



El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión

Francisco Bautista^{1,*}, Rubén Cejudo-Ruiz¹, Bertha Aguilar-Reyes², Avto Gogichaishvili²

¹ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Campus Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

² Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Instituto de Geofísica-Unidad Michoacán, Campus Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

* leptosol@ciga.unam.mx

Resumen

Los óxidos de hierro se encuentran en todos los suelos en cantidades diversas, son utilizados como indicadores de procesos pedogenéticos y reflejan los ambientes de formación del suelo. Por otro lado, estos componentes afectan las propiedades y funciones de los suelos, porque influyen en el color, la agregación, la capacidad de intercambio de cationes y la retención de fósforo en el suelo. Una característica de los óxidos de hierro es la formación de minerales ferrimagnéticos; debido a esto, y mediante la utilización de técnicas magnéticas se pueden identificar algunos procesos pedogenéticos. El objetivo de este trabajo es la descripción de las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones potenciales, como parámetros *proxy*, en la clasificación de suelos. Se mencionan los portadores magnéticos, las propiedades magnéticas, las formas de análisis y sus aplicaciones. Las propiedades magnéticas de los suelos permiten identificar y cuantificar los minerales magnéticos y relacionarlos con los procesos pedogenéticos. Las mediciones magnéticas son fáciles de realizar y son de bajo costo, lo cual permite realizar el análisis de un gran número de muestras, con lo que es posible la elaboración de mapas de suelos, la identificación de procesos pedogenéticos y el mejoramiento de la clasificación de suelos. En países con alta diversidad edáfica como México, es posible la generación de nuevos tipos de aplicaciones de las propiedades magnéticas de los suelos.

Palabras clave: génesis de suelos, mapas de suelo, procesos edáficos, magnetismo.

Abstract

Soils contain variable amounts of Fe oxides, which may be used as indicators of pedogenic processes and the environments related to soil formation. Also, their presence affects soil properties and functions, because it influences the color, aggregation, cation exchange capacity, and phosphorus retention in soils. Since Fe oxides are ferrimagnetic minerals, pedogenic processes may be revealed using magnetic techniques. The aim of this study was to describe the magnetic properties of soils and their potential applications as proxy parameters in the classification of soils. We describe and discuss here the main magnetic carriers, their properties, forms of analysis and applications. The magnetic properties of soils may be used to identify and quantify the magnetic minerals. The magnetic measurements are easy, fast and inexpensive, which allows the analysis of a large number of samples, thereby allowing mapping of soils, identification of pedogenic processes and improvements in soil classification.

Keywords: soil genesis, soil cartography, soil process, magnetism.

1. Introducción

Los óxidos de hierro son los óxidos metálicos más abundantes en el suelo (Schwertmann y Taylor, 1989) y son utilizados como indicadores de procesos pedogenéticos (Schwertmann, 1985, 1993) porque se encuentran prácticamente en todos los suelos, en cantidades variables con un intervalo medio de 0.5 a 5% (Bodek *et al.*, 1988; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004). Los óxidos de hierro influyen, en algunos grupos de suelo en particular, en el color, agregación, capacidad de intercambio de cationes, retención de fósforo y la nutrición vegetal (Schwertmann, 1985, 1993; Shewertmann y Taylor, 1989; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004). En la actualidad, la identificación y la cuantificación de los óxidos de hierro, mediante métodos químicos, se dificulta debido a la pérdida de material por los procesos de extracción y purificación de las muestras. La identificación de los óxidos de hierro se realiza comúnmente con técnicas de difracción de rayos X y mediante la micromorfología; sin embargo, se requiere que estos óxidos sean abundantes en la muestra y los cristales sean grandes y bien arreglados. En ese sentido, las técnicas magnéticas pueden ser de gran utilidad en la caracterización de los óxidos de hierro ya que dichas técnicas son altamente sensibles, esto permite identificar y describir los minerales magnéticos, aun cuando se encuentran en concentraciones menores al 1% (Evans y Heller, 2003).

La discriminación entre portadores magnéticos es posible, por el comportamiento magnético que presentan los minerales y que pueden tener los siguientes estados magnéticos: diamagnetismo, paramagnetismo o ferromagnetismo (Babanin, 1973; Babanin *et al.*, 1998; Maher y Thompson, 1999; Roberts *et al.*, 2011).

Una característica de los óxidos de hierro es la formación de minerales ferrimagnéticos, lo cual les permite: a) registrar los elementos de campo magnético terrestre; y b) registrar cambios climáticos y diferentes procesos ocurridos en la naturaleza (paleosuelos y suelos enterrados, incendios forestales y quema agrícola, entre otros).

Las técnicas magnéticas, particularmente la susceptibilidad magnética, aplicadas al análisis de suelos se han desarrollado y empleado desde la década de los setenta (Opdyke *et al.*, 1972; Barton y McElhinny, 1981); sin embargo, en Latinoamérica, los estudios son aun muy escasos (Carlos *et al.*, 1999; Chaparro *et al.*, 2002, 2008). En México, existen muy pocos trabajos que emplean esta técnica para investigar la génesis de suelos (Ortega *et al.*, 2004; Rivas *et al.*, 2006, 2012), y para estudios de suelos enterrados y paleosuelos (Sedov *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2011; Solleiro *et al.*, 2011). Cabe mencionar que otros procedimientos como son: la adquisición de magnetización remanente isotérmica (MRI) y de magnetización remanente anhistérmica (MRA), así como la obtención de curvas termomagnéticas, que permite una interpretación más completa de procesos que son registrados en suelos y sedimentos; no han sido utilizadas exhaustivamente.

México como país edafodiverso -por la diversidad de grupos, calificadores primarios y calificadores secundarios de suelo, según el esquema de clasificación de la WRB, 2006- ofrece amplias posibilidades para realizar estudios de las propiedades magnéticas para estudios básicos sobre génesis, clasificación y geografía de los suelos.

El objetivo de este trabajo consiste en describir los tipos y características de los minerales magnéticos y mostrar los beneficios de su uso para estudios de clasificación, cartografía y génesis de suelos.

2. Los minerales magnéticos y sus formas de medición

Existen diferentes estados magnéticos. Los tres primeros incluyen momentos magnéticos alineados paralelamente o anti-paralelamente en ausencia de un campo magnético. Las dos categorías restantes comprenden materiales que son magnéticos sólo en presencia de un campo magnético (Tabla 1).

En el suelo suelen estar presentes todos los minerales magnéticos, excepto los ferromagnéticos. La presencia de minerales ferromagnéticos en el suelo está vinculada con los procesos de contaminación. Las técnicas magnéticas han sido desarrolladas y mejoradas con rapidez, por lo que se han convertido en herramientas muy útiles para interpretar distintos procesos que ocurren en el suelo de manera natural o por contaminación. Los minerales de hierro de manera natural presentan transformaciones debido a las condiciones oxidantes o reductoras en las que se encuentran, lo que da lugar a aumento o disminución de la señal magnética (Figura 1). Bajo condiciones oxidantes y con falta de oxígeno como las que se provocan con el fuego agrícola o por el uso de combustibles fósiles se induce la transformación de los minerales de hierro II a III del tipo de la maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) y magnetita (Fe_3O_4), lo cual da lugar al aumento de la señal magnética (Maher *et al.*, 2003). En condiciones naturales en sitios no contaminados se ha reportado la transformación de los precursores de la ferrihidrita ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) en minerales ferrihidrita ferrimagnética (Michel *et al.*, 2010).

Michel *et al.* (2010) reportan que una secuencia de transformación de minerales de hierro en suelos puede ser: ferrihidrita \rightarrow ferrihidrita ordenada ferrimagnética \rightarrow hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) es lenta y consistente pero se ha observado en suelos de las diferentes áreas geográficas (Torrent *et al.*, 2006), esta transformación puede producirse a temperatura ambiente. La mezcla de minerales ferrimagnéticos y hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) genera un aumento de la señal magnética en los suelos. También es conocida la formación de minerales ferrimagnéticos por actividad biológica (Maher, 1986; Thompson y Oldfield, 1986).

Una propiedad fácilmente medible y que se emplea en otras partes del mundo para identificar diferentes tipos de materiales magnéticos, es la susceptibilidad magnética (es la capacidad que tiene un material para adquirir una magnetización). En una muestra de suelo,

Tabla 1. Estados magnéticos

Comportamiento Magnético	Momento magnético	Minerales con este comportamiento	Susceptibilidad
Ferromagnético	Altamente alineados ↑↑↑↑↑§	Fe puro, Ni y Cr	Intensa y positiva
Ferrimagnéticos	Alineados pero con fuerzas opuestas y desiguales ↑↓↑↓↑↓	Magnetita (Fe_3O_4), maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$), greigita (Fe_3S_4), pirrotita (Fe_3S_8), serie de titanomagnetitas ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$) y titanomaghemitas ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$) y otros compuestos de Fe.	Intensa y positiva
Antiferromagnéticos	Acoplamiento antiparalelo ↑↓↑↓↑↓	Hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) y goethita (αFeOOH).	Moderada y positiva
Paramagnéticos	Alineados al azar, se alinean en presencia de campo magnético. ←↑→↓	Biotitas (Mg, Fe, Al silicatos), pirita (FeS_2), lepidocrocita (γFeOOH) y ferrihidrita ($5\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$).	Débil y positiva
Diamagnéticos	Magnetización débil y opuesta al campo magnético aplicado ↓↓↓	Minerales que no contienen Fe, como alkali-feldespatos (Ca, Na, K, Al silicatos) y carbonatos.	Débil y negativa

§ Representación gráfica de los momentos magnéticos al aplicar un campo magnético en la dirección ↑.

la susceptibilidad magnética medida representa la suma de las susceptibilidades magnéticas individuales de los minerales presentes (ferrimagnéticos, antiferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos) (Tabla 2). Este parámetro magnético nos da información sobre la mineralogía (origen y ambiente de formación), así como de la geoquímica. Los valores de la susceptibilidad magnética son altos y positivos para los materiales ferromagnéticos (Fe puro, Ni, Cr) y ferrimagnéticos (magnetita [Fe_3O_4], maghemita [$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$], pirrotita [Fe_3S_8], greigita [Fe_3S_4], entre otros). Los minerales antiferromagnéticos (hematita [$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$], goethita [αFeOOH]) registran valores medios y positivos, mientras que los minerales paramagnéticos presentan valores bajos, también positivos. Por otro lado, los materiales diamagnéticos (materia orgánica, plásticos, cuarzo [SiO_2], alkali-feldespatos [Ca, Na, K, Al silicatos], calcita [CaCO_3], entre otros) dan valores bajos y negativos (Tabla 2).

La susceptibilidad magnética volumétrica o másica dependiente de la frecuencia ($\chi_{\text{df}}\%$ y $\chi_{\text{df}}^{\text{m}}\%$) se utiliza como indicador de los minerales ferrimagnéticos pedogénicos, infiriendo que los minerales pedogénicos se encuentran predominantemente entre los granos supraparamagnéticos y los granos estables de dominio magnético simple (Lu *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2013).

Las curvas termomagnéticas con un comportamiento irreversible sugieren cambios en la mineralogía magnética producida por el calentamiento (formación de minerales de la serie de las titanomagnetitas o titanomaghemitas). Con las curvas magnéticas de calentamiento permiten inferir la presencia de algunos minerales de hierro, como por ejemplo, la primera disminución de la intensidad entre 100 a 150 °C es característica de la goethita (Hunt *et al.*, 1995; Geiss y

Banerjee, 1999); la fase entre 250 a 300 °C se asocia con la presencia de lepidocrocita (γFeOOH) (Thompson y Oldfield, 1986); la fase entre 300 a 350 °C se asocia a las pirrotitas (Maher y Thompson, 1999; Evans y Heller, 2003), la fase entre 500 y 580 °C correspondiente a magnetita o maghemita (Hunt *et al.*, 1995), entre otras.

Las curvas de magnetización remanente isothermal MRI pueden identificar la concentración relativa de minerales ferro-ferrimagnéticos y antiferromagnéticos, en términos de su coercitividad magnética (Evans y Heller, 2003). Si la curva se satura en campos muy débiles y adquiere una intensidad relativamente alta, esto indicará la presencia de material ferromagnético (Fe, Ni, Co), si la señal es más baja pero se satura en campos entre 200 a 300 mT entonces se trata de material ferrimagnético (minerales de la serie titanomagnetita/titanomaghemita) y si la muestra se satura en campos muy altos indicará la presencia de material con componentes antiferromagnéticos (hematita, goethita) (Ma *et al.*, 2013).

El valor de la magnetización remanente isothermal de saturación del suelo, es dependiente del tipo de mineral, de baja coercitividad (ferrimagnético) o de alta coercitividad (antiferromagnético). La forma de la curva indica el tipo de mineral predominante (Hao *et al.*, 2012).

3. Clasificación y génesis de suelos

La dinámica de los minerales de hierro y sus propiedades magnéticas permiten su utilización como indicadores de procesos, como la depositación, emisión, intemperismo, absorción, disolución, entre otros, relacionados con el

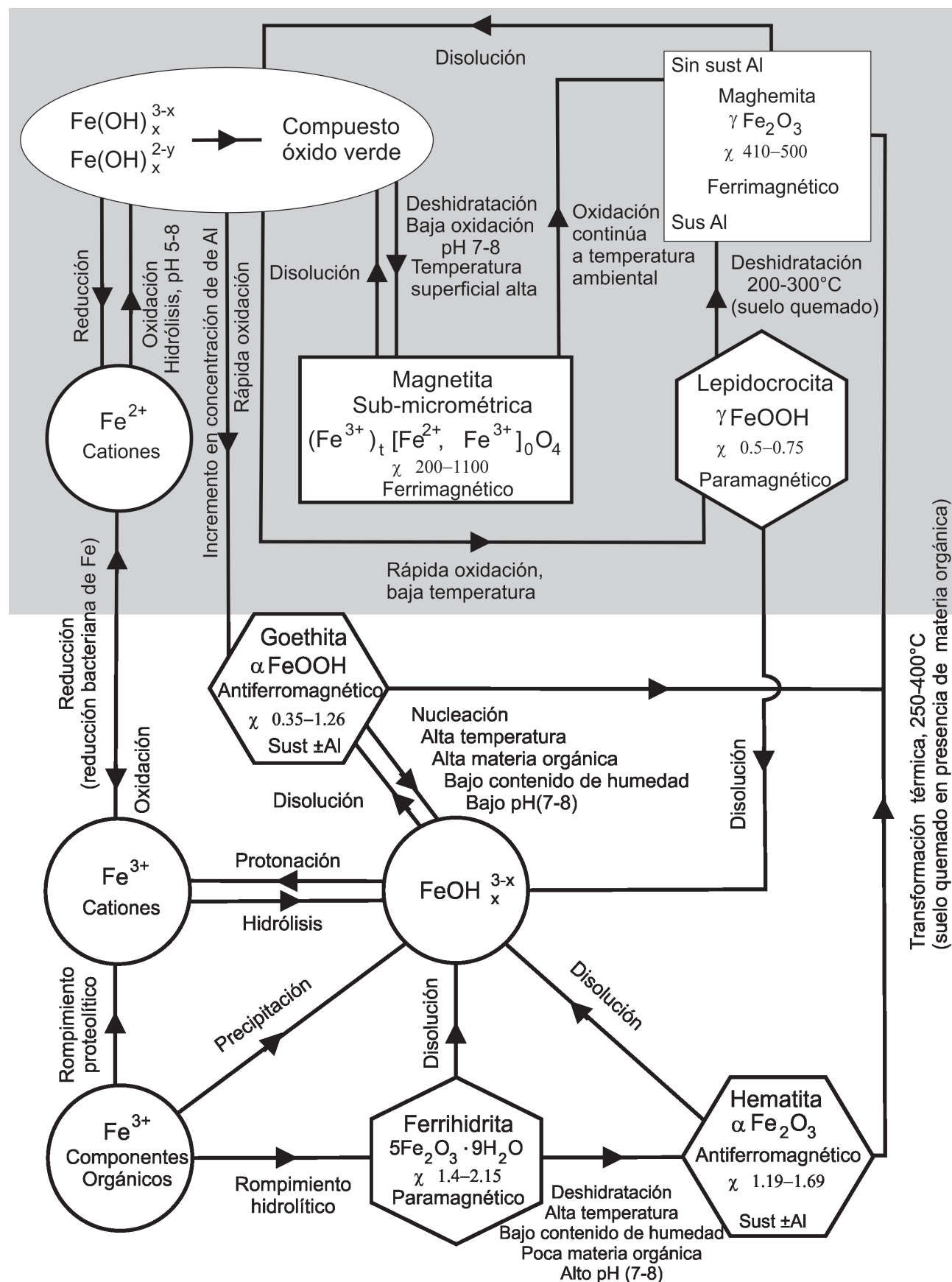


Figura 1. Transformaciones de oxido-reducción de los minerales de hierro, χ valor de susceptibilidad magnética másica en $\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ (Modificado de Maher *et al.*, 2003)

Tabla 2. Las técnicas de medición magnética.

Técnica	Equipo empleado	Interpretación ^{§§}
Susceptibilidad magnética (χ)	Susceptibilímetro 'Kappabridge' marca AGICO, KLY3 o MFK1 Susceptibilímetro Bartington MS2	Es la suma de todos los minerales ferri-ferromagnéticos, antiferromagnéticos y diamagnéticos en la muestra. Es una medida de concentración de minerales magnéticos.
Susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia (κ_{df} % y χ_{df} %).	Susceptibilímetro Bartington MS2 que mide a frecuencias de 0.46 y 4.6 KHz.	Indica la presencia de granos SP (tamaño <0.05 μ m) donde χ_{df} % <2 %: contenido SP<10 % χ_{df} % 2-10 %: mezcla de SP y granos gruesos; χ_{df} % 10-14 %: contenido de SP>75 % de la fracción magnética de la muestra indica procesos bioquímicos inducidos por materia orgánica.
Magnetización remanente isotérmica (MIR).	Magnetómetro criogénico (2G enterprise) o de giro AGICO JR6 y Magnetizador de impulso ASC IM-10	Magnetización adquirida en presencia de un campo magnético. Comúnmente magnetizaciones adquiridas a 1 Tesla son consideradas magnetizaciones de saturación o MRIS. Depende de la concentración de granos magnéticos, principalmente ferro o ferrimagnéticos.
Cociente S_x	Magnetómetro de giro AGICO JR6 y Magnetizador de impulso ASC IM-10	Se obtienen al impartir un campo inverso en una muestra previamente saturada $S_x = MRI_x / MRIS$. Estos cocientes proporcionan una estimación directa de la mineralogía basada en la coercitividad magnética, valores próximos a uno son ferri-ferromagnéticos y menores a 0.7 son de coercitividad alta (p.ej. antiferromagnéticos).
Magnetización remanente anhisterítica (MRA).	Magnetómetro de Giro AGICO JR6 Magnetómetro MOLSPIN	Magnetización adquirida bajo la presencia de un campo directo dentro de un campo alterno decreciente. Es empleada para monitorear alteraciones o transformaciones químicas por medio del tamaño de grano magnético.
Susceptibilidad magnética en función de la temperatura $\chi(T)$.	Susceptibilímetro Bartington MS2 equipado con horno o 'Kappabridge'	Durante el calentamiento de 0 a 700°C los minerales pierden su susceptibilidad magnética a temperaturas características, a esta temperatura se le conoce como la temperatura de Curie (T_c) y es muy específica para cada mineral magnético.

§§ Dearing (1999); Hunt *et al.* (1995); Opdyke y Chanell (1996); Dunlop y Ozdemir (1997); Maher y Thompson (1999); Evans y Heller (2003); Lu *et al.* (2012).

ambiente, ya que los encontramos en las rocas, suelos, cuerpos de agua, atmósfera y biota.

Los minerales de hierro se pueden organizar de manera secuencial considerando sus propiedades magnéticas de mayor a menor valor: hierro metálico>magnetita>maghemita>hematita>goethita>lepidocrocita (Tabla 3).

La magnetita es el producto intermedio esencial del ciclo redox, tiene una magnetización de saturación y un valor de la susceptibilidad magnética varias veces menor que el hierro metálico y cientos de veces mayor que los óxidos de hierro trivalentes e hidróxidos. La magnetita se encuentra de manera natural en la litosfera o se produce por la reducción incompleta de los compuestos de hierro trivalentes durante la calcinación con la materia orgánica o también tiene un origen biogénico (Gladysheva *et al.*, 2007).

El hierro en el suelo suele estar presente como óxidos de hierro (Fe_2O_3) y como oxihidróxidos ($FeOOH$), ambos

se encuentran en los suelos como cristales aislados muy pequeños, se pueden agregar y revestir a otros minerales o translocarse en el perfil. Los óxidos de hierro se emplean como indicadores de la pedogénesis (Schwertmann, 1985; Schwertmann y Taylor, 1989) por ser productos de neoformación, como es el caso del: oxihidróxido férrico amorfo ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$), maghemita (γFe_2O_3), lepidocrocita ($\gamma FeOOH$), hematita (αFe_2O_3), y goethita ($\alpha FeOOH$). Estos óxidos pueden llegar a tener diversos tamaños: uno o más centímetros (horizonte plántico) o muy pequeños (menores de dos micras) como recubrimientos de arcilla o como simples moteados. Por lo que su presencia establece que:

- Cuando dominan sirven para identificar a los horizontes ferrálico, férrico, plántico, petroplántico, pisoplántico, spódico y nítico (Tabla 4) (IUSS Working Group WRB, 2006).
- Cuando su presencia es moderada pueden ayudar

Tabla 3. Óxidos de hierro en suelos.

Mineral/ Susceptibilidad magnética ($\chi \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	Composición	Color	Suelos/Ambiente
Greigita (3200)	Fe_3S_4	Negro-azul	
Magnetita (200-1000)	Fe_3O_4 , Cristalino	Negro	Material primario no pedogénico, en suelos con quema agrícola o por incendios forestales, así como por su formación biogénica
Maghemita (410-500)	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, cristales	Pardo rojizo oscuro	Suelos tropicales y subtropicales/Producto del fuego Formación biogénica Oxidación de la magnetita
Ferrihidrita (1.4-2.15)	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Paracristalino	Pardo rojizo, 5YR a 7.5YR	Gleysols y Podzoles
Hematita (1.19-1.69)	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$, cristales	Rojo, 2.5YR a 7.5 YR	Suelos tropicales y subtropicales; alto intemperismo
Goethita (0.35-1.26)	αFeOOH , cristales	Amarillo, 7.5YR a 10YR	Todos los suelos, producto del intemperismo
Lepidocrocita (0.5-0.75)	αFeOOH , cristales	Anaranjado, 5YR a 7.5YR	Suelos no calizos, hidromorfos (Stagnosols), de climas templados
Pirrotita (0.25-38)	Fe_7S_8 (Tubular, prismático)	Marrón oscuro	

Babanin, 1973; Hunt *et al.*, 1995; Dearing, 1999; Carlos *et al.*, 1999; Pannalal *et al.*, 2005; Roberts *et al.*, 2011.

a identificar algunos horizontes cámbicos, lúvicos así como propiedades ferrálicas, ándicas y vítricas (Figura 2) (WRB, 2006).

- Su ausencia es utilizada en la identificación de horizontes como el albico, antrácuico, hidrágrico; patrón de coloración gléyico, patrón de coloración stagnico, propiedades albelúvicas y condiciones reductoras (IUSS Working Group WRB, 2006) (Figura 3).

La identificación de los óxidos y los oxihidróxidos de hierro es laboriosa y se dificulta por la escasa cantidad presente en los suelos; las técnicas de identificación son semi-cuantitativas. Para la fracción del tamaño de arcilla se utiliza la difracción de rayos X y para la fracción de tamaños limo y arena la micromorfología (forma y color) con microscopio polarográfico.

El hierro pedogenético ha sido investigado empleando métodos de disolución selectiva, que permiten la estimación de sus cantidades a grosso modo (Shuman, 1985; Parfitt y Childs, 1988; Zhang *et al.*, 1997). El tratamiento con ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra y Jackson, 1960) extrae hierro (Fed) de la mayoría de los minerales con hierro pedogenético; esta técnica determina óxidos de hierro lábiles debido a que disuelve los óxidos de hierro de las partículas

más finas entre las que se incluyen la maghemita y magnetita (Van Oorschot y Dekkers, 1999, 2001).

El oxalato ácido de amonio (Feo) también disuelve las partículas finas, extrae hierro poco cristalino y pobremente ordenado (Smith, 1994); la velocidad de disolución se puede clasificar de la siguiente manera: en primer lugar las partículas de grano de fino óxidos de hierro > en segundo lugar los granos gruesos de maghemita > y en tercer lugar la magnetita de grano grueso se conserva (Van Oorschot y Dekkers, 2001). Este método tiene un buen potencial como herramienta en el magnetismo edáfico ya que puede ser adecuado para disolver todos los óxidos pedogénicos (óxidos de hierro de grano fino) en la primera etapa de extracción, mientras que la magnetita queda prácticamente intacta (Van Oorschot y Dekkers, 2001).

El pirofosfato de sodio o potasio (Fep) extrae el hierro presente en el suelo enlazado a complejos orgánicos y peptidiza el hierro de partículas finas de la goethita y ferrihidrita (Yuan *et al.*, 1993; Smith, 1994). Algunas relaciones de hierro son usadas para determinar la presencia de estos minerales en el suelo, como: Feo/Fed que es el índice de la proporción de ferrihidrita una medida de la proporción del total de hierro pedogénico (poco cristalino más ferrihidrita); $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{ditionito})/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{total})$ es una

Tabla 4. Tipo de señal magnética por horizontes, materiales y propiedades de diagnóstico por grupo de suelo.

Grupos de suelo	Horizontes, materiales y propiedades de diagnóstico	Señal magnética	Procesos	Referencia
AT	Ap	Disminución	Disolución, Reducción	Lu <i>et al.</i> , 2012.
AC, LV, LX	A, E	Positivo	Acumulación, Neofomación	Singer <i>et al.</i> , 1992; Singer <i>et al.</i> , 1996.
AC, LV, LX	Bt	Negativo, Positivo	Acumulación, Neofomación	
FR	Box	Positivo	Síntesis, Neofomación	Singer <i>et al.</i> , 1992; Fine <i>et al.</i> , 1989, 1993.
GL, PD	Ag, Bg, podzolitización	Negativo	Disolución, Reducción	Singer <i>et al.</i> , 1996; Maher, 1986; Hanesch <i>et al.</i> , 2007.
ST, GL	Ag, Bg	Positivo	Acumulación	Singer <i>et al.</i> , 1996; Maher, 1986.
ST, PD	B	Positivo	Acumulación	Maher, 1986.
HS, GL	A	Positivo	Biosíntesis, fermentación	
AR	A	Positivo		Maher, 1986.
AR	B	Bajo		Hanesch <i>et al.</i> , 2007
CH, LP, CM	A	Positivo	Acumulación	Babanin <i>et al.</i> , 1998; Hanesch <i>et al.</i> , 2007
LV	Bt	Positivo	Acumulación	Bartel <i>et al.</i> , 2005; Rivas <i>et al.</i> , 2006
	Propiedades Gleyicas	Bajo	Disolución	Bogalo <i>et al.</i> , 2003
Suelos agrícolas y forestales	A	Positivo	Fuego	Singer <i>et al.</i> , 1996; Gedye <i>et al.</i> , 2000
Suelos urbanos	A	Positivo	Contaminación	Aguilar <i>et al.</i> , 2011
GL, ST, PD		Positiva/Negativa	Disolución, Reducción	Hanesch <i>et al.</i> , 2007

AC= Acrisol, LV= Luvisol; FR= Ferralsol; GL= Gleysol; NT= Nitisol; PD= Podzol; ST= Stagnosol; AR= Arenosol; LX= Lixisol; HS= Histosol; CH= Chernozem; CM= Cambisol; LP= Leptosol.

medida de la cantidad total de Fe libre que se hidroliza en ditionito, mientras que la diferencia Fed – Feo es usada para estimar el hierro en la goethita y la hematita (Acevedo-Sandoval *et al.* , 2002, 2004).

A pesar de la gran importancia de los óxidos de hierro edáfico, existen escasos reportes sobre las propiedades magnéticas de los suelos asociadas a los horizontes y por ende a la pedogénesis, algunos de ellos, por grupo de suelo son: Gleysol (Maher, 1986) (Figura 3); Histosol (Feng, 2001), Leptosol (Hanesch *et al.* , 2007; Hannama y Dearing, 2008); Cambisol (Soubrand-Colin *et al.* , 2009), Andosol (Soubrand-Colin *et al.* , 2009), Ferralsol, Acrisol y Luvisol (Aleksieva *et al.* , 2010); Antrosol (Morton *et al.* , 2009; Aguilar *et al.* , 2011) (Tabla 4). Por esta razón es posible deducir que en la caracterización de suelos, algunas técnicas magnéticas podrían utilizarse para identificar horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico y mejorar las definiciones de grupos de suelo y sus calificadores primarios

y secundarios. Además, en suelos enterrados, paleosuelos y aportes de sedimentos las propiedades magnéticas pueden llegar a ser un proxy confiable, barato y complementario que debe ser explorado (Ramírez *et al.* , 2011).

La susceptibilidad magnética se puede llegar a correlacionar con translocaciones y transformaciones de minerales, lo cual permite la identificación de cambios mineralógicos y la intensidad de los procesos pedogénicos, tanto en suelos actuales como en suelos enterrados y paleosuelos (Kumaravel *et al.* , 2010; Solleiro *et al.* , 2011). Otras técnicas magnéticas pueden ser utilizadas para mejorar la comprensión de los procesos de formación de suelos, como por ejemplo la identificación del tamaño de grano magnético con la susceptibilidad dependiente de la frecuencia y la presencia de minerales ferrimagnéticos con la magnetización remanente isoterma de saturación y la identificación de los minerales ferrimagnéticos con la curvas termomagnéticas.

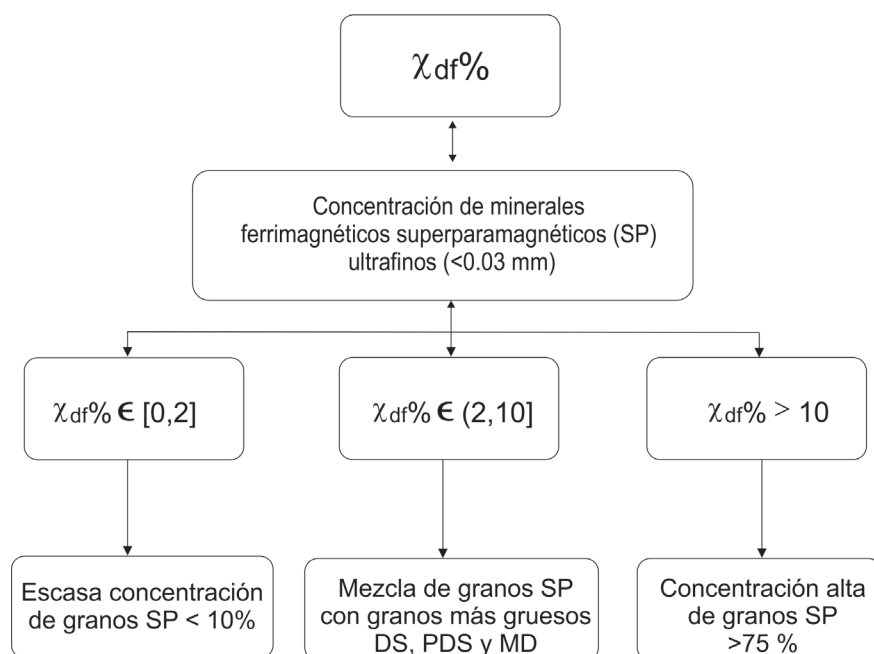


Figura 2. Interpretación de los valores de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia. Partículas ultrafinas superparamagnéticas SP<0.05 μm ; dominio sencillo DS= 0.1-0.05 μm ; Pseudo dominio simple PDS= 1-0.1 μm ; multidominio MD> 1 μm .

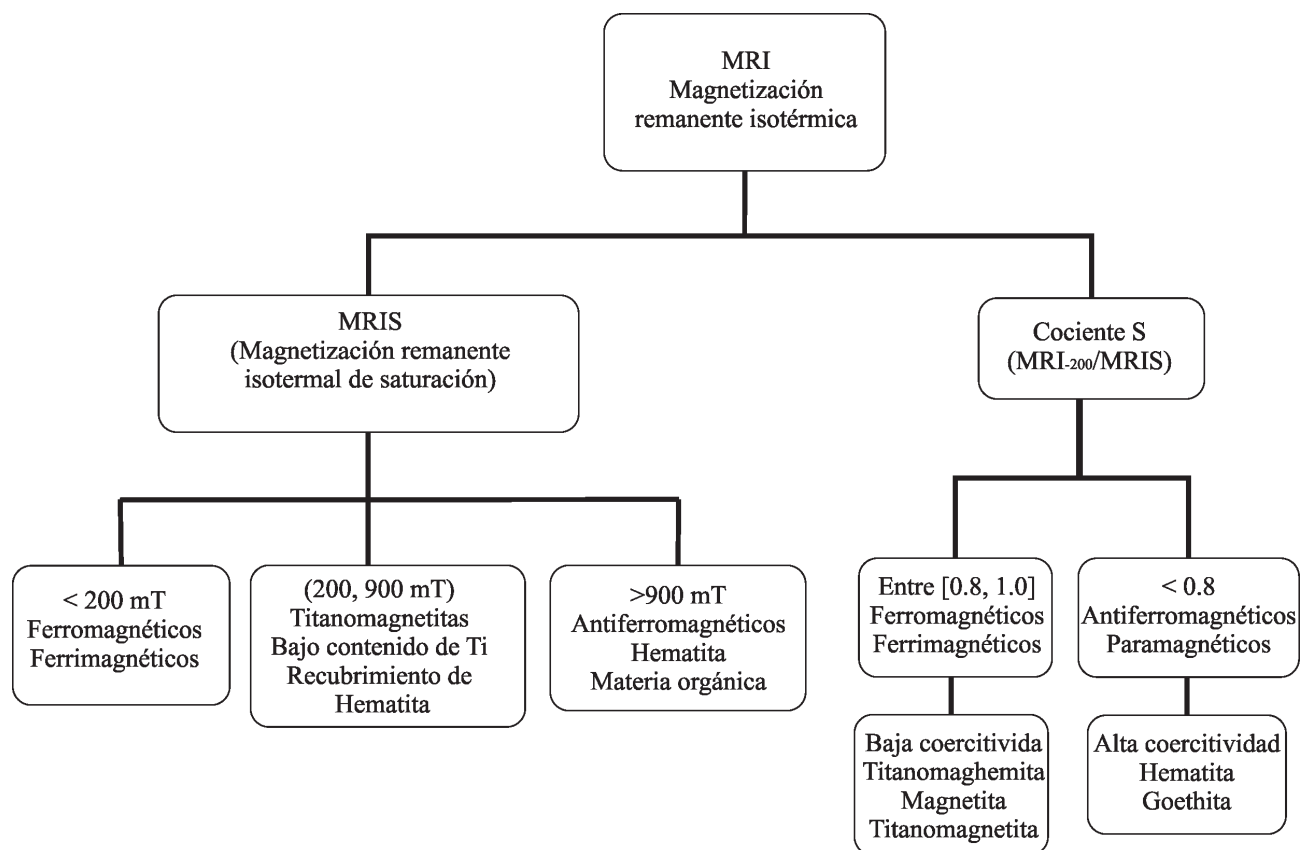


Figura 3. Interpretación de los valores de la magnetización remanente isotermal de saturación.

4. Cartografía

En zonas de alta heterogeneidad edáfica en las cuales se desee hacer agricultura de precisión a nivel parcela (Bautista *et al.*, 2005) es necesario tomar alrededor de 100 muestras con una referencia espacial para posteriormente hacer un análisis espacial utilizando la geoestadística; esta situación a menudo resulta costosa en tiempo y dinero, en este caso, las propiedades magnéticas podrían ser de utilidad ya que es posible analizar una gran cantidad de muestras sin un gran esfuerzo económico; sin embargo, hay que considerar muchas propiedades del suelo no están directamente correlacionados con el contenido de los óxidos de hierro pero al menos pueden ser de utilidad para la elaboración de unidades homogéneas.

Los reportes de estudios de geografía de suelos a escalas de 1:50 000 y 1:250 000 con las propiedades magnéticas son muy escasos (Hanesch *et al.*, 2007; Hannama y Dearing, 2008; Aguilar *et al.*, 2011) (Figura 4); habría que explorar su utilidad por medio de la caracterización de las propiedades magnéticas por grupo de suelo. Dos objetivos podrían ser: a) la evaluación de la medida en que las propiedades magnéticas de una región se pueden asignar a través de un planteamiento análogo tradicional con un

mapa previamente elaborado; b) La comparación entre las propiedades magnéticas de los suelos y la verificación de la concordancia entre las fronteras magnéticas y las unidades cartográficas vecinas.

Las propiedades magnéticas de los suelos también han sido utilizadas en las últimas décadas para otros fines, como por ejemplo en la identificación de clases de drenaje; estudios de contaminación de suelos por metales pesados (Gladysheva *et al.*, 2007; Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar *et al.*, 2013); en estudios de erosión; uso del fuego en la agricultura (roza, tumba y quema); incendios forestales; y en la identificación de suelos enterrados y paleoambientes (Ramírez *et al.*, 2011; Goguitchaichvili *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2013).

5. Conclusiones

Los parámetros magnéticos, como la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia, la adquisición de magnetización remanente isotérmica y de magnetización remanente anhistérmica, la obtención de curvas termomagnéticas, y el cálculo de algunos parámetros magnéticos como la tasa de MRI/ χ y S_{-200} , aplicadas a los suelos permitirán medir la intensidad de las ganancias, pérdidas, transformaciones y translocaciones de los portadores magnéticos a lo largo del perfil, constituyéndose en un *proxy* valioso en la identificación de procesos pedogenéticos, mediante la caracterización de horizontes, materiales y propiedades de diagnóstico.

Las propiedades magnéticas al ser de fácil medición, presentan las siguientes ventajas ante otras técnicas: 1) Se puede hacer un análisis de un número muy grande de muestras y en periodo de tiempo muy corto. 2) Las mediciones magnéticas son altamente sensibles, permitiendo detectar pequeñas variaciones menores al 1% de material magnético presente en la muestra. 3) No se requiere de insumos adicionales para preparar las muestras. 4) La cantidad necesaria para hacer mediciones magnéticas es muy pequeña (20g), por lo que no se requiere de grandes espacios para almacenar muestras.

Con los diversos parámetros magnéticos que se pueden medir, es posible la elaboración de mapas de suelos, clasificaciones de horizontes o bien para realizar monitoreo a bajo costos entre otras aplicaciones.

Agradecimientos

Al CONACYT por el apoyo económico a los proyectos clave CB-2011-01- 1699159; y CONACYT-153289. También a la DGAPA-PAPIIT de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), proyecto IN 223110. B. Aguilar agradece al proyecto PAPIIT IN112113. FRG agradece a la DGAPA-UNAM la beca posdoctoral. A dos revisores anónimos por sus observaciones al manuscrito.

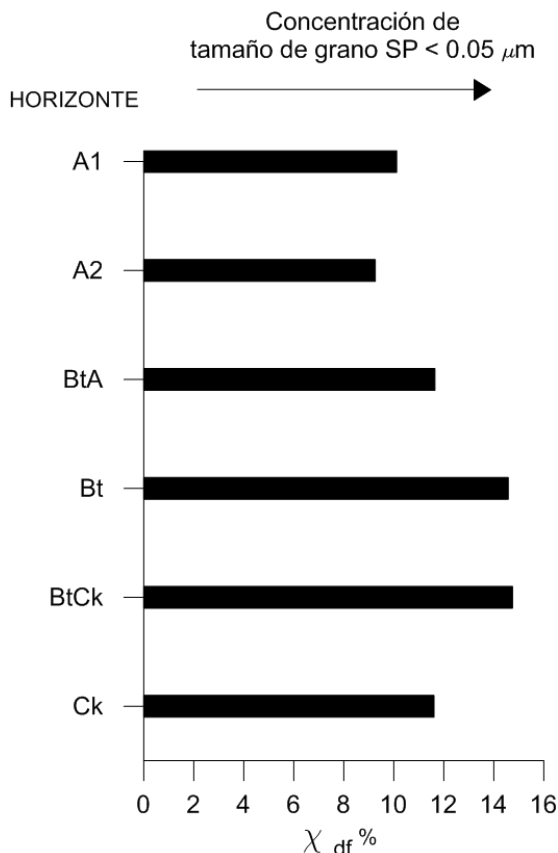


Figura 4. Cambios de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ($\chi_{df} \%$) en un perfil con un horizonte de iluviación de arcilla.

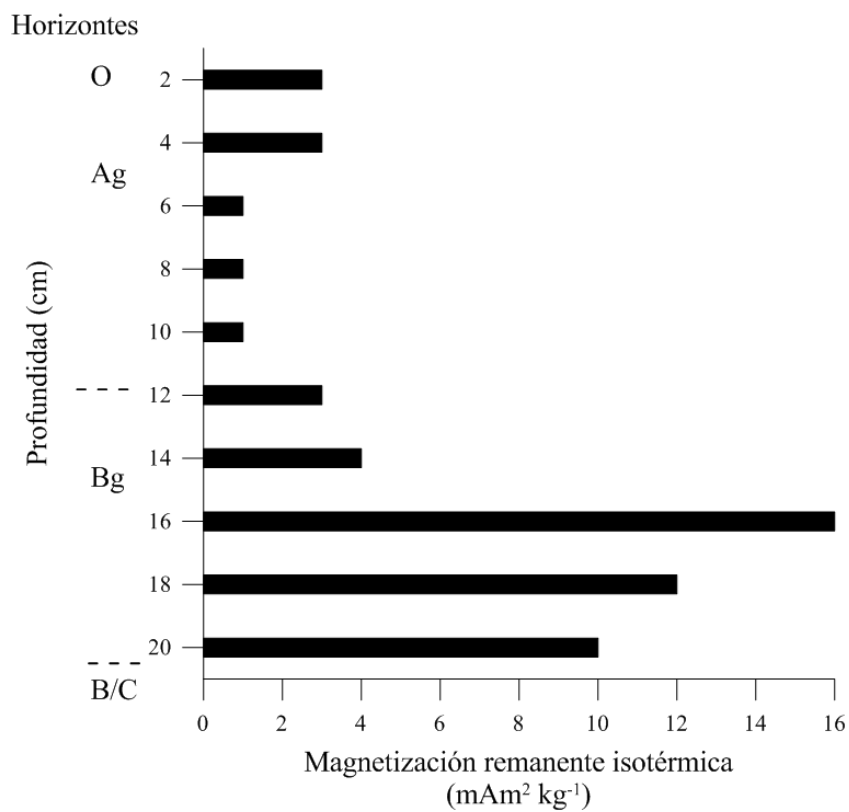


Figura 5. Cambios en los minerales de hierro identificados con la MRI a lo largo del perfil en un Gleysol (Maher, 1986).

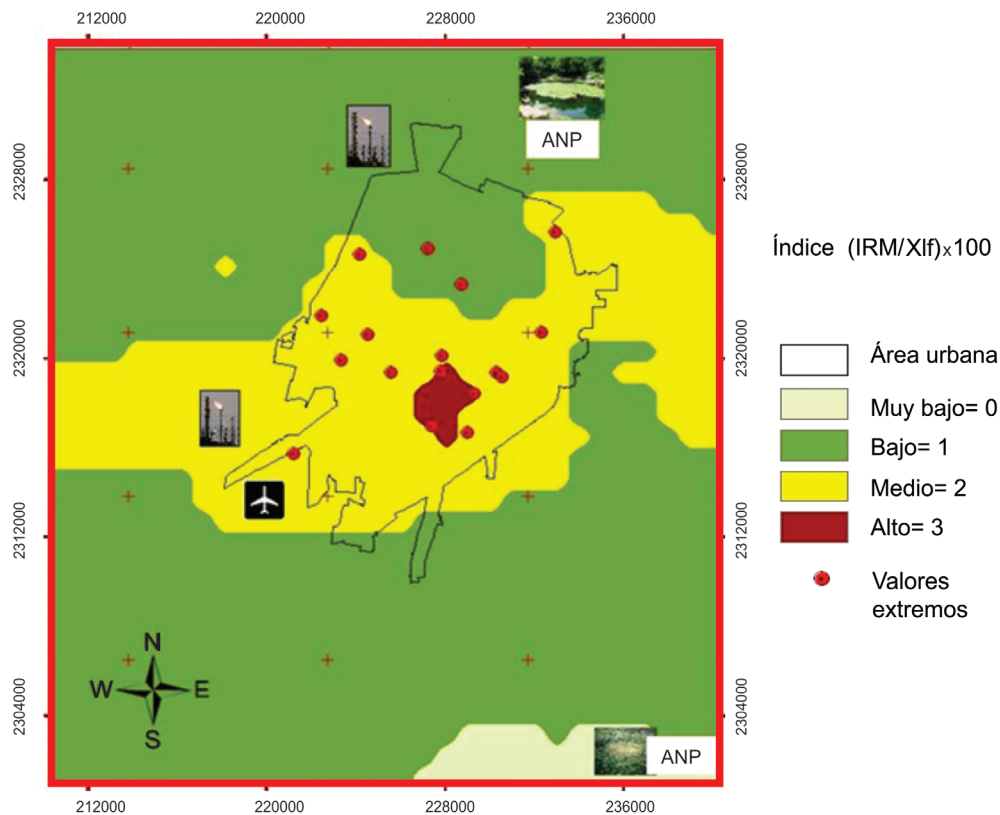


Figura 6. Mapa del índice $(\text{IRM}/\text{Xlf}) \times 100$ de la ciudad de Mérida, Yucatán, México (Aguilar et al., 2011). ANP= Área natural protegida.

Referencias

- Acevedo-Sandoval, O., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E., 2002, Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico: *Agrociencia*, 36, 401-409.
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E., 2004, El papel de óxidos de hierro en suelos: *TERRA Latinoamericana*, 22, 485-497.
- Aguilar, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Morton, O., 2011, Magnetic monitoring of top soils of Mérida (southern Mexico): *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55, 377-388.
- Aguilar, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Quintana, P., Carvallo, C., Battu, J., 2013, Rock-magnetic properties of top soils and urban dust from Morelia, México: implications for anthropogenic pollution monitoring in medium-size cities: *Geofísica Internacional*, 52(2), 121-133.
- Alekseeva, T., Alekseev, A., Ren-Kou, X., An-Zhen, Z., Kalinin, P., 2010, Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in eastern China: *Environmental Geochemistry and Health*, 33, 137-148.
- Babanin, V.F., 1973, The use of magnetic susceptibility in identifying forms of iron in soils: *Soviet Soil Science*, 5, 487-493.
- Babanin, V.F., Ivanov, A.V., Morozov, V.V., Shpil'kina, I.V., 1998, A comparative study of the status of iron compounds based on evidence of Mössbauer spectroscopy and magnetic measurements: *Eurasian Soil Science*, 31, 846-853.
- Bartel, A., Bidegain, J.C., Sinito, A.M., 2005, Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60, 591-598.
- Barton, C.E., McElhinny, M., 1981, A 10,000 years geomagnetic secular variation record from three Australian Maars: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 68, 709-724.
- Bautista, F., Díaz, M.S., Castillo, M., Zinck, A. J., 2005, Soil heterogeneity in karst zone: Mayan Nomenclature, WRB, multivariate analysis and geostatistics: *Eurasian Soil Science*, 38, 80-87.
- Bodek, I., Lyman, W. J., Reehl, W. F., Rosenblatt, D., 1988, *Environmental inorganic chemistry, properties, processes and estimation methods*: New York, Pergamon Press, 1280 p.
- Bogalo, M.F., Heller, F., Villalain, J., Calvo, M., Osete, M.L., Pérez-González, A., 2003, Propuesta metodológica para la caracterización de la mineralogía magnética en estudios paleoambientales, Aplicación al yacimiento Atapuerca: *Geogaceta*, 34, 107-110.
- Carlos, A., Bigham, I. J., Rhoton, F.E., Traina, S.J., 1999, Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil: *Clays and Clay Minerals*, 47, 466-473.
- Chaparro, M.A.E., Gogorza, C.S., Lavat, A., Pazos, S., Sinito, A.M., 2002, Preliminary results of magnetic characterisation of different Soils in Tandil Region (Argentina) affected by the pollution of metallurgical factory: *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 7, 35-58.
- Chaparro, M.A.E., Chaparro, M.A.E., Marinelli, C., Sinito, A.M., 2008, Multivariate techniques as alternative statistical tools applied to magnetic proxies for pollution: a case study from Argentina and Antarctica: *Environmental Geology*, 54, 365-371.
- Dearing, J.A., 1999, *Environmental magnetic susceptibility*, Using the Bartington MS2 system: Inglaterra, British Library, 54 p.
- Dunlop, D., Özdemir, Ö., 1997, *Rock magnetism, Fundamentals and frontiers*: Cambridge, Cambridge University Press, 573 p.
- Evans, M.E., Heller, F., 2003, *Environmental magnetism, principles and applications of enviromagnetics*: San Diego, Academic Press, 299 p.
- Feng, Z.D., 2001, Gobi dynamics in the Northern Mongolian Plateau during the past 20,000+yr: preliminary results: *Quaternary International*, 76/77, 77-83.
- Fine, P., Singer, M.J., La Ven, R., Verosub, K. L., Southard, R. J., 1989, Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences: *Geoderma*, 44, 287-306.
- Fine, P., Singer, M.J., Verosub, K.L., TenPas, J., 1993, New evidence for the origin of ferrimagnetic minerals in loess from China: *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1537-1542.
- Gedye, S.J., Jones, R.T., Tinner, W., Ammann, B., Oldfield, F., 2000, The use of mineral magnetism in the reconstruction of fire history: a case study from Lago di Origlio, Swiss Alps: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 101-110.
- Geiss, C.E., Banerjee, S.K., 1999, A multi-parameter rock magnetic record of the last glacial-interglacial paleoclimate from south-central Illinois, USA: *Earth and Planetary Science Letters*, 152, 203-216.
- Gladysheva, M.A., Ivanov, A.V., Stroganova, M.N., 2007, Detection of technogenically contaminated soil areas based on their magnetic susceptibility: *Eurasian Soil Science*, 40, 215-222.
- Goguitchaichvili, A., Ramírez-Herrera, M.T., Calvo-Rathert, M., Aguilar-Reyes B., Carrancho, Á., Caballero, C., Bautista, F., Morales-Contreras, J., 2013, Magnetic fingerprint of tsunami-induced deposits in the Ixtapa-Zihuatanejo area, Western Mexico: *International Geology Review*, 55, 1462-1470.
- Guo, X., Liu, X., Li, P., Lü, B., Guo, H., Chen, Q., Liu, Z., Ma, M., 2013, The magnetic mechanism of paleosol S5 in the Baoji section of the southern Chinese Loess Plateau: *Quaternary International*, 306, 129-136.
- Hanesch, M., Rantitsch, G., Hemetsberger, S., Scholger, R., 2007, Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping: *Science of the Total Environment*, 382, 351-363.
- Hannama, J.A., Dearing, J.A., 2008, Mapping soil magnetic properties in Bosnia and Herzegovina for landmine clearance operations: *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 285-294.
- Hao, O., Oldfield, F., Bloemendal, J., Guo, Z., 2012, Hysteresis and thermomagnetic properties of particle-sized fractions from loess and paleosol samples spanning 22 Myr of accumulation on the Chinese Loess Plateau: *Geophysical Journal International*, 191, 64-77.
- Hunt, C., Moskowitz, B., Banerjee, S., 1995, Magnetic properties of rocks and minerals, *en* Ahrens, T.J., (ed.), *Rock physics and phase relations: A handbook of physical constants*: U.S.A., American Geophysical Union, reference shelf 3, 189-204.
- IUSS Working Group WRB, 2006, *World Reference Base for Soil Resources 2006*, FAO, Rome, 145 p.
- Kumaravel, V., Sangode, S.J., Siddaiah, N.S., Kumar, R., 2010, Interrelation of magnetic susceptibility, soil color and elemental mobility in the Pliocene-Pleistocene Siwalik paleosol sequences of the NW Himalaya, India: *Geoderma*, 154, 267-280.
- Lu, S., Zhu, L., Yu, J., 2012, Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications: *Catena*, 93, 9-17.
- Ma, M., Liu, X., Hesse, P.P., Lü, B., Guo, X., Chen, J., 2013, Magnetic properties of loess deposits in Australia and their environmental significance: *Quaternary International*, 296, 198-205.
- Maher, B.A., 1986, Characterisation of soils by mineral magnetic measurements: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, 76-92.
- Maher, B.A., Thompson, R., 1999, *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*: Cambridge, Cambridge University Press, 390 p.
- Maher B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T., 2003, Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 201, 321-341.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960, Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate, *en* Swineford, A. (ed.), *Clays and Clay Minerals Proceedings 7th National Conference*. Washington DC: New York, Pergamon, 317-327.
- Michel, F.M., Barrón, V., Torrent, J., Morales, M.P., Serna, C.J., Boily, J.F., Liu, Q., Ambrosini, A., Cismasu, A.C., Brown G.E., 2010, Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 2787-2792.
- Morton, O., Hernandez, E., Martinez-Pichardo, E., Soler-Arechalde, A.M., Lozano, R., Gonzalez-Hernandez, G., Beramendi-Orosco, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2009, Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility: *Geoderma*, 151, 121-125.

- Opdyke, N., Chanell, J., 1996, Magnetic stratigraphy: San Diego, Academic Press International, Geophysics Series, 4, 346 p.
- Opdyke, N.D., Ninkovich, D., Lowrie, W., Hayes, J.D., 1972, The paleomagnetism of two Aegean deep-sea cores: *Earth and Planetary Science Letters*, 14, 145-149.
- Ortega, B., Sedov, S., Solleiro, E., Soler, A., 2004, Magnetic mineralogy in Barranca Tlalpan exposure paleosols, Tlaxcala, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21, 120-132.
- Pannalal, J., Crowe, S.A., Cioppa, M.T., Symons, D.T.A., Sturm, A., Fowle, Y.D.A., 2005, Room-temperature magnetic properties of ferrihydrite: A potential magnetic remanence carrier?: *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 856-870.
- Parfitt, R.L., Childs, C.W., 1988, Estimation of forms of Fe and Al: A review and analysis of contrasting soils by dissolution and Mössbauer methods: *Australian Journal of Soil Research*, 26, 121-144.
- Ramírez, T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M.L., Caballero, M., Gogichaisvili, A., Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernández, A.C., Ortiz, M., Nava, H., Bautista, F., Lopez, G.I., Quintana, P., 2011, Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: tsunamis or storms? –A multi-proxy approach: *Geomorphology*, 139-140, 360-371.
- Rivas, J., Ortega, B., Sedov, S., Solleiro, E., Sychera, S., 2006, Rock magnetism and pedogenetic processes in Luvisol profiles: Examples from Central Russia and Central Mexico: *Quaternary International*, 156-157, 212-223.
- Rivas J., Ortega, B., Solleiro, E., Sedov, S., Sánchez, S., 2012, Mineralogía magnética de suelos volcánicos en una toposecuencia del valle de Teotihuacán: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 1, 1-20.
- Roberts, A.P., Chang, L., Rowan, C.J., Horng, C.S., Florindo, F., 2011, Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe_3S_4): An update: *Reviews Geophysics*, 49, 1-46.
- Schwertmann, U., 1985, Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments, *en* Stucki, J.W., Goodman, B.A., Schwertmann, U. (eds.), *Iron in soils and clay minerals*. NATO ASI Series C217. D: Holanda, Reidel Publishing Company, 267-308.
- Schwertmann, U., 1993, Relationships between iron oxides, soil color, and soil formation, *en* Bigham, J.M., Ciolkosz, E.J. (eds.), *Soil color*. Special publication 31: Madison, Wisconsin. Estados Unidos, Soil Science Society of America, 51-69.
- Schwertmann, U., Taylor, R.M., 1989, Iron oxides, *en* Dixon, J.B., Weed, S.B. (eds.), *Minerals in soil environments*: Madison Wisconsin, Estados Unidos, Soil Science Society of America, 379-438.
- Sedov, S., Solleiro, E., Terhorst, B., Solé, J., Flores, M.L., Werner, G., Poetsch, T., 2009, The Tlaxcala basin paleosol sequence: A multiscale proxy of middle to late Quaternary environmental change in central Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 448-465.
- Shuman, L.M., 1985, Fractionation method for soil microelements: *Soil Science*, 140, 11-22.
- Singer, M.J., Fine, P., Verosub, K.L.V., Chadwick, O.A., 1992, Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast: *Quaternary Research*, 37, 323-332.
- Singer, M.J., Verosub, K.L., Fine, P., TenPas, J., 1996, A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils: *Quaternary International*, 34-36, 243-248.
- Smith, B.F.L., 1994, Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods, *en* Wilson, M.J. (ed.), *Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods*: Londres, Inglaterra, Chapman and Hall, 333-357.
- Solleiro, E., Sycheva, S., Sedov, S., McClung-de-Tapia, E., Rivera-Uria, Y., Salcido-Berkovich, C., Kuznetsova, A., 2011, Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes: *Quaternary International*, 233, 40-52.
- Soubrand-Colin, M., Horan, H., Courtin-Nomade, A., 2009, Mineralogical and magnetic characterization of iron titanium oxides in soils developed on two various basaltic rocks under temperate climate: *Geoderma*, 149, 27-32.
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986, *Environmental Magnetism*: Londres, Allen and Unwin, 227 p.
- Torrent, J., Barrón, V., Liu, Q.S., 2006, Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil: *Geophysical Research Letters*, 33, L02401.
- Van Oorschot, I.H.M., Dekkers, M.J., 1999, Dissolution behaviour of fine-grained magnetite and maghemite in the citrate-bicarbonate-dithionite extraction method: *Earth and Planetary Science Letters*, 167, 283-295.
- Van Oorschot, I.H.M., Dekkers, M.J., 2001, Selective dissolution of magnetic iron oxides in the acid-ammonium oxalate/ferrous iron extraction method—I. Synthetic samples: *Geophysical Journal International*, 145, 740-748.
- Yuan, G., Lavkulich, L.M., Wang, C., 1993, A method for estimating organic-bound iron and aluminum contents in soils: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(11-12), 1333-1343.
- Zhang, M., Alva, A.K., Li, Y.C., Calvert, D.V., 1997, Fractionation of iron, manganese, aluminium and phosphorus in selected sandy soils under citrus production: *Soil Science Society of American Journal*, 61, 794-801.

Manuscrito recibido: Julio 15, 2013.

Manuscrito corregido recibido: Enero 20, 2014.

Manuscrito aceptado: Enero 24, 2014.