

CM-3001 Química Inorgánica

Aplicaciones de Nanopartículas de Magnetita

Integrantes: Carolina Contreras -Ing. Civil en Computación
Carolina Mondaca- Ing. Civil Industrial
Diego Narvaez -Ing Civil en Biotecnología
Fabián Martínez -Ing. Civil en Minas
Constanza Urzúa- Lic. en cs. Mención Geofísica

Profesora: Mónica Soler
Auxiliar: Gabriel Mendoza
Ayudantes: Josefina Caroca
Joseline Iribarra
Neftali Atabales

Fecha de entrega: 3 de diciembre de 2016
Santiago, Chile

1. Introducción

El origen de algunos de los óxidos metálicos más explotados en Chile se remonta a depósitos del tipo hidrotermales, los cuales contienen en la zona de alteración supérgena óxidos de hierro y cobre, minerales ampliamente explotados por la industria minera. Existen distintos tipos de óxidos, definidos primordialmente por ser compuestos formados por oxígeno y algún otro elemento. Entre las clasificaciones más importantes para los distintos tipos de óxidos existentes en la naturaleza están los óxidos metálicos, no metálicos, oxoácidos, hidróxidos e hidrácidos. Refiriéndose al caso particular de los óxidos metálicos (también llamados óxidos básicos), se sabe que son compuestos formados por una combinación binaria entre oxígeno y un metal, y que al reaccionar con agua forman bases. Una de las características de los óxidos metálicos es que son sólidos a temperatura ambiente, mientras que los óxidos no-metálicos (también llamados óxidos ácidos) puede ser tanto sólidos como líquidos o gases [10].

En Chile se encuentra una zona llamada Franja Ferrífera, la cual se extiende desde la 2da región de Antofagasta hasta aproximadamente la 4ta región de Coquimbo, en donde CMP (empresa CAP) tiene las principales instalaciones, entre las cuales se encuentran: Minas Los Colorados, la cual está ubicada en la III Región y posee reservas totales por 245 millones de toneladas métricas, con una ley media de 48 % de Hierro, Mina El Romeral, ubicada en la IV región y cuyas reservas bordean los 39 millones de toneladas métricas con una ley media de 48 % a ley de corte de 30 %, y finalmente la Mina El Algarrobo, la cual está terminando sus reservas, restándole 2,6 millones de toneladas con ley media de 47.6 % a ley de corte de hierro magnético de 26 %.

El Hierro, como metal de transición, posee una capacidad para formar diversos compuestos oxidados, siendo algunos de estos ampliamente usados por la humanidad desde tiempos remotos, como por ejemplo los pigmentos en pinturas rupestres, en donde se hizo uso de los diferentes compuestos oxidados formados por el Hierro, cada uno de los cuales presenta una serie de colores y tonalidades en función de la cantidad relativa de cada uno de los componentes que posee. Es así como también se ha hecho uso de sus propiedades magnéticas, las cuales presenta en alguna de sus formas de Magnetita, y sus propiedades mecánicas para la fabricación de diferentes utensilios. Con el paso del tiempo, y más aún en los últimos decenios, apoyado todo por grandes avances tecnológicos, ha sido posible multiplicar la cantidad de posibles usos para estos óxidos, abriéndose campo así en áreas tan complejas y primordiales para los seres humanos como la medicina, permitiendo desarrollar técnicas y procedimientos que permiten combatir algunas enfermedades tan complejas como el cáncer. Es por esto, que se han desarrollado sofisticados procesos para la síntesis de distintos óxidos de Hierro, de manera de tener un mayor control sobre la composición y comportamiento de estos compuestos para cumplir con los requerimientos para los cuales han sido creados.

Por la amplitud del tema, el presente informe se centrará en óxidos de hierro, un caso particular de óxidos metálicos, el objetivo de estudio serán las aplicaciones de nanopartículas de Magnetita, la cual ha tenido un alto impacto en áreas biomédicas. Dentro de estos avances se destacan: La hipertemia; que tiene como fin, la especificidad de acción contra el cáncer, ésta ha sido probada sólo en ratas de laboratorio debido al alto campo magnético que se debe utilizar el cual podría causar daños al cuerpo humano. Por otra parte se tiene el transporte de fármacos; con los cuales se puede lograr la administración de fármacos a zonas específicas del cuerpo humano, aun se encuentra en desarrollo de mejores transportadores, y por último se tiene la anisotropía magnética, utilizada como herramienta de análisis estructural de casi todos los tipos de rocas, es una técnica que aún se utiliza sobre todo en los últimos tiempos en búsqueda de anomalías magnéticas.

2. Marco Teórico

2.1. Óxidos metálicos y tipo de enlace

Los óxidos metálicos son compuestos sólidos, formados típicamente por enlaces iónicos o covalentes. Ya que la electronegatividad del oxígeno es 3,5 y la de los metales es típicamente entre 1 y 1,7, se genera una diferencia entre 1,8 y 2,5. Luego, según el diagrama de Ketelaar mostrado en la figura 1, un metal cuya electronegatividad promedie entre 1,5 y 2,4 con el oxígeno formará enlace de tipo mayormente iónico, mientras uno de electronegatividad mayor formará enlaces más covalentes. Un análisis simple permite ver que bajo este concepto, los metales de electronegatividad menor a 1,3 serán los que formen siempre un enlace mayormente iónico con el oxígeno. Una revisión más cuidadosa permitirá establecer qué metales forman enlaces más covalentes con el oxígeno.

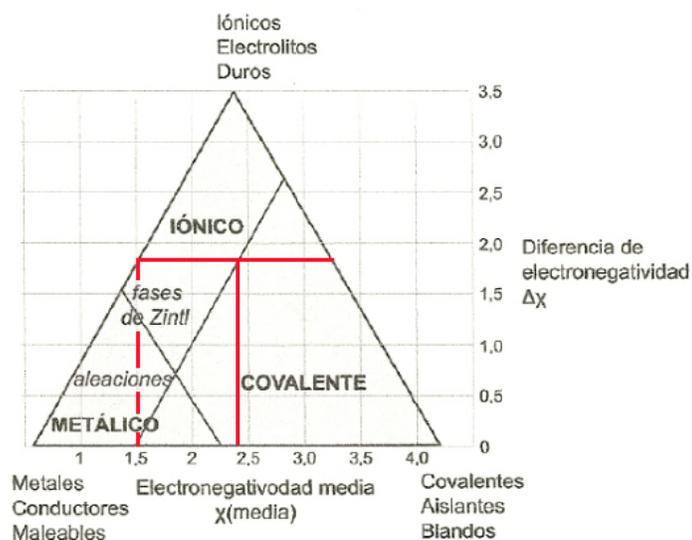


Figura 2.1: Triángulo de Ketelaar. La línea horizontal se encuentra a la altura mínima que generaría un óxido metálico. Las rectas verticales permiten limitar las medias de electronegatividad que corresponden a enlaces mayormente iónicos, de lo que se despeja que metales con $X < 1.3$ forman siempre enlace iónico con el oxígeno. Imagen original: Ernesto de Jesús Alcañiz, Universidad de Alcalá.

En el caso particular del hierro, su electronegatividad es de 1,83 por lo que con el oxígeno promedian 2,66 y su diferencia es 1,67. Eso posiciona a los óxidos de hierro en el borde iónico-covalente del diagrama, por lo que es esperable la formación de cristales más resistentes al esfuerzo físico que los iónicos, y la formación de dipolos moleculares dados por la direccionalidad de enlace de la parte covalente.

2.2. Óxidos de hierro y aplicaciones

Las estructuras más comunes en los óxidos metálicos son:

Estructura tipo Espinela

Óxidos de la forma AB_2O_4 , empaquetamiento cúbico compacto de iones O_2^- , donde los cationes A ocupan 1/8 de los huecos tetraédricos y los cationes B ocupan 1/2 de los huecos octaédricos. En la anotación $A[B_2]O_4$, los corchetes denotan el tipo de catión: A más pequeño y B más grande y con carga alta.[16]

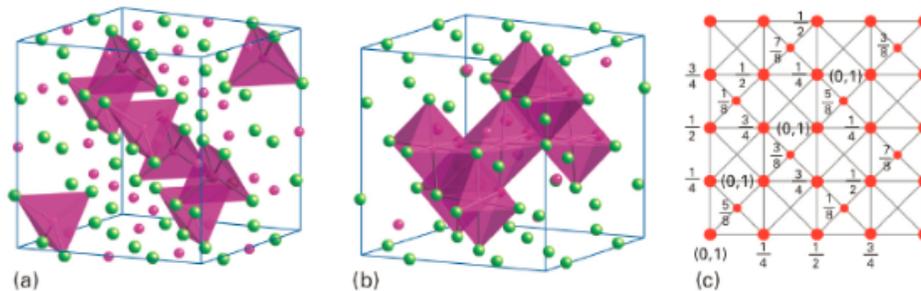


Figura 2.2: (a) catión A huecos tetraédricos (b) catión B huecos octaédricos (c) proyección en el plano

Estructura tipo Perovskita

Los óxidos que poseen esta estructura tienen un sistema cristalino ortorrómbico y fórmula ABO_3 , donde A es un catión grande y puede ser alcalino, alcalinotérreo o lantánido que ocupa la posición central del cubo y se encuentra rodeado por 12 aniones O, mientras que B es también un catión pero de tamaño medio usualmente metal de coordinación, ocupando los vértices del cubo siendo rodeado por 6 átomos de tipo O. Esta estructura está relacionada a materiales con ciertas propiedades eléctricas como sólidos piezoeléctricos, ferroeléctricos y los superconductores de alta temperatura.[16][18]

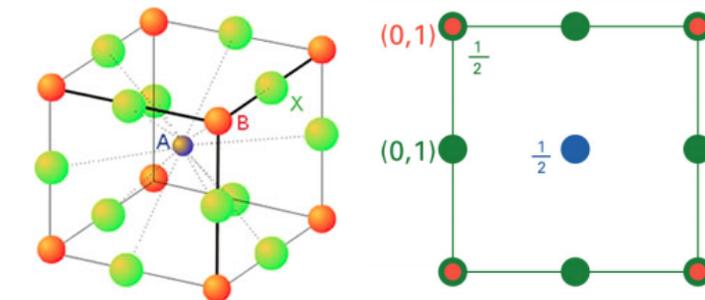


Figura 2.3: Estructura cristalina ABX_3 con su representación de proyección.

Estructura tipo Corindon (Al_2O_3)

Los oxígenos forman un empaquetamiento hexagonal y los aluminios ocupan los huecos octaédricos, pero debido a la desigualdad de valencia de los dos iones, es que hay dos Al^{3+} por cada tres O_2^- para mantener la neutralidad eléctrica por lo que los aluminios ocupan sólo dos tercios de las posiciones octaédricas lo cual lleva a una distorsión de la estructura.[14][16]

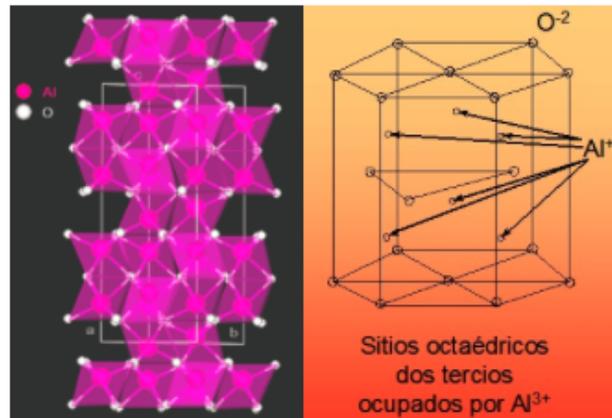


Figura 2.4: Estructura tipo corindón

2.3. Magnetita

La magnetita, conocida también como tetróxido de trihierro u óxido ferroso férrico, se encuentra como mineral en rocas ígneas, como placa fina o dendrita entre placas de mica y además constituye las arenas de los ríos, lagos y mares. Al alterarse pasa a limonita o hematita, teniendo como intermediaria a la maghemita.

Su fórmula es Fe_3O_4 ó $FeO.Fe_2O_3$ y su composición química es de 24.1% de Fe^{+2} , 48.3% de Fe^{+3} y un 27.6% de O^{-2} . De estructura cúbica tipo espinela, con los oxígenos formando una red cúbica centrada en las caras con 32 espacios octaédricos para Fe^{+2} y Fe^{+3} y 64 espacios tetraédricos para Fe^{+3} , tal como se muestra en la figura 2.5 [1]

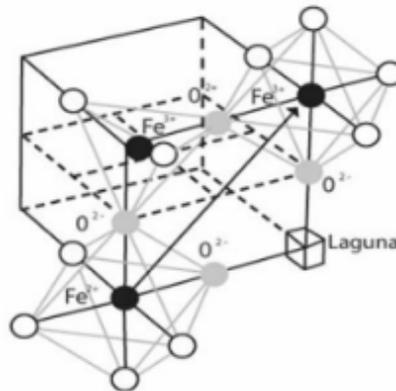


Figura 2.5: Estructura cristalina magnetita

Se sabe que hierro ferroso tiene carga +2 y radio 82 y el hierro férrico tiene carga +3 y radio 67, es decir, ambos tienen un radio pequeño y una gran carga, por tanto son muy polarizantes; por su parte el O^{2-} tiene carga -2 y radio 140, o sea, un gran radio y una gran carga, entonces es muy polarizable; sigue que por la Regla de Fajans la unión de estos compuestos tiene tendencia a ser covalente. También en la figura 2.6 se puede ver la configuración electrónica del Fe^{+2} , Fe^{+3} y el O^{2-} , mostrando la transferencia de un electrón desde el Fe^{+2} hacia el Fe^{+3} usando el O^{2-} para transportarlo.

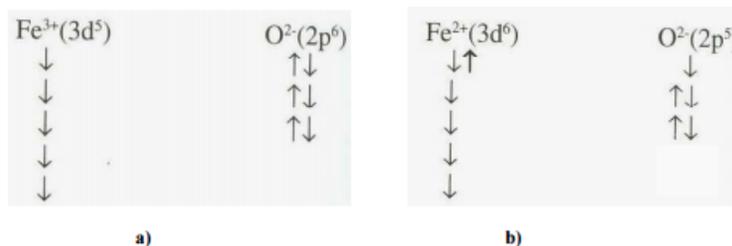


Figura 2.6: a) Configuración electrónica del (Fe^{3+} y O^{2-}) antes de una transferencia temporal de electrones; b) Configuración electrónica del Fe^{3+} y O^{2-} después de una transferencia temporal de electrones. [8]

La magnetita es un material ferrimagnético donde la mitad de los Fe^{3+} tienen el momento magnético de espín en una dirección y la otra mitad en la otra, por lo que se cancelan, disminuyendo el momento total a los iones Fe^{2+} , que todos presentan el mismo momento magnético. [17]

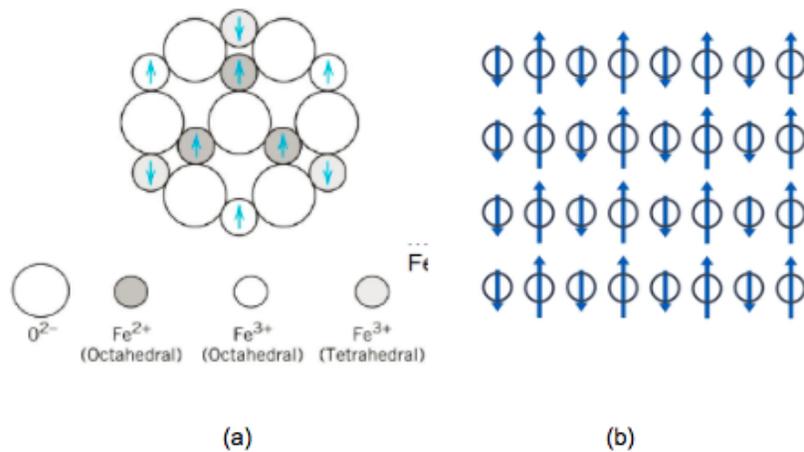


Figura 2.7: Esquema de ordenamiento ferrimagnético

Es producto de que los iones ferrosos y férricos presentes en los espacios octaédricos comparten electrones de valencia, que la magnetita es un compuesto frecuentemente no estequiométrico y de alta conductividad eléctrica. Por sus propiedades magnéticas se utiliza como fabricante de imanes permanentes y como partículas ultrafinas en algunos dispositivos para grabaciones magnéticas y almacenamiento de datos. En biotecnología, se preparan partículas de magnetita con diámetro promedio entre 10 y 15 nm. que se utilizan como ayuda para la inmovilización enzimática. Se usa además como colorante en la producción de vidrios opacos y semiopacos, en los cuales produce las tonalidades verde, azul claro y negro, además de su uso en tintes de pinturas.

3. Discusión

3.1. Nanopartículas de magnetita para uso médico

Procedencia

Las nanopartículas de magnetita pueden ser sintetizadas artificialmente en el laboratorio o bien extraídas de cultivos celulares de microorganismos capaces de producirlas naturalmente, como las bacterias magnetotácticas. Las bacterias magnetotácticas son un grupo de bacterias acuáticas capaces de mineralizar hierro, formando nanopartículas compuestas generalmente por cristales de magnetita o greigita de hierro sulfato (FeS_4). Se almacenan en el interior de la bacteria empaquetadas en filamentos proteicos en forma de cadenas. Estas cadenas permiten a las bacterias alinearse en dirección del campo magnético terrestre, sirviendo probablemente como mecanismo de orientación (magnetotaxis). Un ejemplo de bacteria magnetotáctica usada anteriormente en síntesis y extracción de nanopartículas de magnetita es la *Magnetospirillum gryphiswaldense*, que sintetiza normalmente nanopartículas de diámetro medio en torno a los 45 nm y de forma cubo-octaédrica, además de cubrirlas con una membrana lipídica que facilita su transporte a través de membranas celulares, formando una estructura llamada magnetosoma. Sin embargo, el rendimiento suele ser relativamente bajo [13]. Por otro lado, la síntesis artificial puede lograrse por medio de distintos métodos, como la coprecipitación, que se basa en la disolución de sales metálicas en solución acuosa de NaOH, y que al disolverse reaccionan entre sí para formar las nanopartículas en polvo, que precipita [15]

3.2. La Hipertemia

Uno de los principales problemas de los tratamientos de cáncer por quimioterapias es la baja especificidad de su acción. La posibilidad de tratar el cáncer de manera localizada mediante hipertermia inducida artificialmente ha llevado al desarrollo de distintos dispositivos diseñados para calentar células tumorales sin dañar el tejido circundante. Se ha logrado previamente calentar varios tipos de tejido usando partículas de magnetita de entre 20 y 100 nm de largo, expuestas a un campo de 1,2 MHz [11]. La hipertermia es un tipo de terapia contra el cáncer en que se somete tejido corporal a altas temperaturas, con el fin de dañar y matar células cancerosas. Normalmente se utiliza de manera similar a la radioterapia y la quimioterapia, en el sentido de que tiene poca especificidad pero permite que las células tumorales se vuelvan más sensibles a los demás tratamientos. Se han realizado muchos estudios clínicos combinando hipertermia con radioterapia o quimioterapia. Muchos de estos estudios, han demostrado una reducción significativa en el tamaño del tumor al utilizar hipertermia. Sin embargo, no todos estos estudios han mostrado un incremento en la supervivencia de los pacientes que reciben estos tratamientos combinados [12]. En términos amplios, el método consiste en dispersar partículas magnéticas a través del tejido objetivo, y luego aplicando un campo magnético alterno de fuerza y frecuencia suficiente para causar el calentamiento de las partículas. Este calor impactará al tejido dañado (tumor) que las rodea, provocando su muerte si se logra mantener sobre 42°C por más de 30 minutos. Aunque la mayoría de los dispositivos que se han estado realizando para tratamientos de hipertermia con nanopartículas se han visto restringidos por accionamientos inaceptablemente impredecibles del calentamiento de las partículas, esta alternativa posee una ventaja tremenda respecto a los demás tratamientos porque ofrece una manera de asegurar que sólo el tejido blanco del tratamiento (es decir, el tejido tumoral) sea calentado.[11] Para

esta aplicación el tamaño de las partículas de magnetita es muy importante por sus propiedades magnéticas, estas al tener tamaños nanométricos, pertenecen al rango de mono-dominio, es decir que están compuestas por un único dominio magnético, ?...Por ello tienen una imanación permanente a temperatura ambiente, están uniformemente imanados y su momento dipolar magnético por unidad de volumen es máximo.[13]

3.3. Principio de funcionamiento: ciclo de histéresis

Las partículas ferromagnéticas o ferrimagnéticas poseen propiedades de histéresis al ser expuestas a campos magnéticos que varían su sentido en el tiempo. Las partículas del material se ven agitadas al reordenarse conforme al campo magnético aplicado, lo que termina en la generación de calor inducido por campos magnéticos. La cantidad de calor por unidad de volumen está dada por la frecuencia multiplicada por el área del loop de histéresis:

$$P_{FM} = \mu_0 f \oint H dM \quad (3.1)$$

Donde M es la magnetización, H el campo magnético aplicado, f es la frecuencia y μ_0 la permeabilidad del espacio libre. La ecuación anterior no considera ni la formación de corrientes de eddy ni la resonancia ferromagnética, pues las nanopartículas son demasiado pequeñas como para formar corrientes eddy significativas, y las frecuencias de campo usadas son mucho más pequeñas que las que podrían generar resonancia. Se necesita generar calor suficiente para mantener una temperatura de 42°C durante al menos 30 minutos. Calcular la deposición de calor para lograr esto puede ser complicado considerando la presencia de flujos de sangre y perfusión a través de tejidos, ambos fuente importante de pérdida o disipación de energía calorífica, y ambos muy activos cuando un tejido se calienta. Algunos científicos han visualizado este problema como un problema de transferencia de energía en un volumen definido de tejido, que es calentado desde su interior por una fuente repartida homogéneamente (nanopartículas magnéticas). Por su complejidad matemática, el problema del flujo sanguíneo es generalmente evadido y la baja generalización de posibles resultados obtenibles a partir de un análisis tan detallado. Sin embargo, una regla heurística bastante usada es considerar una tasa de deposición de $100mWcm^3$ como suficiente en la mayoría de las circunstancias.

3.4. Transporte de fármacos

Otra de las posibles aplicaciones de nanopartículas magnéticas es la administración de drogas terapéuticas en zonas específicas del cuerpo humano, pudiendo localizarse sólo en la zona afectada, reemplazando así la administración intravenosa, que ataca todo tipo de células, incluidas las sanas, por lo que disminuiría los efectos colaterales y las dosis del fármaco. La idea es utilizar portadores magnéticos (nanopartículas formadas por un núcleo magnético que generalmente es magnetita o maghemita, recubiertas con un material biocompatible) las cuales unidas a la droga se inyectan al sistema sanguíneo en forma de ferrofluido, se aplica un campo magnético externo para concentrar el ferrofluido en un sitio específico del cuerpo, luego la droga puede ser liberada por medio de alguna actividad enzimática, cambios en las condiciones fisiológicas como el pH o la temperatura. Se han realizado diversos experimentos, desde los primeros ensayos en la década de los 70 con diversos animales, a pesar del éxito en varias, aún existen serias dificultades en este transporte debido a la posibilidad de embolia (obstrucción de una vena o arteria) por acumulación de portadores

magnéticos y la toxicidad de estos portadores. Sin embargo, resultados preclínicos y experimentales recientes indican que aún es posible vencer estas limitaciones. [11]

3.5. Nanopartículas de magnetita en Cs. de la Tierra

Anisotropía Magnética

El término anisotropía magnética se entiende generalmente como la variabilidad direccional en la magnetización, ésta en los últimos años ha tenido exitosas interpretaciones de las orientaciones del elipsoide magnético, a diferencia de la magnitud de la anisotropía debido que esta responde a un proceso mucho más complejo que es el análisis dentro de las rocas, se debe tener en cuenta que algunos factores que determinan los tejidos magnéticos son la simetría cristalina, propiedades físicas del mineral, simetría tectónica, tensión, fusión, plasticidad cristalina, entre otros, en donde la anisotropía magnética proporciona el registro de algunas combinaciones de estos factores.

Métodos discriminatorios de medición y análisis nos permiten separar y caracterizar diferentes minerales, sus distribuciones de tamaño de grano y sus distribuciones de orientación con éxito variable, en grados variables. Los métodos de magnetización y par de campo alto permiten el aislamiento riguroso de componentes lineales (diamagnético, paramagnético y antiferromagnéticos) y saturados (ferromagnéticos). Las mediciones AARM (Anisotropía de magnetización remanente no-histeresis), AIRM (Anisotropía de magnetización remanente isoterma) Giromagnecia, caracterizan diferentes subconjuntos portadores de remanencia del conjunto ferromagnético.[19]

Debido a su propiedad básica, es decir, desviar la magnetización en un cuerpo magnetizado desde un campo ambiente, puede influir en la configuración de una anomalía magnética sobre el cuerpo magnéticamente anisotrópico. En la Figura 3.1 se presentan anomalías sobre un cuerpo hipotético esférico con susceptibilidad magnética media 0,1 y con diferentes anisotropías magnéticas. Es claro que las anomalías sobre el cuerpo pueden ser diferentes debido a diferentes anisotropías. Si el grado de anisotropía es $P = 4$ figura 3.2 el desplazamiento del máximo de la anomalía positiva del punto de proyección del centro de un cuerpo es más de la mitad del radio del cuerpo.[20]

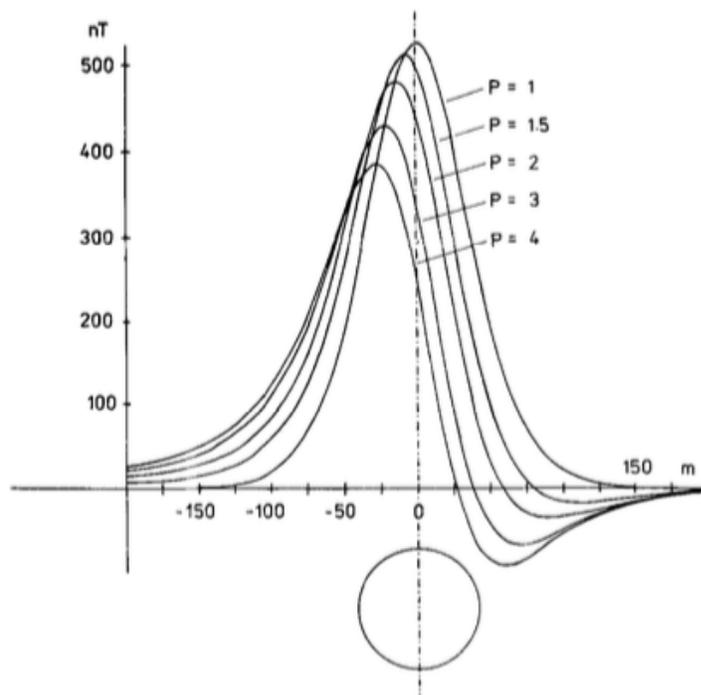


Figura 3.1: anomalía campo magnético

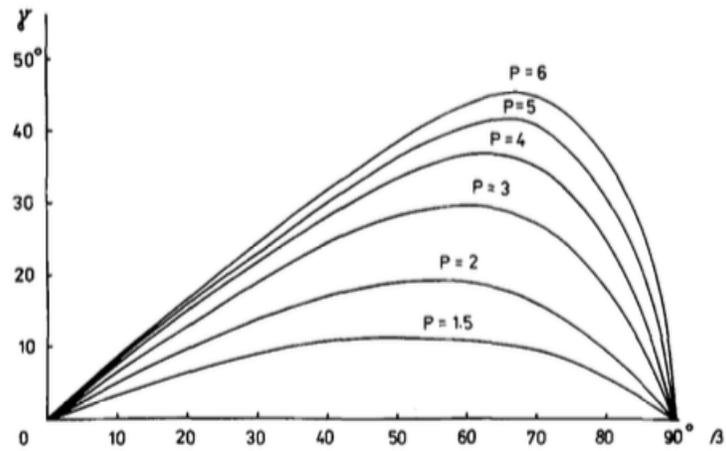


Figura 3.2: dependencia del ángulo de deflexión entre la intensidad del campo magnético y el vector de magnetización y los grados de magnetización anisotrópica

4. Conclusión

Las nanopartículas de magnetita presentan ventajas de considerable interés en el campo de la medicina, pues gracias a sus propiedades magnéticas permiten su control a distancia sin necesidad de escindir tejido, su tamaño reducido es comparable al de otras células, virus e incluso genes y su capacidad para unirse a partículas orgánicas permite su utilización como transportador de fármacos a células dianas concretas. Este último punto resuelve uno de los problemas más frecuentes de la farmacia tradicional. Aunque su aplicación en humanos aún no se concreta, su desarrollo para atacar enfermedades como el cáncer podría ser un gran avance médico, incluso llegar a ser una cura para este último el cual tiene una tasa de mortalidad de 171 casa 100 mil personas cada año. En ciencias de la tierra, su interés radica en el análisis de anomalías magnéticas, el cual radica en la extracción de nuevos minerales, como también el conocimientos de la Tierra, luego de todos sus procesos de transformación desde su génesis.

5. Referencias

Referencias

- [1] CASTAÑO, J.G. Y ARROYAVE C. (1997) La funcionalidad de los óxidos de hierro. Madrid: Rev Metal. Solid Earth, 6, 1259-1276, 2015.
- [2] MANIFACIER, J. C. (1982), Thin metallic oxides as transparent conductors. Montpellier: Thin solid films.
- [3] BARBÉ, C. J.; ARENDSE, F.; COMTE, P.; JIROUSEK, M.; LENZMANN, F.; SHKLOVER, V. Y GRÄTZEL, M. (1997) Nanocrystalline Titanium Oxide Electrodes for Photovoltaic Applications. Lausanne: Journal of the American Ceramic Society.
- [4] FUJISHIMA A.; ZHANG X. (2005), Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. Kanagawa: Elsevier SAS.
- [5] OLIVEIRA L.; FABRIS J. Y PEREIRA M. (2013), ÓXIDOS DE FERRO E SUAS APLICAÇÕES EM PROCESSOS CATALÍTICOS: UMA REVISÃO. Quím. Nova vol.36 no.1 São Paulo 2013.
- [6] ROZENBERG, ET.AL. (2002). High-pressure structural studies of hematite Fe_2O_3 . Physical Review B, 65(6), 064112.
- [7] WANG, X. G., ET. AL The hematite (Fe_2O_3) (0001) surface: evidence for domains of distinct chemistry. Physical Review Letters, 81(5), 1038.
- [8] AQUINO, E.; PRIETO, F.; GALÁN, C.; GONZÁLEZ, C.; BARRADO, E. Y MEDINA, J. (2010) Síntesis y caracterización de ferritas de Cd, Pb y Mn vía hidroquímica. Chile: Avances en Ciencias e Ingeniería.
- [9] CORNELL, R. M., SCHWERTMANN, U. (2003). The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses. John Wiley Sons.
- [10] UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Oxígeno sobre elementos: reglas de nomenclatura. http://portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/u2/oxigeno_elementos/reglas_nomenclatura [Consulta: 2 de diciembre de 2016]
- [11] PANKHURST, CONNOLLY, JONES AND DOBSON (2003) Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. Journal of physics D. 36. R167-R181.
- [12] NIH. NATIONAL CANCER INSTITUTE. HYPERTHERMIA IN CANCER TREATMENT <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/types/surgery/hyperthermia-fact-sheet> [Consulta: 3 de diciembre de 2016]
- [13] ANDER GARCÍA DIEZ (2014). Aplicaciones de nanopartículas de magnetita de origen bacteriano. Memoria de grado en física. Euskadi, Universidad del País Vasco, Facultad de ciencia y Tecnología. (1-9)
- [14] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA. Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales: Unidad 14. Materiales Cerámicos para ingeniería (en línea) https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm14/fcm14_2.html [Consulta: 2 de diciembre de 2016]
- [15] JACQUELINE CORREDOR, FÉLIX ECHEVERRÍA. (2007) Síntesis de óxidos de hierro nanoparticulados. Scientia et Technica Año XIII, No 36. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- [16] MÓNICA SOLER, 21 de octubre 2016, Material de cátedra.
- [17] MÓNICA SOLER, 25 de noviembre 2016, Material de cátedra.

- [18] Textos científicos. Los sólidos iónicos, La estructura de tipo perovskita. <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-ionico/solidos-ionicos> [Consulta: 2 de diciembre de 2016]
- [19] FRANTISEK HROUDA, Geofyzika, Czechoslovakia Magnetic Anisotropy of rocks and its application in Geology and Geophysics.
- [20] GRAHAM J. BORRADAILE AND MIKE JACKSON Geological Society, London, Special Publications 2004, v.238; p299-360, Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): magnetic petrofabrics of deformed rocks