

# Formación de maghemita a partir de magnetita obtenida por coprecipitación química

Gloria Rosales\*, Manuel García, Blanca Rosales, Claudia Reyes, Gemma Ramos y Cindy Boone

Facultad de Metalurgia  
Universidad Autónoma de Coahuila<sup>1</sup>  
Monclova Coahuila, México

[mrosales\*, manuel\_garcía, blancarosales, claudia\_reyes\_guzman, gema\_ramos, cindyboone]@uadec.edu.mx

**Abstract**— Magnetite particles were synthesized by the chemical coprecipitation method, using salts of  $\text{FeCl}_2$  and  $\text{FeCl}_3$  in a basic medium at a temperature of  $70^\circ\text{C}$ , then a heat treatment of 100, 200, 250, 300 y  $350^\circ\text{C}$  was applied for three hours. The synthesized materials were characterized using X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The thermodynamic study has shown that it is possible to obtain maghemite from magnetite at low temperatures. The thermal treatments were effective to transform magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) to maghemite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), this was formed from  $100^\circ\text{C}$  and at  $350^\circ\text{C}$  it was obtained with a size of 9.75 nm. The shape of particles was spherical with sizes between 11 and 19 nm.

**Keyword**— Magnetite, maghemite, chemical coprecipitation, heat treatment.

**Resumen**—Se sintetizaron partículas de magnetita mediante el método de coprecipitación química, utilizando sales de  $\text{FeCl}_2$  y  $\text{FeCl}_3$  en medio básico a una temperatura de  $70^\circ\text{C}$ , después se les aplicó un tratamiento térmico de 100, 200, 250, 300 y  $350^\circ\text{C}$ , por tres horas. Los materiales sintetizados fueron caracterizados mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. El estudio termodinámico ha demostrado que es posible obtener maghemita a partir de magnetita a bajas temperaturas. Los tratamientos térmicos resultaron efectivos para transformar magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), esta se formó desde  $100^\circ\text{C}$  y a  $350^\circ\text{C}$  se obtuvo con un tamaño de 9.75 nm. La forma de las partículas fue esférica con tamaños entre 11 y 19 nm.

**Palabras claves**—Magnetita, maghemita, coprecipitación química, tratamiento térmico.

## I. INTRODUCCIÓN

Mineralógicamente la magnetita es una mena corriente de hierro, se halla diseminada como mineral accesorio en muchas rocas ígneas, en ocasiones formando grandes masas de mineral que generalmente son muy titaníferas y aparece asociada a rocas metamórficas cristalinas. Los mayores depósitos del mundo se encuentran al norte de Suecia y otros depósitos importantes en Noruega, Rumania, Rusia, Siberia y África del sur. La magnetita se utiliza como soporte versátil de un gran número de catalizadores funcionalizados, empleados en la catálisis de una gran variedad de reacciones orgánicas e inorgánicas. En general, diversos óxidos nanoestructurados basados en magnetita son buenos dispositivos para la manufactura de materiales magnéticos, películas de protección sensibles y pigmentos, así como para el tratamiento y eliminación de residuos y agentes contaminantes del agua (Noval V., 2017).

La maghemita es una fase del óxido de hierro, que al igual que la magnetita, es magnética, es de color marrón, formado por partículas octogonales, de carácter semiconductor aislante y ferrimagnética, por lo que también se la conoce como hematita magnética. Es cúbica, de parámetro  $a = 8.322 \text{ \AA}$ . Es poco abundante en la naturaleza, se puede obtener por oxidación de la magnetita o por deshidratación de la lepidocrocita. Al igual que la magnetita, la maghemita es un mineral que tiene una estructura cristalina de espinela inversa, la única diferencia con respecto a la magnetita es que contiene átomos de hierro con estado de oxidación +3 en el tetraedro y en el octaedro, con ausencia de hierro +2. La fórmula química de la maghemita es  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , esta tiene muchas similitudes con la magnetita debido a su

compatibilidad en la estructura, por lo que las propiedades son muy parecidas. El carácter magnético de la estructura del óxido de hierro varía de la hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) y de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), según sean las condiciones de síntesis. En cuanto al campo magnético la magnetita es un poco más magnética que la maghemita, con respecto a la saturación de magnetización la magnetita tiene 80 emu/g mientras que la maghemita tiene alrededor de 70 emu/g (Sutradhar S., 2009). La maghemita es utilizada en dispositivos para grabación magnética, cintas de audio y de vídeo, así como discos duros y blandos de ordenadores. Las partículas de maghemita utilizadas son de grano acicular y presentan resistencia frente a distintos medios corrosivos, superior a la de otros materiales utilizados en grabaciones magnéticas.

La coprecipitación química es un método de síntesis de magnetita relativamente fácil; consiste en mezclar en una disolución acuosa sales de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , preferencialmente a pH básico, en una atmósfera inerte a temperatura elevada (Zhang F., 2009). Las características de las nanopartículas obtenidas dependen fuertemente del tipo de sales empleadas, de la razón de los iones  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , de la temperatura de reacción, el pH de la disolución y la fuerza iónica del medio. Una vez que las condiciones de síntesis son fijadas, se tienen resultados reproducibles.

Zhang F. et al. (2009), obtuvieron nanopartículas de magnetita por este método mezclando  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{FeCl}_2$  en relación molar 2:1, en una disolución acuosa de hidróxido de amonio (25% fracción volumen) con agitación vigorosa a  $80^\circ\text{C}$  por 1 hora. Estas partículas fueron recubiertas con poliestireno, y sus resultados muestran que la modificación superficial de las nanopartículas aumenta la estabilidad de la dispersión, ya que se incrementa la propiedad hidrofóbica de la superficie.

Múzquiz R. et al. (2014), sintetizaron la maghemita mediante la oxidación de magnetita obtenida por coprecipitación, calentando a 200, 250 y  $300^\circ\text{C}$ , con tiempos de 3, 5 y 8 horas. Obtuvieron la fase maghemita para las tres temperaturas con tamaños de partículas menores a 12.5 nm. Ying T. et al. (2007) describen la producción de magnetita por electrocoagulación. Muestran que la susceptibilidad magnética se incrementa con la temperatura, potencial eléctrico y conductividad de la disolución y que esta disminuye cuando están presentes otros iones, lo cual confirma que algunos cationes y aniones interfieren con la formación de la magnetita; coincidiendo con lo reportado por Tsouris (2001). También Ying T. et al. (2007) proponen un mecanismo de formación de magnetita en donde este producto se forma a partir de la reducción electroquímica de un hidróxido férrico.

En este trabajo se sintetizó la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a partir de sales de cloruro férrico y ferroso por la técnica de coprecipitación química, en un medio básico. La magnetita obtenida fue tratada térmicamente en atmósfera no controlada para su transformación a maghemita, los productos obtenidos fueron caracterizados por Difracción de rayos X y Microscopía electrónica de barrido. Donde se descubrió que se puede obtener maghemita con tamaño de partícula de 21.077 nm con calentamientos de  $100^\circ\text{C}$ .

## II. METODOLOGÍA

Antes de preparar las nanopartículas de magnetita, se procedió a realizar un estudio termodinámico para corroborar si la obtención del compuesto es posible con las condiciones planteadas. Para la realización de un análisis termodinámico eficiente, es necesario conocer el calor absorbido o liberado, mediante la variación de entalpía ( $\Delta H$  Kcal/mol), por cada una de las reacciones presentes, así como la variación de la energía libre ( $\Delta G$  Kcal/mol) que expondrá la ocurrencia o no de las mismas (espontánea o no espontánea respectivamente). Para la realización de este estudio se usó el software HSC Chemistry 6.0, al cual se le alimentó la reacción de oxidación de magnetita a maghemita como se ve en la ecuación 1.



Para la síntesis de la magnetita se utilizó en la técnica reportada por Zhang F. et al. (2009). Se mezclaron  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (2:1) en 50 mL de agua desionizada. Por otro lado, se colocaron 150 mL de agua desionizada en un matraz bola de 500 mL y se calentó a 70 °C, en agitación constante. Una vez que se alcanzó la temperatura, se agregaron 50 mL de hidróxido de amonio concentrado, con el fin de propiciar un medio básico en la solución, y se dejó en agitación y calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 70 °C. Posteriormente, se agregó gota a gota, la mezcla de cloruros de hierro a la solución básica y se dejó en agitación constante durante media hora. Una vez transcurrido el tiempo, el precipitado obtenido se lavó con 2 L de agua desionizada, con el fin de eliminar el exceso de cloruros y se dejó secar a temperatura ambiente durante 3 días. Finalmente, el producto obtenido se lavó con 1 L de agua desionizada y 250 mL de etanol y se dejó secar a temperatura ambiente.

La cantidad obtenida de magnetita fue fraccionada en cinco partes y se aplicó un calentamiento de 100, 200, 250, 300 y 350°C respectivamente, con un tiempo de permanencia de tres horas. Al término del tiempo del calentamiento se dejaron dentro del horno, logrando un enfriamiento lento para obtener mayor cristalinidad. Las muestras ya frías fueron caracterizadas con Difracción de rayos X, (D8 Advance), con rango de barrido de 10 a 80° y de 20 a 80°, en la escala 2θ, velocidad de barrido de 0.01°/s, radiación tipo Cobalto-Ka. Las condiciones de operación fueron de 40 mA y 40 kV. Las condiciones en las que se aplicó Microscopía electrónica de barrido fueron con la técnica de cátodo frío, energía 5Kv y 5μA, a una distancia de trabajo desde 2.2 mm.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Estudio termodinámico

Al alimentar la reacción de oxidación de magnetita a maghemita al software HSC CHemistry 6.0, se obtuvieron datos de la energía libre ( $\Delta G$  Kcal/mol), con dichos datos se supo que la reacción sucede hacia la derecha. También se determinaron los datos de entalpía ( $\Delta H$  Kcal/mol) que es la medida del calor absorbido o desprendido en la reacción de transformación. Otros datos que arrojó el software son los datos de entropía que es una medida del desorden del sistema ( $\Delta S$  cal/mol). Para conocer las cantidades finales de productos y de reactivos se pudieron conocer a través de los valores de la constante la constante de equilibrio, que también se enlistan en la tabla I.

Los datos termodinámicos indican que la oxidación de la magnetita puede ocurrir a bajas temperaturas, se observa como al aumentar la temperatura la energía libre ( $\Delta G$  Kcal/mol), aunque se mantiene negativa, va aumentando.

Tabla I. Datos termodinámicos de la reacción de  $4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g}) = 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

T °C	$\Delta H$ Kcal/mol	$\Delta S$ cal/mol	$\Delta G$ Kcal/mol	K	Log de K
0.000	-113.774	-63.447	-96.444	1.486E+077	77.172
50.000	-113.851	-63.686	-93.270	1.216E+063	63.085
100.000	-114.108	-64.426	-90.068	5.702E+052	52.756
150.000	-114.337	-65.002	-86.831	7.086E+044	44.850
200.000	-114.484	-65.333	-83.572	4.030E+038	38.605
250.000	-114.582	-65.530	-80.300	3.537E+033	33.549
300.000	-114.708	-65.759	-77.018	2.347E+029	29.370
350.000	-114.968	-66.192	-73.721	7.199E+025	25.857

A la temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , la energía libre tiene un valor de  $-90.068$  Kcal/mol, este valor dice que ocurrirá la reacción de oxidación de la magnetita, es decir la reacción se desplaza a la derecha y se puede tener solo la fase maghemita. La entalpía por el contrario disminuye ligeramente al aumentar la temperatura, por lo que la reacción es más exotérmica aumentando así la eficiencia de calentamiento dentro del horno, pues desprende calor.

### B. Resultados de la obtención de magnetita

El método de coprecipitación resultó ser una técnica eficaz para la producción de magnetita. Las sales de hierro II y III se mezclaron en un medio acuoso, tomando inmediatamente una tonalidad naranja-amarillenta, después que se empezaron a verter gota a gota a la solución básica a temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  con un pH de 14, empezó el cambio de color de la solución y la formación de un precipitado negro el cual es el color característico de la magnetita. Este precipitado (óxido de hierro) es sensible a campos magnéticos (fase magnetita).

Los resultados de difracción de rayos X, se observan en la Figura 1. Los picos corresponden a la fase magnetita, según el software Match 5.1, con carta de referencia 969006190, con una estructura cúbica y parámetro de red  $8.31$  Å. El tamaño de partícula de la fase magnetita, determinado con la ecuación de Debye Scherer, fue de  $9.79034$  nanómetros ( $\pm 0.1$ ). Los resultados encontrados son coincidentes con los encontrados por Aliramajia et al., (2015), donde sintetizaron magnetita por método sonoquímico. Los ángulos de difracción  $2\theta$  aparecen en los valores;  $35$ ,  $41.76$ ,  $53.45$ ,  $56.90$ ,  $67.55$  y  $75$  con sus correspondientes planos de reflexión  $220$ ,  $311$ ,  $400$ ,  $422$ ,  $511$  y  $440$ , lo cual demuestra que se trata de un compuesto de magnetita, con una estructura cristalina de espinela cúbica. También son parecidos a los encontrados por Alvear et al., (2017), quienes afirman que generalmente los picos de difracción en los planos de reflexión  $113$  y  $210$ ,  $213$  y  $210$  son característicos de la maghemita y hematita. La difracción de rayos X les indicó que la fase magnetita estaba ubicada en ángulo  $2\theta$  de  $21^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $41^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $63^{\circ}$ ,  $67^{\circ}$  y  $75^{\circ}$ , correspondiendo a los planos  $(111)$ ,  $(220)$ ,  $(311)$ ,  $(400)$ ,  $(422)$ ,  $(511)$ ,  $(440)$ . Los picos de difracción confirman la estructura de espinela inversa.

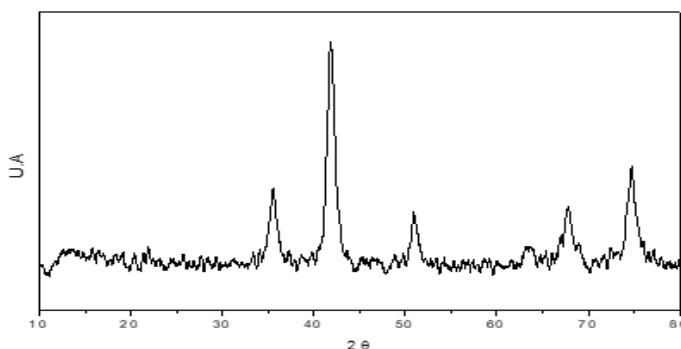


Figura 1. Diffractograma de magnetita obtenida por coprecipitación de  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{FeCl}_2$  en medio básico

### C. Resultados del calentamiento de la magnetita para obtener maghemita

Las nanopartículas magnéticas de óxido de hierro obtenidas fueron susceptibles a la oxidación por el aire durante la síntesis ya que no se usó atmósfera controlada, estas también pueden ser oxidadas al ser agregadas a un sistema acuoso, perdiendo su propiedad magnética (Kadokia K., 2012). El control del tamaño y la polidispersidad son muy importantes debido a que las propiedades de los monocristales dependen fuertemente de la dimensión de las nanopartículas; sólo partículas de magnetita con un tamaño menor de  $30$  nanómetros exhiben propiedades superparamagnéticas que las hacen propensas a los campos magnéticos. Después de aplicar los calentamientos de  $100$ ,  $200$ ,  $250$ ,  $300$  y  $350^{\circ}\text{C}$  a las muestras de magnetita se observó diferente coloración del compuesto, pasando de negro (color de la

magnetita) a diferentes tonalidades de rojo marrón (color de la maghemita), debido al calor y la presencia de oxígeno se favoreció la reacción de transformación de magnetita a maghemita. Los difractogramas para las muestras de magnetita tratada a 100, 200, 250, 300 y 350 °C, fueron comparados contra los patrones de difracción, encontrándose que se asemejan a los de las fases cristalográficas de maghemita, según software Match 5.1, los picos corresponden a la fase maghemita con carta de entrada 969006317 para prácticamente todas las condiciones de síntesis, esta fase tiene una estructura cristalina cúbica con parámetro de red 8.33 Å. No se encontraron picos de difracción atribuibles al hierro metálico, (Figura 2).

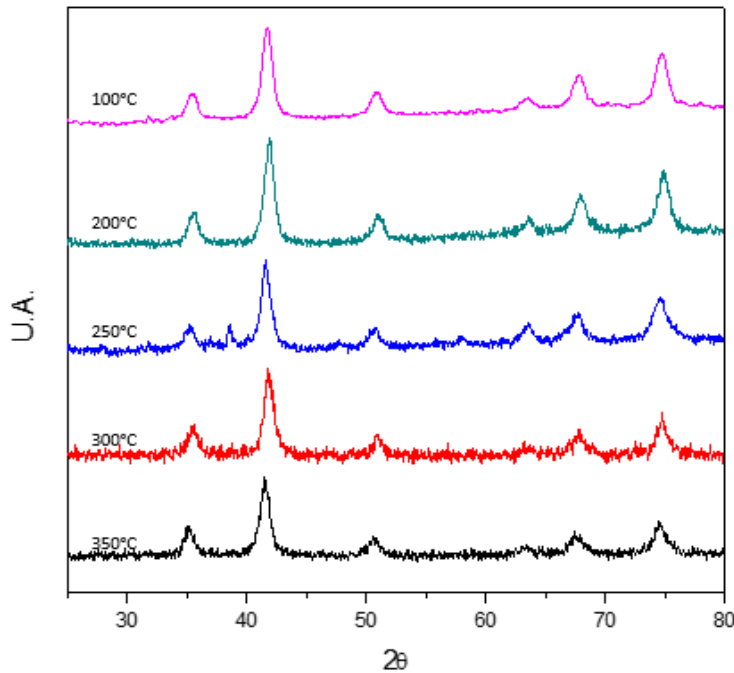


Figura 2. Difractograma de las muestras de magnetita tratada térmicamente a 100, 200, 250, 300, 350 °C

Se observa claramente que los difractogramas presentan ruido, sin embargo, si fue posible realizar la comparación con los diversos patrones de difracción característicos de las diferentes fases de óxidos de hierro concluyendo que la fase maghemita es la predominante. Los espectros se utilizaron también para estimar el tamaño del cristal aplicando la ecuación de Debye-Scherrer. Los resultados se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Tamaño de partícula de maghemita obtenida en los diferentes tratamientos térmicos

Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) 9.79034 nanómetros	Tratamiento térmico	Tiempo en horas	tamaño de partícula (nanómetros) de maghemita γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
M 1	100 °C	3	21.07732503
M 2	200 °C	3	10.95489957
M 3	250 °C	3	10.74487567
M 4	300 °C	3	10.43384461
M 5	350 °C	3	9.751801497

El tamaño de partícula de la magnetita antes de los tratamientos térmicos fue 9.79034 nm, en el tratamiento a 100 °C sufrió un aumento significativo de 21.07732503 nm. Se ha reportado por Amer

(2016), que los tratamientos térmicos tienen un efecto significativo en el tamaño de partícula, como por ejemplo los tratamientos térmicos que se aplicaron a nanopartículas de  $MgFe_2O_4$  condujeron a un aumento del tamaño de las cristalitas. En el tratamiento de 200 °C ocurre un cambio muy interesante que es una disminución considerable del tamaño de partícula 10.95489957 nm, lo cual sería algo atípico a lo que se ha reportado, pero daría un indicio que en cierto punto es posible reducir el tamaño de partícula a través de los tratamientos térmicos.

En tratamiento de 250 °C y 300 °C el tamaño de partícula continúa disminuyendo hasta 10.74487567 nm y 10.43384461 nm respectivamente, es decir que el tamaño de partícula sigue en la misma tendencia de hacerse más pequeño, para finalmente en 350°C el tamaño de partícula fue de 9.751801497 nm, el cual es ligeramente menor que el tamaño de inicio de la magnetita de 9.79034 nm. Con estos datos se propone la teoría que ciertos tratamientos térmicos en nanopartículas magnéticas son capaces de lograr reducir el tamaño de partícula.

#### *D. Resultados del estudio morfológico de la maghemita obtenida por tratamiento térmico de la magnetita a 300°C por 3 horas*

En la Figura 3, se observa la micrografía a 200,000 X de la muestra de maghemita que se obtuvo por coprecipitación y fue tratada térmicamente a 300°C durante 3 horas. Se aprecian nanopartículas con una distribución de tamaños entre 11 y 19 nm. Por el análisis de los electrones retrodispersados se sabe que las zonas claras/brillantes es donde están los metales más pesados, en este caso la maghemita, y en las zonas oscuras existen pocas cantidades de este compuesto. Es posible distinguir claramente la forma esférica de las partículas de maghemita, las cuales se encuentran aglomeradas en todo el campo, esta se puede atribuir al proceso de coprecipitación química el cual propicia la conglomeración, otra razón es que puede deberse a la naturaleza magnética de la maghemita.

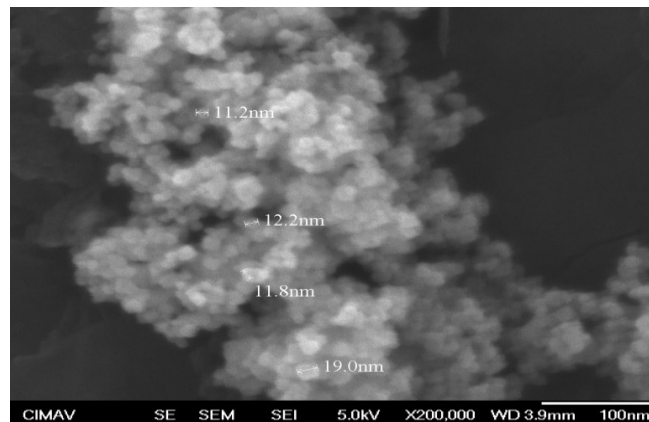


Figura 3. Morfología a 200,000 X, de maghemita obtenida del tratamiento térmico de 300°C por tres horas

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio termodinámico nos indica que es posible obtener maghemita a partir de magnetita a bajas temperaturas. En la síntesis de la magnetita mediante la coprecipitación química, presentó una estructura cristalina de espinela cúbica. El tamaño de partícula de la fase magnetita fue de 9.79034 nm ( $\pm 0.1$ ). Con esto se vuelve a confirmar nuestra teoría de la efectividad y lo atractivo que resulta la coprecipitación química para la síntesis de nanocompuestos.



De los distintos tratamientos térmicos aplicados a la magnetita a distintas temperaturas en atmósfera no controlada, resultó un cambio de compuesto químico, de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), pasa a maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El calentamiento aplicado de  $100^\circ\text{C}$  fue suficiente para que la reacción ocurriera.

Los tratamientos térmicos son completamente efectivos para lograr cambiar las propiedades y estructura de los nanocompuestos. De todos los rangos de temperaturas utilizados de la conversión de magnetita a maghemita, existió un caso particular en el cual el tamaño de partícula de la magnetita antes de los tratamientos térmicos fue  $9.790\text{ nm}$  y durante el tratamiento a  $100^\circ\text{C}$  sufrió un aumento significativo de  $21.077\text{ nm}$ , pero en los siguientes calentamientos de  $200^\circ\text{C}$  hasta  $350^\circ\text{C}$  va disminuyendo el tamaño de partícula.

El estudio morfológico de maghemita arrojó tamaños de partícula de formas esféricas y con una distribución de tamaños bastante homogénea entre  $11$  y  $19\text{ nm}$ . La aglomeración fue una constante en este estudio por el carácter magnético de las partículas.

## V. REFERENCIAS

- [1] Noval V., Ochoa P., Carriazo J., (2017). Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*. 46(1), 42-59.  
DOI: 10.15446/rev.colomb.quim.vlnl.62831.
- [2] Sutradhar S., Das S., Roychowdhury A., Das D., Chakrabarti P., (2015). Magnetic property, Mössbauer spectroscopy and microwave reflection loss of maghemite nanoparticles ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) encapsulated in carbon nanotubes, *Materials Science and Engineering B* 196, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2015.02.008>.
- [3] Zhang F., Su Z., Wen F., (2008). Synthesis and characterization of polystyrene-grafted magnetite nanoparticles. *Colloid Polym Sci* 286, 837–841 <https://doi.org/10.1007/s00396-008-1854-6>.
- [4] Zhang F., Zhong X., Yu H., (2009). Effects of cobalt doping on the microstructure and magnetic properties of Mn – Zn ferrites prepared by the co-precipitation method. *Physica B: Condensed Matter*, 404, 2327–2331. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2008.12.044>
- [5] Múzquiz R., Guerrero Ch., Macías M., López B., García C., (2014). Synthesis and characterization of maghemite nanoparticles for hyperthermia applications. *Ceramics International*. 41(1), 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.08.083>.
- [6] Ying T., Yiacoumi S., Tsouris C., (2007). An Electrochemical Method for the Formation of Magnetite Particles. *Journal of dispersion science and technology*, 23, 569-576. <https://doi.org/10.1081/DIS-120014025>
- [7] Tsouris C., De Paoli D., Shor J., Hu M., Ying T., (2001). Electrocoagulation for magnetic seeding of colloidal particles *Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*, 177(2-3), 223-233. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00680-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00680-4).
- [8] Aliramaji S., Zamanian A., Sohrabijam Z., (2015). Characterization and Synthesis of Magnetite Nanoparticles by Innovative Sonochemical Method. *Procedia Materials Science*, 11, 265-269. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.022>
- [9] Alvear D., Galeas S., Guerrero V., Debut A., (2017). Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de magnetita. *Revista Politécnica* 39(2). Recuperado de: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v39n2/2477-8990-rpolit-39-02-00061.pdv>. (Consultado 10 de noviembre del 2020)
- [10] Kadakia K., (2012). Removal of Arsenic Contamination from Water Using Magnetite Nanoparticles. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/removal-of-arsenic-contamination-from-water-using-kadakia/ea324ecf93ec616892cf560428f6f16f4531a10b>. (Consultado 20 de diciembre del 2020)

- [11] Amer M., Meaz T., Attalah S., Fakhry F., (2016). Influence of heat treatment on magnetic, structural and elastic properties of as-prepared Mg-nanoferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 401(1), 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.10.032>.
- [12] Teja A., y Koh P., (2009). Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*,55(1-2), 22-45  
DOI:10.1016/j.pcrysgrow.2008.08.003.
- [13] Jiwon L., Tetsuhiko I., Mamoru S., (1996). Magnetic properties of ultrafine magnetite particles and their slurries prepared via in-situ precipitation. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects* 109, 121-127. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03479-X](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03479-X).
- [14] Wang X., Zhang C., Wang X., Gu H., (2007). The study on magnetite particles coated with bilayer surfactants, *Applied Surface Science* 253, 7516- 7521. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.03.053>.
- [15] Buendía A., (2009). Síntesis de nanopartículas de hierro con propiedades magnéticas obtenidas vía precursores organometálicos. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. México, D.F. Recuperado de: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/5926>. (Consultado 15 de diciembre del 2020)