



Revisión. Magnetita nanoparticulada y los métodos más utilizados de obtención

Dra. Isabel Aracely Facundo Arzola*
M.C. María Victoria Guadalupe Trejo Merla**
*Facultad de Metalurgia, UAdeC
**Facultad de Ciencias Químicas UAdeC
mvgtm1@hotmail.com

Resumen

Los óxidos magnéticos han ganado importancia en el campo de la nanociencia y nanotecnología, por lo tanto, es de alta relevancia el análisis de los distintos métodos de obtención, en este caso en particular el de la magnetita, ya que ha cobrado gran interés en el ámbito de la biomedicina. En este trabajo se describen brevemente las propiedades que hacen de la magnetita nanoparticulada adecuada para desempeño en medios biológicos, así como algunos de los métodos más utilizados para su síntesis y sus características en los diferentes métodos de obtención.

Introducción

Las partículas de óxidos de hierro han ganado un creciente interés en los campos de la

nanociencia y nanotecnología debido a las propiedades fisicoquímicas nuevas y únicas que se obtienen de acuerdo con su tamaño de partícula, morfología y forma ingenieril (Duares, 2005).

Las nanopartículas más utilizadas e investigadas hasta el momento son las partículas formadas por óxido de hierro, debido fundamentalmente a sus propiedades magnéticas y a su sencillo proceso de síntesis. Típicamente estas nanopartículas están formadas por magnetita (Fe_3O_4) o maghemita (Fe_2O_3) nanocrystalinas aisladas por una cubierta polimérica de este modo la cubierta polimérica proporciona una barrera física que previene la aglomeración de las partículas. Además, por sus propiedades magnéticas, la utilidad de las nanopartículas de óxido de hierro viene dada



por su alta biocompatibilidad y fácil biodegradación en el organismo. Después de ser metabolizadas, los iones de hierro de estas partículas son añadidos a los depósitos de hierro del organismo y eventualmente son incorporados por los eritrocitos como parte de la hemoglobina. En ausencia de recubrimientos, las nanopartículas muestran superficies hidrofóbicas que facilitan la formación de aglomerados entre ellas dando lugar a agregados de gran tamaño, aunque tengan propiedades superparamagnéticas (Puca-Pacheco y col., 2013).

El uso potencial de nanopartículas de tipo magnético resulta especialmente interesante en el campo de la biomedicina ya que su pequeño tamaño posibilita su interacción con estructuras celulares, subcelulares e incluso moleculares (Puca-Pacheco y col., 2013). Pueden utilizarse como agentes de contraste en imagen de resonancia magnética (RM) (Corot, 2006), otra de las aplicaciones se encuentra en el ámbito de la terapia mediante la destrucción de tumores por la generación de hipertermia (Dobson, 2006), así como para el transporte de medicamentos (Mornet y col., 2006; Tomitaka y col., 2009).

Las nanopartículas magnéticas de óxido de hierro son susceptibles a la oxidación por el aire durante la síntesis o al ser agregadas a un sistema acuoso (Kadokia, 2008), perdiendo su propiedad magnética. El control del tamaño y la polidispersidad son muy importantes debido a que las propiedades de los nanocristales dependen fuertemente de la dimen-

sión de las nanopartículas; sólo partículas de magnetita con un tamaño menor de treinta nanómetros exhiben propiedades superparamagnéticas que las hacen propensas a los campos magnéticos (Luciano-Carlos y col., 2013). El carácter magnético de la estructura del óxido de hierro varía de la hematita (α - Fe_2O_3), maghemita (γ - Fe_2O_3) y de magnetita (Fe_3O_4). Las condiciones de síntesis tienen un efecto en la estructura final del óxido de hierro, siendo indispensable el uso de un emulsificante durante la síntesis en fase líquida para estabilizar la fase de magnetita. Este emulsificante provee alternativas para posibles modificaciones estructurales, además de estabilizar las nanopartículas de hierro con diámetros menores a los 30 nanómetros (Teja & Koh, 2009).

Dependiendo de la aplicación, se encuentran en la literatura varios métodos para sintetizar nanopartículas magnéticas, por ejemplo: coprecipitación, tecnología de microemulsión, micelas inversas, síntesis sol-gel, reacciones hidrotérmicas, reacciones de hidrólisis y termólisis, etc. (Laurent y col., 2008).

Nanopartículas de óxidos metálicos

Dentro de esta categoría se encuentran los compuestos magnéticos más ampliamente estudiados, las ferritas.

La magnetita es un óxido magnético que pertenece al grupo de las ferritas; tiene una densidad de 5.2 g/cm³; con una estructura



cúbica del tipo espinela y parámetro de red $a=0.8395$ nm (Univ. Pol. Mad., 2016). La fórmula básica para la ferrita es $A^{2+}B_2^{3+}O_4$, donde A y B son iones metálicos. Los iones del oxígeno forman una red FCC y los iones A y B se pueden encontrar en los sitios tetraédricos y octaédricos, dependiendo de la espinela en particular. En concreto, la magnetita es una espinela inversa (Figura 1), ya que el catión divalente Fe^{+2} se encuentra en los huecos octaédricos, mientras que el catión trivalente Fe^{+3} se encuentra en los huecos tetraédricos y octaédricos. En la celda unitaria se pueden distinguir 32 átomos de Oxígeno, 64 posiciones tetraédricas y 32 octaédricas (Brown & Leway, 1987), con una composición química de 24.1% de Fe^{2+} , 48.3% de Fe^{3+} y un 27.6% de O^{2-} (Laffitte, 1977).

Propiedades magnéticas

Su fuerte magnetismo se debe a un fenómeno de ferrimagnetismo: los momentos magnéticos de los distintos cationes de hierro del sistema se encuentran fuertemente acoplados por interacciones antiferromagnéticas, pero de forma que en cada celda unidad resulta un momento magnético no compensado (Figura 2). La suma de estos momentos magnéticos no compensados, fuertemente acoplados entre sí, es la responsable de que la magnetita sea un imán.

En la magnetita los iones Fe existen en los estados de valencia +2 y +3 en una pro-

porción 1:2. Para cada uno de los iones Fe^{2+} y Fe^{3+} existe un momento magnético el cual corresponde a cuatro y cinco magnetones de Bohr, respectivamente, para ambos tipos de iones. Además, los iones O^{2-} son magnéticamente neutros. Entre los iones Fe se producen interacciones de acoplamiento de los espines en las direcciones antiparalelas, similares a las que se producen en el caso del antiferromagnetismo. Sin embargo, se produce un momento ferrimagnético neto debido a que los momentos de espín no se cancelan completamente (Laffitte, 1977).

El factor crítico es la distribución de los momentos de espín de los iones Fe. Los momentos de espín de todos los iones Fe^{3+} en las posiciones octaédricas están alineados paralelos entre sí; sin embargo, están dirigidos en sentido opuesto a los iones Fe^{3+} de las posiciones tetraédricas, los cuales también están alineados. Esto se produce como resultado del acoplamiento antiparalelo de los momentos magnéticos de los iones de Fe adyacentes. Por tanto, los momentos magnéticos de espín de todos los iones de Fe^{3+} se anulan entre sí y no contribuyen a la magnetización del sólido. Todos los iones de Fe^{2+} tienen sus momentos magnéticos alineados en la misma dirección y su momento total es el responsable de la magnetización neta del material. Por consiguiente, la magnetización de saturación de un sólido ferrimagnético puede ser calculada a partir del producto del momento magnético del espín de cada ión Fe^{2+} y el número de iones de Fe^{2+} ; esto corres-



ponderaría al alineamiento mutuo de todos los momentos magnéticos de los iones Fe^{2+} en la muestra de Fe_3O_4 (Laffitte, 1977).

Sin embargo, según se reduce el tamaño del sistema hasta la nanoescala, cada partícula es considerada un dominio magnético único orientado aleatoriamente por la movilidad del sistema, pero que se ordena bajo la influencia de un campo magnético externo. En la nanoescala por tanto se pierde la propiedad ferrimagnética para dar lugar al paramagnetismo. Pero, además, estos nuevos únicos dominios magnéticos tienen una susceptibilidad magnética (medida de la respuesta del sistema ante un campo magnético inducido) muy alta, siendo así estructuras superparamagnéticas (Klabunde, 2001).

Métodos de obtención

La preparación de nanopartículas puede clasificarse en dos categorías: por subdivisión de los materiales en volumen (métodos físicos) y por crecimiento de nanopartículas a partir de precursores moleculares (métodos químicos). Los primeros incluyen molienda mecánica, el pulverizado y la evaporación por descarga de arco de metales en volumen, éstos producen generalmente nanopartículas grandes y de distribuciones de tamaño amplias. Por el contrario, las nanopartículas producidas por procesos químicos son pequeñas con distribuciones de tamaños estrechas (Yonezawa & Toshima, 2001).

Las propiedades magnéticas se vuelven fuertemente dependientes del tamaño en el intervalo nanométrico por lo que la monodispersidad se vuelve muy deseable. Por otro lado, el comportamiento magnético de las nanopartículas no depende solamente de la composición química y del tamaño, sino además de la modificación cristalina y la presencia de defectos estructurales. Por lo tanto, la técnica de fabricación tiene una gran influencia sobre las propiedades magnéticas de los materiales obtenidos (Schmid, 2004; O'Connor & Tang, 2004).

Métodos físicos

Se pueden preparar nanopartículas magnéticas de hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni) por la técnica de condensación de gas inerte, donde el metal se evapora a temperaturas muy altas ($\sim 1500^\circ\text{C}$) hacia un gas de alta pureza (helio, por ejemplo) (Löffler, y col., 1998; Prados, y col., 1999). Al colisionar con el gas inerte, los átomos metálicos pierden su energía cinética y condensan sobre una punta fría en forma de un polvo ultrafino. Una modificación de este método se basa en la evaporación de metales por descarga de arco sobre una corriente de una mezcla de gases de hidrógeno (H_2) y argón (Ar) y ha sido utilizada para la preparación de partículas de 20 a 30 nm de Fe, Ni y aleaciones de Fe-Ni. Usualmente las nanopartículas sintetizadas de esta forma son amorfas, y presentan cierta cantidad de óxido en su superficie (Yonezawa



& Toshima, 2001; Löffler, y col., 1998; Prados, y col., 1999).

Métodos químicos

En la síntesis química el mecanismo de producción se basa en la reducción de la sal metálica a los átomos metálicos correspondientes, posteriormente estos átomos actúan como centros de nucleación dando lugar a la formación de aglomerados atómicos, finalmente éstos son envueltos por moléculas estabilizantes que impiden que los átomos se sigan aglomerando. Dentro de los beneficios que trae la síntesis química están la reproducibilidad, la disponibilidad de reactivos de bajos costos de producción; por otro lado, estos métodos requieren de largos tiempos de preparación y condiciones experimentales especiales (Ararat, Varela, & Rodríguez-Paez, 2005; Yutronic, 2008; Moreno, 2006; Álvarez-Paneque, 2008). Algunos de los métodos más utilizados se describen a continuación.

Proceso electroquímico

El proceso electroquímico es un método de preparación en donde la fuente de nanopartículas magnéticas es un metal que se encuentra en forma sólida; consiste en colocar una hoja metálica del metal deseado en una celda electroquímica como ánodo. En la celda se generan cationes metálicos en el ánodo que se mueven hacia el cátodo formándose átomos metálicos cerivalentes

(Figura 3). En muchos casos los átomos metálicos cerivalentes se depositan sobre la hoja metálica del cátodo o precipitan, generando nanopartículas metálicas coloidales que se dispersan en el electrolito. Pueden prepararse también nanopartículas bimetálicas utilizando dos tipos de cátodos. En este proceso el tamaño de partícula puede ser fácilmente controlado al variar la densidad de corriente. La densidad de corriente influye directamente sobre el potencial de reducción en el cátodo. En el caso de partículas bimetálicas la composición está determinada por las densidades de corriente de los dos cátodos, las cuales pueden ser controladas independientemente (Yonezawa & Toshima, 2001).

Sobre la base del método electroquímico desarrollado por Reetz y colaboradores (Reetz y col., 1996), al igual que Pascal y colaboradores (Pascal y col., 1999), se han preparado partículas de magnetita de 3-8 nm a partir de un electrodo de hierro en una solución acuosa de DMF y surfactantes catiónicos. Ajustando la densidad de corriente se controla el tamaño de las partículas.

La deposición electroquímica bajo condiciones oxidantes se ha utilizado para preparar nanopartículas de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 (Burda y col., 2005). El problema es que no se puede controlar adecuadamente la cantidad de hierro (II) que se oxida a hierro (III) y por ello se pueden formar sistemas de diferente composición, como por ejemplo Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , etc.



Método Sol-gel

El método sol-gel es un proceso químico en fase húmeda ampliamente utilizado en la ciencia de los materiales. Este método se utiliza principalmente para la fabricación de nanomateriales (normalmente un óxido metálico). Se parte de una solución química o sol que actúa como precursor de una red integrada, ya sea de partículas discretas o de una red de polímeros. Los precursores típicos del proceso sol-gel son los alcóxidos metálicos y los cloruros metálicos, que sufren varias reacciones de hidrólisis y policondensación para formar una dispersión coloidal, que luego de una polimerización lenta forma un gel. En general, los alcóxidos son muy sensibles a la humedad (se descomponen muy fácilmente ante la presencia de ésta), es por ello que la hidrólisis para la formación del gel se lleva a cabo usando alcoholes como un solvente común para los diferentes líquidos inmiscibles. Un gel polimérico es una red macromolecular infinita, la cual está hinchada por solvente. Un gel puede ser creado cuando la concentración de la especie dispersa aumenta. El solvente queda atrapado en la red de partículas y así la red polimérica impide que el líquido se separe, mientras el líquido previene que el sólido colapse en una masa compacta. La deshidratación parcial de un gel produce un residuo sólido elástico que se conoce como xerogel. Finalmente, este material es completamente deshidratado y

eventualmente tratado térmicamente en flujo de gas para obtener el material nanoestructurado final (de-Jong, 2009).

El método sol-gel se ha usado en los últimos años para preparar una amplia variedad de materiales nanoestructurados. El método es atractivo porque involucra procesos a baja temperatura. También la alta pureza y homogeneidad son atribuibles a su forma de preparación en sistemas multicomponente (de-Jong, 2009).

Son varios los investigadores que lo han utilizado para la fabricación de nanopartículas magnéticas, Picasso y colaboradores (2012) prepararon nanopartículas de magnetita mediante este proceso, obtuvieron tamaños de partícula de 2 y 3 nm a una temperatura de proceso de 80°C con una posterior calcinación a 300°C. Por su parte, en su estudio, Nassekina y colaboradores (2010) desarrollaron el mismo método con el cual obtuvieron tamaños de partículas promedio de 38 nm (± 11 nm) en nanopartículas pseudoesféricas. Montes de Oca y colaboradores (2010) hicieron la síntesis de ferritas de cobalto obteniendo nanopartículas con una distribución de tamaños que iba de 4 a los 10 nm a una temperatura de reacción de 70°C.

Método coprecipitación química

El método más utilizado dentro de la fase líquida es la coprecipitación en medio acuoso,



ya que es un proceso fácilmente escalable, por ello se utiliza en la industria para el diseño y fabricación de nanopartículas de óxido de hierro. Este método consiste en la adición de una disolución de sal de Fe^{2+} y otra de Fe^{3+} sobre un medio básico en exceso. Las ventajas de este método son su simplicidad y bajo costo (Parak, y col., 2003).

Picasso y sus colaboradores (2012) fabricaron nanopartículas de magnetita a temperatura de reacción de 80°C con un secado a 90°C y la posterior calcinación a 200°C , de esta manera ellos obtuvieron nanopartículas con tamaños promedio de 10 a 20 nm. Aldama y colaboradores (2009), en su trabajo de investigación, obtuvieron tamaños de partículas menores a los 25 nm; para el caso de Ramos-Guivar y colaboradores (Ramos-Guivar, y col., 2013) obtuvieron partículas de entre los 6 a 12 nm en temperaturas de reacción de 80°C .

La principal desventaja es la existencia de una gran heterogeneidad de tamaño en las nanopartículas sintetizadas, es decir, la distribución de tamaños de las nanopartículas es muy amplia. Por lo tanto, es difícil lograr alta reproducibilidad con este método, ya que existen diversos factores a controlar: temperatura, pH, fuerza iónica, concentraciones de los reactivos, relaciones molares entre reactivos, etc., (Zhu, 1999).

Síntesis por microemulsión

Este método ofrece una serie de ventajas con respecto a otros, por ejemplo, el uso de un equipo simple, la posibilidad de preparar una gran variedad de materiales con alto control en la composición y tamaño de partículas, formación de nanopartículas preferentemente con estructuras cristalinas y alta área superficial específica, y el uso de condiciones de síntesis, cercanas a la presión y temperatura ambiente. Las microemulsiones pueden estar constituidas por micelas hinchadas de aceite en una fase de agua (microemulsiones normales, o/w) o micelas hinchadas con agua dispersas en aceite (microemulsiones inversas, w/o); en composiciones intermedias de surfactantes se presentan las microemulsiones con fases bicontinuas (Kelly, 2013).

Las reacciones de precipitación en microemulsiones permiten controlar la cinética de formación de partículas y su crecimiento con tan sólo variar las propiedades fisicoquímicas del sistema de microemulsión (Boutonnet, 1982). Con el método de microemulsión inversa se han preparado nanopartículas de diferentes ferritas tales como óxido de hierro, ferrita de magnesio, ferrita de cobalto, y ferritas de cobalto dopadas con cationes de cromo (Vestal & Zhang, 2004).

Puca-Pacheco y colaboradores (2013) utilizaron el método de microemulsión inversa con temperatura de reacción de 70°C , ellos reportaron haber obtenido nanopartículas con



diámetros de 9 nm. El equipo de trabajo de Esquível y colaboradores (2007) precipitó magnetita mediante el método de microemulsión bicontinua a 80 °C obteniendo como resultado nanopartículas diámetros cercanos a los 8nm. Por su parte, Loo y colaboradores (2008), utilizaron este mismo método en condiciones de reacción y reportaron nanopartículas con dispersión de tamaños que iban de los 6.9 nm a los 7.9 nm.

Sin embargo, a pesar de que las micelas inversas han sido empleadas exitosamente como nanoreactores para la síntesis de nanopartículas magnéticas, existen ciertas desventajas en este método entre las cuales destaca la baja productividad, es decir, se utiliza una gran cantidad de solvente y surfactante para sintetizar una muy pequeña cantidad de nanopartículas (Lee, y col., 2005). La precipitación en microemulsión bicontinua se presenta como una opción a ser considerada para aumentar la productividad en la síntesis (Esquível y col., 2007; Loo y col., 2008).

Discusión y conclusiones

El estudio de los métodos para la síntesis de la magnetita es muy importante debido a su gran relevancia en el campo biomédico al presentar propiedades fisicoquímicas nuevas y únicas que se obtienen de acuerdo con su tamaño y morfología de la partícula.

Al hacer un comparativo entre los distintos métodos que aquí se describen, se observa que las síntesis son simples y en condiciones muy cercanas a las ambientales, en unos casos el tiempo de obtención es un poco prolongado por precisar un tiempo de envejecimiento y/o posterior calcinación, además, dependiendo del proceso de síntesis tienen diferentes tamaños de partícula, sin sobrepasar los 30 nm, en la mayoría de los casos las distribuciones de tamaño tienden a ser más dispersas y en otros (menos frecuentes) son cuasi-monodispersas, se observan morfologías de partículas esféricas o pseudoesféricas. Por su naturaleza la magnetita tiene alta biocompatibilidad y fácil biodegradación en el organismo así que el factor determinante en la producción de magnetita biomédica es el control del tamaño de partícula ya que de este depende el superparamagnetismo de la magnetita.

El análisis de los métodos de síntesis ofrece un amplio panorama a los científicos para elegir el más adecuado para las características tanto físicas como químicas que se desean obtener, tomando en cuenta la aplicación final del producto.



Referencias

- Aldama, I., Arévalo, P., Cubero, A., Pérez, M., Castelaín, M., Molina, J. A., & Isasi, J. (2009). Preparación y estudio de materiales nanoparticulados de óxido de hierro. *Reduca (Recursos Educativos) Serie Química de Materiales*, 1(4), 15-25.
- Alvarez-Paneque, A. (2008). Síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas basadas en $MnFe_2O_4$ tipo espinela. *Revista Cubana de Física*, 35(2B), http://www.fisica.uh.cu/biblioteca/rev_cubfi/2008/vol25-No.2B/RFC-25-2B-2008-117.pdf.
- Ararat, C., Varela, J. A., & Rodríguez-Paez, J. E. (2005). Uso de métodos químicos para obtener polvos cerámicos del sistema $(Sn, Ti)O_2$. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 44(4), <http://www.sevec.es/publicaciones/boletin/pdf/bol44n4.pdf>.
- Boutonnet, M. K. (1982). The preparation of monodisperse colloidal metal particles from microemulsions. *Colloid Surfaces*, 5, 209–225.
- Brown, T. L., & Leway, E. H. (1987). *Química la ciencia de central*. USA: Ed Prentice-Hall.
- Burda, C., Xiaobo, C., Narayanan, R., & El-Sayed, M. A. (2005). Chemistry and Properties of Nanocrystals of Different Shapes. *Chemical Review*, 105(4), 1025-1102.
- Corot, C. (2006). Recent advances in iron oxide nanocrystal technology for medical imaging. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 58, 1471-1504.
- de-Jong, K. P. (2009). *Synthesis of Solid Catalysts*. Weinheim, Alemania: WILEY-VCH.
- Dobson, J. (2006). Magnetic nanoparticles for drug delivery. *Drug Development Research*, 67, 55-60.
- Duraes, I. (2005). Phase investigation of as-prepared iron oxide/hydroxide produced by sol-gel synthesis. *Materials Letters*, 59, 859-863.
- Esquivel, J., Facundo, I. A., Treviño, M. E., López, R. G. (2007). A novel method to prepare magnetic nanoparticles: precipitation in bicontinuous microemulsions. *Journal of Materials Science*, 42, 9015–9020.
- Hedayatnasab, Z., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W. (2017). Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application. *Materials and Design*, 127, 174-196.
- Kadakhia, K. (2008). Removal of Arsenic Contamination from Water Using Magnetite Nanoparticles. *The National High School Journal of Science*, <http://nhsjs.com/2012/removal-of-arsenic-contamination-from-water-using-magnetite-nanoparticles/>.
- Kelly, P. (31 de Enero de 2013). Inorganic nanoparticles synthesized by the novel oil-in-water microemulsion reaction method and their potential



- applications. Cataluña 31 Enero,.
Obtenido de http://www.iqac.csic.es/attachments/379_Tesi_Kelly.pdf
- Klabunde, K. J. (2001). *Nanoscale materials in chemistry*. Estados Unidos: Wiley-Interscience.
- Laffitte, M. (1977). *Curso de química Inorgánica*. Madrid: Editorial Alhambra.
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., & Muller, R. N. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *108. Chemical Reviews*, 108(6), 2064-2110.
- Lee, Y., Lee, J., Bae, C., Park, J., Noh, H., Park, J., & Hyeon, T. (2005). Large-scale synthesis of uniform and crystalline magnetite nanoparticles using reverse micelles as nanoreactors under reflux conditions. *Adv. Funct. Mater*, 503-509.
- Löffler, J. F., Scherrer, P., Meier, J. P., Doudin, B., Ansermet, J., & Wagner, W. (1998). Random and exchange anisotropy in consolidated nanostructured Fe and Ni: Role of grain size and trace oxides on the magnetic properties. *Physical Review B*, 57, 2915-2924.
- Loo, A. L., Pineda, M. G., Saade, H., Treviño, M. E., López, R. G. (2008). Synthesis of magnetic nanoparticles in bicontinuous microemulsions. Effect of surfactant concentration. *Journal of Materials Science*, 43, 3649-3654.
- Luciano-Carlos, F., García-Einschlag, M., & González-Mártire, D. (2013). F. S. Garca Einschlag, Ed. *InTech*, doi:10.5772/3443.
- Montes de Oca, J., Chuquisengo, L., & Alarcón, H. (2010). Síntesis y caracterización de nanopartículas de ferrita de cobalto obtenidas por el proceso sol-gel. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(4), 400-410.
- Moreno, L. (2006). Síntesis de la perovskita compleja $Ba_2LaZrO_{5.5}$ mediante el método de citrato. *Revista Colombiana de Física*, 38(3), http://calima.univalle.edu.co/revista/vol38_3/articulos/38034102.pdf.
- Mornet, S., Vasseur, S., Grasset, F., Veverka, P., Goglio, G., Demourges, A., Portier, J., Pollert, E., Duguet, E. (2006). Magnetic nanoparticle for medical applications. *Solid State Chemistry*, 34, 237-242.
- Nassekina, V., Guijarro, J., & Gómez-Lopera, S. A. (2010). Propiedades de nanopartículas monodispersas esféricas de ferrita de hierro (Fe_3O_4). III Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT (págs. 24-25). Cartagena: Revista Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT.
- O'Connor, C. J., & Tang, J. (2001). Nanostructured magnetic materials. En J. Zhang, J. S. Miller, & M. Drillon, *Magnetism: Molecules to Materials III* (págs. 1-36.). Weinheim, Alemania: Ed. Wiley-VCH.



- Parak, W. J., Gerion, D., Pellegrino, T., Zanchet, D., Micheel, C., Williams, S. C., Boudreau, R., Le Gros, M. A., Larabell, C. A., Alivisatos, A. P. (2003). Biological applications of colloidal nanocrystals. *Nanotechnology*, 14(7), R15-R27.
- Pascal, C., Pascal, J. L., Faiver, F., Elidrissi Moubtassim, M. L., & Payen, C. (1999). Electrochemical Synthesis for the Control of γ -Fe₂O₃ Nanoparticle Size. Morphology, Microstructure, and Magnetic Behavior. *Chemistry of Materials*, 11(4), 141-147.
- Picasso, G., Vega, J., Uzuriaga, R., Ruiz, G. P. (2012). Preparación de nanopartículas de magnetita por los métodos sol-gel y precipitación: estudio de la composición química y estructura. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 78(3), 170-182.
- Prados, C., Multigner, M., Hernando, A., Sánchez, J. C., Fernández, A., Conde, C. F., & Conde, A. (1999). Dependence of exchange anisotropy and coercivity on the Fe-oxide structure in oxygen-passivated Fe nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 85, 6118-6120.
- Prieto, F., Rodríguez, J. A., Castañeda, A., & Barrado, E. (2002). Síntesis hidrotérmica de ferritas de plata. Una opción para depurar aguas residuales y recuperar plata en la industria minera. *Rev. LatinAm. Met. Mat.*, 22, 26-37.
- Puca-Pacheco, M., Guerrero-Aquino, M., Tacuri-Calanchi E. & López-Campos, R. G. (2013). Síntesis y caracterización de nanopartículas superparamagnéticas obtenidas por precipitación en microemulsión inversa para aplicaciones biomédicas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 79(2), 99-106.
- Ramos-Guivar, J. A., Bustamante-Domínguez, A., Mendoza-Carbajal, L., Osorio, A. M., De Los Santos, L., & Barnes, C. H. (2013). Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONS): Structural and magnetic properties for possible biomedical applications. *Revista de Investigación de Física* 16, 1-5.
- Reetz, M. T., & Helbig, W. (1994). Size-Selective Synthesis of Nanostructured Transition Metal Clusters. *J. Am. Chem. Soc.*, 116, 7401-7402.
- Reetz, M. T., Helbig, W., & Quasick, S. A. (1996). In *Active Metals: Preparation, Characterization, Applications*. (A. Editor: Fürster, Ed.) Weinheim, Alemania; Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Schmid, G. (2004). *Nanoparticles* (1 ed.). Alemania: Wiley-VCH.
- Teja, A. S., & Koh, P. (2009). Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 55, 22-45.
- Tomitaka, A., Hirukawa, A., Yamada, T., Morishita, S., & Takemura, Y. (2009). Biocompatibility of various ferrite nanoparticles evaluated by in Vitro



cytotoxicity assays using HeLa cells. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 21, 1482-1484.

Universidad Politecnica de Madrid. (07 de noviembre de 2016). Universidad Nacional de Educación a Distancia. Obtenido de Facultad de Ciencias: <http://www.uned.es/cristamine/fichas/magnetita/magnetita.htm>

Vestal, C., & Zhang, Z. (2004). Magnetic spinel ferrite nanoparticles from microemulsion. *Int. J. of Nanotechnology.*, 1, 240-263.

Yonezawa, T., & Toshima, N. (2004). Advanced functional molecules and polymers. En *Polymer-Stabilized, metal nanoparticles: Preparation, characterization and applications* (Vol. 2, págs. 65-85.). USA: Ed. Science Publishers.

Yutronic, N. (2008). Ni/Ni Oxides Nanoparticles with Potential Biomedical Applications Obtained by Displacement of a Nickel-Organometallic Complex. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8(8), 3820-3827.

Zhu, Y. (1999). Synthesis of magnetite nanoparticles by precipitation with forced mixing. *J. of Nanoparticle Research*, 1, 393-396.