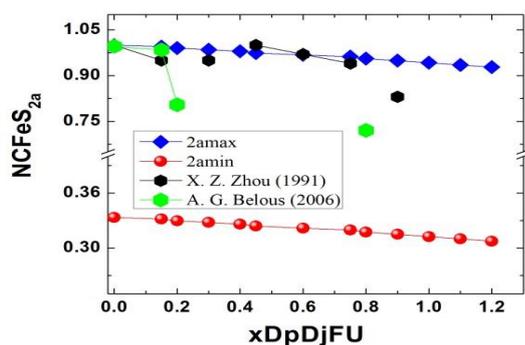


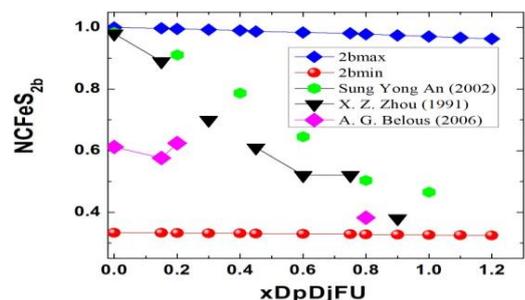
Fig. 1a. Difractogramas de DRX, para la BaM+(Co²⁺, Ti⁴⁺)_x. Las líneas en verde corresponden al patrón de DRX de la hexaferrita BaM pura. Las líneas azules, debajo de cada difractograma, refiere la calidad del refinamiento de Rietveld.

Se nota en la muestra para $x=0$, que entre las dos reflexiones mayores de la BaM aparece otra reflexión perteneciente a uno de los reaccionantes que no se descompuso totalmente, en este caso, el Fe_2O_3 .

También se identifica para $x=0,5$ que la distorsión de la red cristalina, debido a la presencia de los dopantes es tal, que las reflexiones características de la BaM comienzan a modificarse notablemente. Es por ello que se considera el valor crítico para esta pareja de dopantes.⁽⁸⁾



1b)



1c)

Figs. 1b y 1c. Comparación entre la modificación de la predicción teórica del modelo y los resultados experimentales reportados: 1b) en(11),(12), para el sitio “2a” del catión Fe^{3+} en la BaM+ $(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$ y 1c) en(11),(12),(13), para el sitio “2b” del catión Fe^{3+} en la BaM+ $(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$.

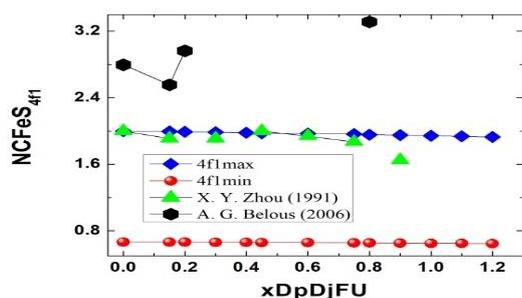


Fig. 1d. Comparación entre la modificación de la predicción teórica del modelo y los resultados

experimentales reportados en(12),(13), para el sitio “4f1” del catión Fe^{3+} en la BaM + $(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$.

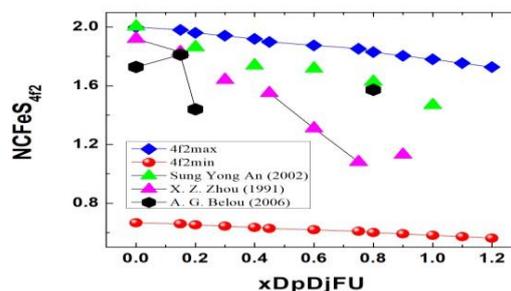


Fig. 1e. Comparación entre la modificación de la predicción teórica del modelo y los resultados experimentales reportados en(11),(12),(13), para el sitio “4f2” del catión Fe^{3+} en la BaM + $(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$.

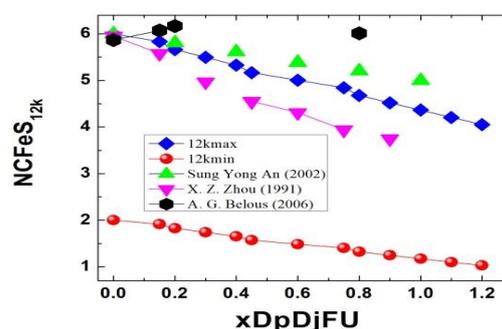


Fig. 1f. Comparación entre la modificación de la predicción teórica del modelo y los resultados experimentales reportados en(11),(12),(13), para el sitio “12k” del catión Fe^{3+} en la BaM + $(\text{Co}^{2+}, \text{Ti}^{4+})_x$.

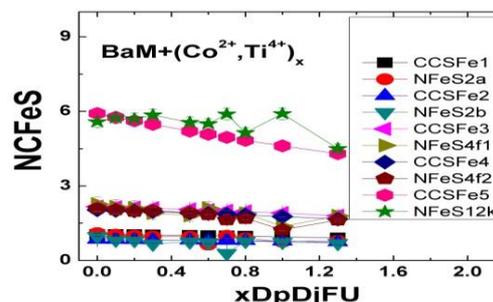


Fig. 1g. Comparación entre la cantidad de cationes de hierro, máximos, por sitios (CCSFei) calculados por el modelo actual y los determinados experimentalmente, del patrón de DRX, (NFeSi) a través del método de Rietveld.

En las figuras 1b) hasta la 1f), se reportan los resultados del modelo modificado, comparado con valores de la cantidad de catión de Fe^{3+} en cada uno de los sitios que ocupa dentro de la estructura de la BaM. Teniendo en cuenta, que se reportan valores máximos y mínimos de las predicciones del modelo; se sugiere que los valores máximos se relacionan con las condiciones de obtención óptimas (calculadas para las muestras sin dopar), y al variar las condiciones de calcinación con la cantidad y tipo

de dopante, dan lugar a los mínimos en la distribución de cationes por sitios dentro de la estructura, aspecto discutido de manera explícita en la referencia.⁽⁸⁾

En las figuras (1b-1f.) se observa, que la mayoría de las mediciones experimentales realizadas por diferentes autores se encuentran en el rango probable de los parámetros de calcinación, predicho por el modelo modificado, reportado en este trabajo.

En la figura 1g. se compara la cantidad de Fe^{3+} por sitio para los valores máximos calculados con el modelo en función de “x” y los resultados experimentales obtenidos del refinamiento por el método de Rietveld de los patrones de DRX, obtenidos para el sistema bajo estudio. La calidad de los resultados obtenidos se debe a las correcciones hechas en los parámetros de obtención de acuerdo con las predicciones del modelo.

En la figura 2, se reporta la comparación entre los resultados de las predicciones teóricas (ecuación 7), con la magnetización experimental para el modelo anterior (figura 2a.) y la modificación actual (figura 2b.). Se evidencia que al tener en cuenta todo el entorno del catión a dopar y no solo el mismo las predicciones teóricas son más congruentes con los resultados experimentales.

En lo adelante se reporta como la caracterización de los imanes obtenidos en el laboratorio pueden ser usados para el estudio, cualitativo, de la implementación magnética en cultivo de lechuga, tipo Fomento₂ durante todo su proceso fenológico.

Ejemplo de aplicación de los pequeños imanes permanentes a la semilla y raíz de la planta y su influencia en el crecimiento de lechuga

En el presente ejemplo de aplicación, se planteó como hipótesis que la aplicación de campos magnéticos estáticos (CME) sobre semillas de lechuga (*Lactuca sativa*), variedad Fomento, mejora sus parámetros de calidad germinativa e influyen, positivamente, en el desarrollo y crecimiento de la planta.

El experimento fue realizado dividiendo las semillas en dos grupos (treinta del experimento y treinta del control), con el fin de no tener en cuenta en el mismo los parámetros del suelo, ni la variedad de lechuga.^(14,15,16) Se realizó una

adecuada valoración de los parámetros magnéticos a tener presentes, de acuerdo con lo propuesto en la literatura consultada.^(14,15,16,17)

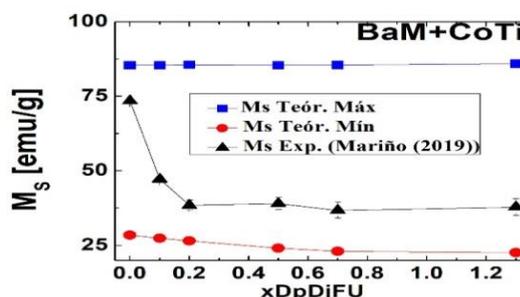


Fig. 2a. Comparación entre los resultados predichos por el modelo anterior y la medición experimental.⁽⁸⁾

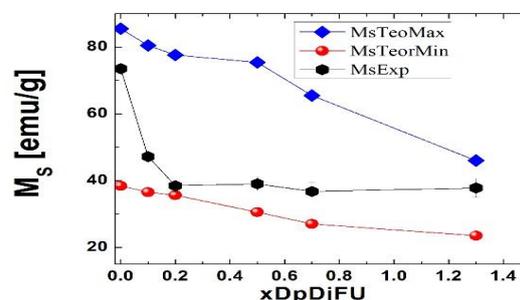


Fig. 2b. Comparación entre los resultados predichos por la precisión realizada y la medición experimental.

Inicialmente, los pequeños discos de $BaM+(Co^{2+}, Ti^{4+})_{x=0.2}$ (en el experimento), fueron colocados debajo de las semillas. Luego del trasplante, los imanes fueron mantenidos en la raíz de las plantas de lechuga hasta el momento de cosecha.

En la tabla 1 se aprecia, que debido a la interacción entre las semillas y el campo magnético del imán, el tiempo de germinación predicho es menor que el valor promedio para este cultivo. En primera aproximación, solo el efecto en su proceso fenológico, del campo magnético de la tierra (control) y la superposición (en el experimento) del campo magnético de la tierra y del imán “acoplado” a sus semillas, durante la germinación y posteriormente en la raíz hasta la cosecha, finalización del experimento.^(14, 17,18) Igualmente, el tiempo de transcurrido hasta la cosecha, es menor con la intervención magnética, aunque la dosis de radiación, no ionizante, es dos órdenes mayor. Por ello, es importante la comparación cualitativa de todo el desarrollo fenológico de la planta.

Tabla 1. Parámetros promedios de la lechuga variedad Fomento asumiendo, en primera aproximación; sólo el efecto en su proceso fenológico, del campo magnético de la tierra (control) y la superposición (en el experimento) del campo magnético de la tierra y del imán “acoplado” a sus semillas, durante la germinación y posteriormente en la raíz hasta la cosecha (finalización del experimento).^(14, 17,18)

Lechuga	Inducción magnética [T]	Tiempo de germinación(días)	Tiempo de cosecha [días)	Dosis de radiación [Jsm ⁻³)
Parámetros B _{tierra}	5.0×10^{-5}	1-7	50-60	3071-3686
Parámetros B _{iman}	32.5×10^{-3}	3	34	501678

Resultados cualitativos, del estudio de aplicación de los imanes a las semillas de lechuga

En la figura 3a. se observa, que el número de plántulas que germinan son mayores que la del recipiente testigo. Aunque en la literatura se tiene en cuenta entre las magnitudes de control el tiempo de exposición al campo magnético,^(9,10) en el presente estudio se mantuvo el mismo durante todas las fases fenológicas de las plantas, al igual que el campo magnético de la tierra. Esta variante se consideró la mejor opción, dado que se propuso una valoración cualitativa.

SEPTIMO DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA

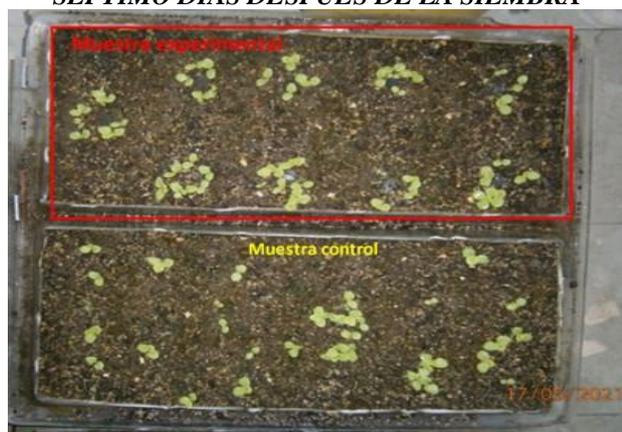


Figura 3a. Lechugas con imanes en su raíz y muestra control al séptimo día de sembrada.

Se observa en la figura 3b, a veinte días de sembrarse las semillas y en el momento del trasplante hacia el suelo, que el vigor de las plantas es superior en el experimento respecto al testigo.

A los 45 días de la siembra (figura 3c), momento de la cosecha, es evidente una mayor cantidad de hojas en las plantas del experimento, así como mayor tamaño promedio de las hojas.



Figura 3b. Comparación entre la muestra experimental y el testigo a los 20 días de sembradas.



Figura 3c. Comparación entre la muestra experimental y el testigo a los 45 días de sembradas, antes de la cosecha.

Tamaño de las hojas, grosor del tallo y calidad de la hoja



Figura 3d. Comparación cualitativa entre la muestra experimental y el testigo a los 45 días de sembradas, en el momento de la cosecha.

De igual modo, es manifiesto al comparar una planta crecida en el campo magnético respecto al testigo (figura 3d), que es superior aquella del experimento, en todos los parámetros medibles.

CONCLUSIONES

La comparación entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales ha permitido una mejor aproximación a la interpretación física de las causas que condicionan la variación de las propiedades estructurales y magnéticas con el tipo y la concentración de los iones sustitutos dentro de la celda unidad de la BaM dopada. El hecho de que las propiedades magnéticas varíen con el dopaje en el sitio del Bario, demuestra que con la redistribución del oxígeno varía la magnitud de la interacción de intercambio en el interior de la estructura bajo estudio. Además, con una adecuada predicción y caracterización de las fases dopadas es posible la decisión de cómo y dónde aplicar cada fase obtenida. Por último, la exposición de las semillas y raíz de la lechuga al campo magnético, de los imanes bajo estudio, es una aplicación física potencial, segura y asequible para aumentar la productividad de los cultivos y mejorar los atributos cuantitativos y cualitativos de la lechuga en condiciones de laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Yujie Yang, Fanhou Wang, Juxiang Shao, Duohui Huang, A. V. Trukhanov, S. V. Trukhanov; Preparation of Al^{3+} - Co^{2+} co-substituted M-type SrCaNd hexaferrites and their controlled magnetic properties; *AIP ADVANCES* **8**, 075212 (2018).
<https://doi.org/10.1063/1.5034451>
- 2) Lim J.-P., Kang, M.-G., Kang, Y.-M.; Development of Multi-Cation-Doped M-Type Hexaferrite Permanent Magnets; *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 295-306.
<https://doi.org/10.3390/app13010295>
- 3) Zhang W., Li P., Wang Y., Guo J., Li J., Shan S., Ma S., Suo X.; Structure, Spectra, Morphology, and Magnetic Properties of Nb^{5+} Ion-Substituted Sr Hexaferrites. *Magneto Chemistry* **2022**, *8*, 51.
<https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8050051>
- 4) You J.-Y., Lee K.-H., Kang Y.-M., Yoo S.-I.; Enhancement of the Magnetic Properties in Si^{4+} - Li^{+} -Substituted M-Type Hexaferrites for Permanent Magnets; *Appl. Sci.* **2022**, *12* 12295.
<https://doi.org/10.3390/app122312295>
- 5) Vivek Dixit, Dinesh Thapa, Bipin Lamichhane, Chandani N. Nandadasa, Yang-Ki Hong, Seong-Gon Kim; Site preference and magnetic properties of Zn-Sn-substituted strontium hexaferrite; *J. Appl. Phys.* 2019, *125*, 173901; <https://doi.org/10.1063/1.5084762>
- 6) Vivek Dixit, Chandani N. Nandadasa, Seong-Gon Kim, Sungho Kim, Jihoon Park, Yang-Ki Hong; Site preference and magnetic properties of Ga/In-substituted strontium hexaferrite: An ab initio study; *J. Appl. Phys.* *118*, 203908 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4936368>
- 7) P. A. Mariño-Castellanos, A. C. Moreno-Borges, G. Orozco-Melgar, J. A. García and E. Govea-Alcaide, "Structural and magnetic study of the Ti^{4+} -doped barium hexaferrite ceramic samples: Theoretical and experimental results", *Physica B: Condensed Matter* (2011), *406*, 3130–3136.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.03.084>
- 8) Pedro Antonio Mariño-Castellanos, Valery Alexevich Lapshinsky, Carlos Pupo, Arles Vega-García, Eduardo Fernández-Cruz, Braddy Ivan Jimenez-Morales. Predictions and Magnetic Characterization of M-type Hexaferrites Doped with Two Cations in the Fe^{3+} Site. *American Journal of Engineering and Technology Management*.2019, *4* (6): 83-90.
<https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20190406.12>
- 9) Mohammad Sarraf, Sunita Kataria, Houda Taimourya, Lucielen Oliveira Santos, Renata Diane Menegatti, Meeta Jain, Muhammad Ihtisham and Shiliang Liu; Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview; *Plants* 2020, *9*, 1139-1167;
<https://doi.org/10.3390/plants9091139>;
www.mdpi.com/journal/plants.
- 10) Neo E. Nyakane, E. D. Markus and M. M. Sedibe; The Effects of Magnetic Fields on Plants Growth: A Comprehensive Review; *International Journal of Food Engineering*, 2019, *5*(1): 79-87.
<https://doi.org/10.18178/ijfe.5.1.79-87>
- 11) Sung Yong An, In-Bo Shim, Chul Sung Kim; Mössbauer and magnetic properties of Co–Ti substituted barium hexaferrite nanoparticles;

Journal of Applied Physics, 2002, 91, 8465-8475; <https://doi.org/10.1063/1.1452203>

[12) X. Z. Zhou, A. H. Morrish, Z. W. Li, Y. K. Hong; SITE PREFERENCE FOR Co²⁺ AND Ti⁴⁺ IN CO-Ti SUBSTITUTED BARIUM FERRITE. *Ieee transactions on magnetics*, 1991, 27:6 4654-4656.

<https://doi.org/10.1109/20.278906>

[13) A. G. Belous, O. I. V'yunov, E. V. Pashkova, V. P. Ivanitskii, O. N. Gavrilenko; Mössbauer Study and Magnetic Properties of M-Type Barium Hexaferrite Doped with Co+Ti and Bi+Ti Ions. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110, 26477-26481. <https://doi.org/10.1021/jp064628t>

[14) Arafat Abdel Hamed Abdel Latef, Mona F. A. Dawood, Halimeh Hassanpour, Maryam Rezayian, Nabil A. Younes; Impact of the Static Magnetic Field on Growth, Pigments, Osmolytes, Nitric Oxide, Hydrogen Sulfide Phenylalanine Ammonia-Lyase Activity, Antioxidant Defense System, and Yield in Lettuce; *Biology* 2020, 9, 172, 1-19. <https://doi.org/10.3390/biology9070172> .

[15) Acuña R., Naguelquin F., García F., Torres

J.; Application of magnetic fields (CM) and their relationship with recovery viability and vigor in aged seeds of *Lactuca sativa* L., *Agro Sur* 47(1):2019, 9-21.

<https://doi.org/10.4206/agrosur:2019.v47n1-04>

[16) Araújo SS, Paparella S, Dondi D, Bentivoglio A, Carbonera D, Balestrazzi A.; Physical Methods for Seed Invigoration: Advantages and Challenges in Seed Technology. *Front. Plant Sci.* (2016) 7:646, 1-12.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>

[17) Paul Galland, Alexander Pazur; Magnetoreception in plants; *J Plant Res* (2005) 118:371–389.

<https://doi.org/10.1007/s10265-005-0246-y>

[18) Mroczek-Zdyrska M., Tryniecki Ł., Kornarzyński K., Pietruszewski S., Gagoś M.; Influence of magnetic field stimulation on the growth and biochemical parameters in *Phaseolus vulgaris* L.; *Journal of Microbiology, Biotechnology & Food Sciences*, 2016, 5(6): p548-551.

<https://doi.org/10.15414/jmbfs.2016.5.6.548-551>

DECLARACIÓN CONFLICTO DE INTERESES

Los autores expresan que no existen conflictos de interés en el manuscrito presentado.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Concepción y diseño del modelo, síntesis de los imanes e idea rectora del estudio: Pedro Antonio Mariño-Castellanos, Arles Vega-García.

Programación del modelo, análisis y/o interpretación de datos del modelo y comparación con los resultados experimentales:

Yadir Hidalgo-Peña, Pedro Antonio Mariño-Castellanos, Arles Vega-García, Eduardo Fernández-Santiesteban, Nuris Ludmila Castellanos-Hall,

Concepción, diseño, realización y análisis de la aplicación de los imanes al cultivo de la lechuga: Pedro Antonio Mariño-Castellanos, Eduardo Fernández-Santiesteban, Nuris Ludmila Castellanos-Hall, Yadir Hidalgo-Peña.

Redacción y revisión crítica del manuscrito para novedad científica importante: Pedro Antonio Mariño-Castellanos, Eduardo Fernández-Santiesteban, Arles Vega-García.