

# MAGNETISMO AMBIENTAL EN SUELOS VÍRGENES Y ANTROPIZADOS

*María Julia Orgeira,<sup>1</sup> Marcos A. E. Chaparro,<sup>2</sup>  
Ivana L. Ozán,<sup>1</sup> José D. Gargiulo<sup>2</sup>*

## Introducción

El objetivo de la presente contribución es brindar, en forma resumida, el estado de avance de los estudios de magnetismo ambiental en suelos vírgenes y antropizados en el pasado reciente y en la actualidad. El análisis del desarrollo del registro de estadios isotópicos cálidos en el Cenozoico tardío, y particularmente el inicio, su evolución y su culminación, aportan importante información acerca de los posibles futuros escenarios climáticos. El estudio y evaluación de estos temas se realiza a través de la determinación de *proxy-data* (indicadores indirectos principalmente químicos y biológicos a partir de los cuales se hacen inferencias paleoclimáticas) y es particularmente complicada en determinados tipo de sedimentos continentales, tales como los de depósitos eólicos estériles como el loess; sin embargo, la geofísica ha provisto una metodología para obtener *magnetic-proxy* de aplicación paleoambiental similar al *proxy-data*, particularmente eficiente en estudios de paleosuelos.

Estudios de magnetismo ambiental han sido presentados en secuencias de loess y paleosuelos en diferentes regiones con la finalidad de aportar al

---

<sup>1</sup> IGEBA-UBA-CONICET: orgeira@gl.fcen.uba.ar; ivanalozan@gmail.com

<sup>2</sup> CIFICEN-UNCPBA: chapator@exa.unicen.edu.ar; jdgargiulo@gmail.com

análisis de las variaciones climáticas ocurridas durante el Cenozoico tardío. Un compilación de ellos puede consultarse en Evans y Heller (2003), Orgeira *et al.* (2011), entre otros. Diferentes contribuciones han propuesto la correlación de variables climáticas con la señal magnética. Heller *et al.* (1993) estimó promedios de paleo precipitación para secuencias de loess-paleosuelos de China; Maher *et al.* (1994), Liu *et al.* (1995) y Han *et al.* (1996), entre otros, obtuvieron diferentes “*climatofunctions*” correlacionando susceptibilidad magnética con parámetros climáticos para suelos de China.

La interpretación combinada de estudios en suelos actuales y en paleosuelos permite la convergencia hacia una interpretación paleoclimática apropiada de los resultados obtenidos de estos últimos. La señal magnética de interés en los suelos actuales será aquella de los horizontes sub-superficiales puesto que éstos son los que generalmente se preservan en paleosuelos y suelos enterrados. El horizonte superior (A) es normalmente total o parcialmente erosionado antes del enterramiento.

De esta necesidad surgieron los estudios de magnetismo ambiental en suelos actuales no antropizados, así como las diferentes hipótesis sobre la generación de la señal magnética natural en los suelos y su vinculación a las condiciones ambientales. Por otra parte, el uso del suelo por el hombre, su alcance e impacto, también motivaron la profundización de estos estudios.

### **Diferentes hipótesis sobre génesis de la señal magnética en suelos**

En cuanto a la génesis de la señal magnética durante los procesos pedogenéticos, hay cuando menos dos tipos de hipótesis: las que asumen un origen orgánico y las de tipo principalmente inorgánico.

Un modelo ampliamente aceptado propone la precipitación de magnetita ultrafina ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en suelos. Este proceso requiere la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  disuelto en pH casi neutro; ello se ha demostrado experimentalmente para producir un material magnético, el que resulta muy similar en la composición química, morfología y tamaño de grano al natural (Taylor *et al.*, 1987; Maher, 1988). En un primer paso, iones  $\text{Fe}^{2+}$  son liberados por la meteorización de silicatos de Fe durante los ciclos húmedos y secos

alternantes. Estos iones  $\text{Fe}^{2+}$  se oxidan rápidamente a  $\text{Fe}^{3+}$  en presencia de oxígeno. El  $\text{Fe}^{3+}$  liberado por hidrólisis de minerales paramagnéticos induce la precipitación de oxihidróxidos mal cristalizados tales como ferrihidrita ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). La ferrihidrita se reduce fácilmente durante períodos de anaerobia transitoria causada por mecanismos de fermentación de materia orgánica (Fischer 1988), que conducen a la precipitación de magnetita y otros minerales que contienen  $\text{Fe}^{2+}$  (Tamaura *et al.*, 1983; Tronc *et al.*, 1992). Este mecanismo fue posteriormente refinado por Maher (1998). Un mecanismo redox similar implica precipitación directa de magnetita por la acción de bacterias en condiciones anaeróbicas (Lovley *et al.*, 1987; Maher, 1998, Dearing *et al.*, 2001; Maher *et al.*, 2003; Banerjee, 2006, entre otros).

La hipótesis de tipo inorgánico está basada en los procesos de óxido-reducción del Fe con sucesivos estadios estacionales, sin embargo, es indiscutible la acción de bacterias anaeróbicas en los suelos y su capacidad para formar partículas ultrafinas (superparamagnéticos –SP). El problema radica en que capacidad tiene el medio ambiente de garantizar la subsecuente presencia de estas partículas. En consecuencia, el camino orgánico y el inorgánico sobre el origen de la señal magnética no serían antagonicos sino complementarios. Los procesos que ocurren en el suelo son múltiples y complejos. La pregunta es cuál es el balance entre pérdida de partículas magnéticas y génesis (biológicamente inducida o inorgánica) bajo la influencia de distintas condiciones ambientales.

Orgeira y Compagnucci (2006, 2010) y Orgeira *et al.* (2011) elaboran modelos cualitativos y cuantitativos respectivamente para explicar el origen de la señal magnética en suelos y paleosuelos. Dichos modelos permiten parametrizar groseramente las variables ambientales que modelaron la citada señal.

Orgeira y Compagnucci (2006) propusieron un índice potencial de almacenamiento de agua (*potencial water storage*, PWS) determinado en diferentes localidades de Rusia, China y Argentina. Este índice contempla tanto las variables climáticas del sitio individualmente (temperatura y precipitación) como la posición geográfica. La comparación de los resultados magnéticos sugiere la existencia de umbrales. El primer umbral se encuentra

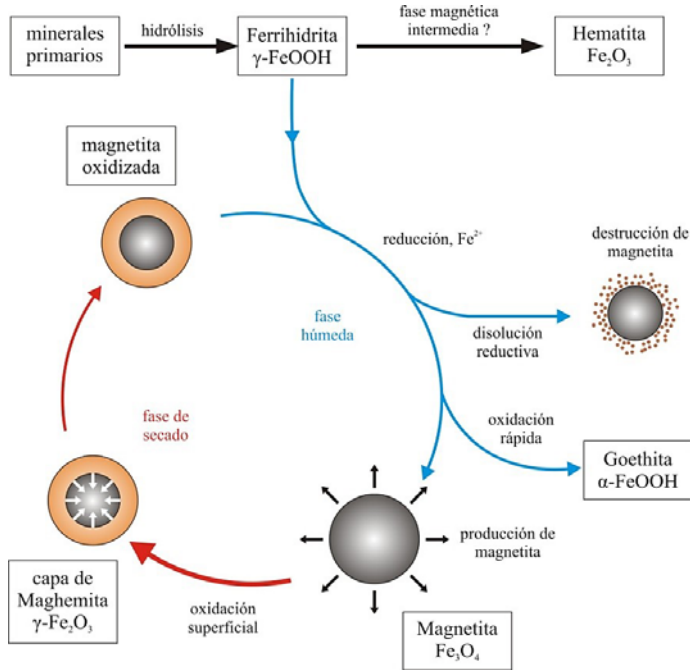
en valores PSW por arriba de los cuales el ambiente del suelo es estacionalmente reductor. Las condiciones reductoras, combinadas con la presencia de ligandos orgánicos, induce la parcial disolución de minerales ferrimagnéticos. Cuando PWS es negativo, los minerales ferrimagnéticos (detríticos o pedogénicos) pueden ser preservados en el suelo. De acuerdo con los autores mencionados, por arriba de este umbral existe un neto balance positivo entre generación y disolución de minerales ferrimagnéticos. Estas autoras coinciden con Han *et al.* (1996) en que el comportamiento de la señal magnética no tiene una correlación lineal con las variables climáticas, así como también sugieren la existencia de umbrales climáticos.

Orgeira *et al.* (2011) proponen un modelo cuantitativo principalmente inorgánico para las variaciones en la mineralogía magnética durante la pedogénesis (figura 1). Este modelo se funda en los procesos de óxido-reducción del Fe en sucesivos estadios estacionales. Su hipótesis supone el clima, precipitaciones y evapotranspiración, como vectores fundamentales para el desarrollo del perfil de suelo, sumados al microclima del suelo y la textura. Otros factores en la composición del material parental, tal como el contenido de vidrio volcánico, son elementos relevantes en la alteración de la mineralogía magnética durante la pedogénesis.

El proceso comenzaría con una pérdida de minerales para y ferromagnéticos por reducción (Mac Bride 1994, entre otros) durante los períodos de mayor retención de agua en el suelo. Durante estos lapsos la actividad biológica oxida la materia orgánica fresca y se reducen iones tales como Fe y Mn si existe una disponibilidad de oxígeno restringida. El Fe liberado forma diversos compuestos complejos, asociados a moléculas orgánicas y arcillas.

En el horizonte B la magnetita de origen detrítica es transformada, o bien disuelta por los fluidos circulantes en el perfil, pasando el  $\text{Fe}^{2+}$  II a solución. La disolución de magnetita en un ambiente no marcadamente reductor y a pH cercano a 7 tiene que llevarse a cabo bajo ciertas condiciones. La acción del agua de lluvia (ligeramente ácida, pH 6) que se infiltra hacia el interior del suelo moviliza hacia abajo ligandos orgánicos disueltos, que son el producto de la descomposición de la materia orgánica procedente de

Figura 1. Modelo de transformación de los minerales magnéticos durante el proceso de meteorización y pedogénesis



Elaboración propia, adaptado de Orgeira *et al.*, (2011).

la cobertura vegetal del suelo. Estos ligandos son retenidos sobre la superficie de las partículas magnetita formando complejos esféricos (“*inner sphere complex*”, Stumm, 1992). La formación de estas especies debilita la unión del Fe superficial con el resto de la partícula de óxido, facilitando su pasaje al medio acuoso. Si el ligando es bidentado, la unión se debilita aún más por el “*efecto trans*” (Stumm, 1992). A pesar que el agua que se infiltra en el suelo lleva  $O_2$  disuelto, éste se pierde rápidamente en los primeros cm de suelo, porque es usado en la degradación de la materia orgánica del mismo y la generación de los ligandos mencionados. Una propiedad muy importante de estos ligandos es la de estabilizar el estado de valencia  $2+$  del Fe frente al  $Fe^{3+}$ . El efecto neto es que el poder reductor del  $Fe^{2+}$  es mayor cuando está complejado con un ligando que cuando está libre o solvatado.

De esta manera, el ambiente se hace más reductor a medida que el agua atraviesa el suelo y avanza hacia la capa freática. Existirá un límite a partir del cual la especie de Fe más estable es la del  $\text{Fe}^{2+}$ , por lo que es más probable que la magnetita esté sujeta a procesos de reducción en los horizontes sub-superficiales (B) que en los superficiales (A), donde a la inversa, se oxidaría.

Si hay movimientos de descensos y ascensos de la capa freática (que son observados en el campo por numerosas evidencias tales como presencia de concreciones, moteados y/o bancos calcáreos), el límite que marca los campos de estabilidad de  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$  se moverá acoplado a estos movimientos del nivel de agua. Cuando la freática desciende (en épocas de intensa evapotranspiración, tal como ocurre en verano), el sistema se hace más oxidante en la superficie, disminuye la presencia de ligandos en el horizonte B; el límite óxico-anóxico se hace más profundo. El proceso inverso ocurre en invierno cuando sube el nivel freático hacia la superficie.

Luego puede producirse, en el período de menor precipitación, neoformación (por oxidación y pérdida de agua) de minerales de alta coercitividad y/o magnetita superparamagnética (SP) de diversos tamaños (menores a  $30 \cdot 10^{-9} \mu\text{m}$ ). El mineral que se forme dependerá de los pH y potencial redox (Eh) imperantes en el medio, así como de la velocidad en que cambie el Eh.

La formación de magnetita pedogenética está condicionada por el drenaje del suelo, pH intermedio, la presencia de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. La meteorización de los minerales primarios de Fe y la formación de los minerales de Fe secundarios es sensible a la relación pH-Eh. La condición redox es inducida por las oscilaciones freáticas y, conduciría a la disolución de magnetita y la pérdida de los óxidos de Fe secundarios. La pérdida de magnetita sería también promovida por ligandos orgánicos presentes en los horizontes superiores del suelo y el agua poral (atrapada en los poros del suelo) enriquecida en sílice.

La idea de la existencia de un umbral pedogenético impulsado por el balance hídrico del suelo fue utilizado por Orgeira y Compagnucci (2006) para explicar el incremento y la disminución de la señal magnética en los suelos loésicos del mundo.

Orgeira *et al.* (2011) proponen una relación entre clima y señal magnética generando un índice  $W$  o relación de humedad, ( $W = MAR / Petc$ ), donde  $W$  es la Relación de humedad;  $Petc$  el Potencial de evapotranspiración mensual corregido por latitud y duración del mes;  $MAR$  la Precipitación media anual (siglas en inglés). Asimismo se define un  $W_0$  como Poros saturados, cuya agua se evapotranspira.

El parámetro  $W$  se relaciona el promedio de precipitación anual, en función de  $R$ , que es el volumen de lluvia caída por unidad de superficie y tiempo. El índice  $W_0 \approx 1$ , marca la transición de condiciones relativamente secas a condiciones con saturación de agua. Cuando,  $W > W_0$  comienza un régimen de saturación del suelo, disminución en la frecuencia de los ciclos secos / húmedos y se suprime la producción de magnetita. La condición  $0,5 < W_0 < 1$ , indica suelos mal drenados. El índice  $W$  se basa en los siguientes supuestos:

- 1 El enriquecimiento magnético es causado por magnetita ultrafina y partículas de maghemita ( $Fe_{2,67}O_4$ , producto de la rápida oxidación de la magnetita ( $Fe_3O_4$ ).
- 2 La formación de magnetita requiere alternancia de ciclos secos y húmedos y la tasa de producción de magnetita es proporcional a la frecuencia de los ciclos.
- 3 Durante la fase seca la superficie de la magnetita se oxida y se forma una pátina o escudo de maghemita; su crecimiento es controlado por la difusión hacia el exterior de iones de  $Fe_{2+}$ .
- 4 Si una partícula parcialmente oxidada de magnetita es expuesta a condiciones reductoras durante el ciclo húmedo, el recubrimiento de maghemita se disuelve. La tasa de destrucción es proporcional a la masa de la pátina de maghemita que depende del tiempo promedio entre los eventos lluviosos y la frecuencia de los ciclos húmedos y secos.
- 5 La concentración de magnetita pedogenética “en equilibrio” se obtiene de resolver el balance de masa de la ecuación que involucra procesos de producción y destrucción.

Torrent *et al.* (2006) postulan la formación de una fase intermedia ferrimagnética cuando la ferrihidrita se convierte a hematita ( $\alpha$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en cuyo caso el ambiente reductor necesario para la precipitación de magnetita no es un camino relevante. Estos procesos serían adecuados para ambientes restringidos en agua.

Una explicación alternativa de variaciones de susceptibilidad magnética medida en suelos fue postulada por Kukla *et al.* (1988) quienes asociaron las variaciones magnéticas a una entrada por vía atmosférica constante de óxidos de hierro que pueden diluirse diferencialmente por ingreso de polvo cuyo comportamiento es débilmente magnético. Esto puede vincularse a diferentes áreas de aportes y velocidades del viento (Evans y Heller, 2003).

Luego, en forma resumida, la aplicación de técnicas como las incluidas en los estudios de magnetismo ambiental, se justifica en el hecho de que frecuentemente los minerales pedogenéticos ferromagnéticos se encuentran en muy baja proporción y en tamaños de grano muy pequeños. El Fe es un elemento cuyo estado de oxidación es un excelente indicador del microclima de un suelo; consecuentemente, la detección de una fracción ferromagnética pedogenética, así como las fluctuaciones en la fracción ferromagnética detrítica a lo largo de un perfil sedimentario, son excelentes indicadores de las variaciones paleoambientales acaecidas en el lapso de deposición y diagénesis temprana del material en cuestión.

### **Algunos ejemplos de magnetismo ambiental en suelos vírgenes y cultivados**

La medición de los parámetros de magnetismo de rocas provee información sobre la concentración, tamaño de grano y mineralogía de la asociación del mineral magnético sedimentario. Esta información puede reflejar cambios en la fuente de origen y composición del mineral detrítico y del balance entre componentes sedimentarios alóctonos y autóctonos, así como cambios diagenéticos y pedogenéticos.

La premisa fundamental del magnetismo ambiental es que la variación de la mayoría de las propiedades en los minerales magnéticos de materiales naturales (por ejemplo composición, concentración y tamaño de grano del



portador magnético) es reflejo de un cambio en el medio ambiente. El magnetismo ambiental ha sido decisivo en la determinación de la fracción mineralógica diagenética ferromagnética estrechamente vinculada a las fluctuaciones climáticas. Una revisión de algunos de los trabajos más citados ha sido compilada por Orgeira *et al.* (2011), entre otras numerosas contribuciones.

Han *et al.* (1996) presentaron los resultados de las mediciones de susceptibilidad magnética de más de 160 suelos actuales a lo largo China. El estudio se limitó de los 5 a 10 cm superiores del horizonte superficial de cada sitio estudiado. Sobre la base de los resultados obtenidos se establecieron relaciones entre este parámetro magnético y parámetros climáticos actuales. La correlación entre la susceptibilidad magnética y la temperatura media anual o la precipitación media anual muestra complejidad. Según los autores, una función simple no puede ajustar todos los datos observados. Sin embargo, ciertos rasgos pueden destacarse. En el sector E de China, en la región semiárida del Plateau de loess y áreas aledañas, donde el régimen climático monzónico es relevante, la susceptibilidad magnética crece al aumentar la temperatura y la precipitación. En la región tropical y subtropical, por el contrario, la susceptibilidad tiende a decrecer con el aumento de la temperatura y la precipitación. Entre estos dos patrones de correlación opuestos parece, según los autores, existir un umbral. Finalmente, en el Oeste de China, las relaciones se tornan más complejas en las altas áreas orográficas y en las vastas cuencas sedimentarias del NO, ello es atribuido a los altos gradientes topográficos y las condiciones climáticas de tipo continental.

Maher *et al.* (2003) fue uno de los primeros trabajos completos de magnetismo ambiental en suelos actuales vírgenes desarrollados sobre sedimentos loésicos. Según los autores, a lo largo de la transecta relevada, el relieve es plano y el material parental homogéneo. Estos autores sugirieron la formación de partículas ferrimagnéticas en suelos actuales de las estepas de Rusia. El estudio incluye una detallada transecta cuyo extremo NE es la localidad de Volgogrado y el SO es Stávropol. Sobre la base del análisis de la mineralogía magnética establecieron un enlace con la precipitación de

una transecta climática a través de la estepa rusa. En la región, el loess de manto tiene una acumulación de polvo mínima en la actualidad (Maher *et al.*, 2003), esto quiere decir que no se espera acumulación simultánea con la pedogénesis. Diferentes estudios (Microscopía electrónica, espectros Mössbauer, entre otros) y análisis de parámetros magnéticos les permitieron inferir la formación *in situ* de ferrimagnetos en la fracción granulométrica ultrafina ( $< \sim 50$  nm) en esos suelos de pastizales. El aumento de esta fracción magnética fue relacionado a una mayor precipitación anual. Acorde a su interpretación, los resultados indican que el aumento de minerales magnéticos está directamente relacionado a incrementos en la precipitación. Según estos autores, esta respuesta magnética se correlacionaría con la obtenida en suelos del Plateau loésico de China.

Estudios de magnetismo ambiental en suelos de EE.UU. han sido presentados por Geiss *et al.* (2004), Geiss y Zanner (2006, 2007), entre otros. Dichas contribuciones se focalizan en el análisis de muestras provenientes del centro-este de la provincia fisiográfica Great Plainy Central Lowlys, donde se analiza principalmente la pedogénesis sobre la Fm. Peoria.

En los estudios de Geiss *et al.* (2004) y de Grimley *et al.* (2003) se indica un incremento en la señal magnética en los horizontes superiores. Geiss y Zanner (2007) sugieren que este aumento es consecuencia de la presencia de un 10% de ferrimagnéticos. Afirman que la magnetita pedogenética depende en cierto modo de la precipitación. Geiss y Zanner (2007) en base al estudio de 75 perfiles de suelo, ajustan su hipótesis sugiriendo que el enriquecimiento se debe a la presencia de materiales extra finos. En este caso no hay una respuesta clara que explique este enriquecimiento, a pesar de las similitudes con China.

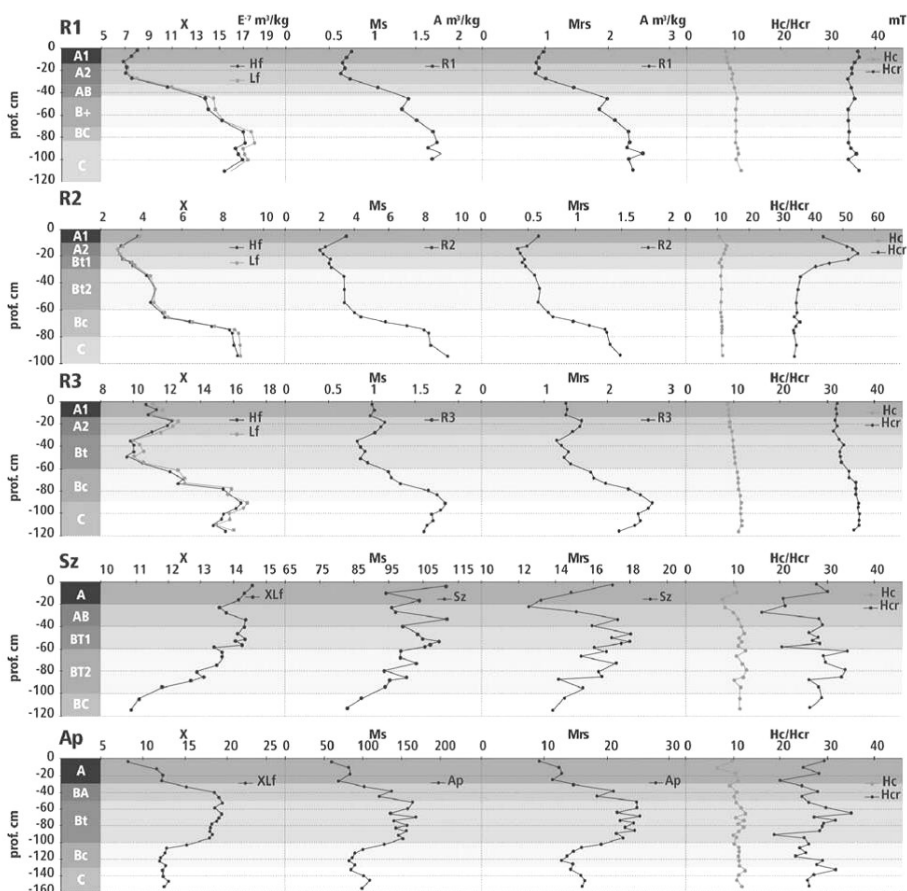
En suelos de Sudamérica, Orgeira *et al.* (2008) reportan los resultados del estudio de argiudoles no antropizados en dos localidades (Zárate y Verónica) de la llanura pampeana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Esta región es una de las áreas típica a nivel mundial de cobertura loésica. La precipitación media anual en esta región de Argentina oscila en torno a los 1000 mm.

En la figura 2 se han representado la susceptibilidad magnética, susceptibilidad paramagnética y los parámetros extensivos tales como la magnetización de saturación ( $M_s$ ), magnetización de saturación remanente ( $M_{rs}$ ) y campos coercitivos, coercitividad ( $H_c$ ) y coercitividad de remanencia ( $H_{cr}$ ) (Orgeira *et al.*, 2008). Los estudios de propiedades magnéticas permitieron determinar la presencia de magnetita y titanomagnetita, maghemita, goethita y partículas superparamagnéticas (SP).

Los suelos de la localidad de Verónica presentan contenidos de minerales ferrimagnéticos que disminuyen en los horizontes superiores (R: figura 2). El proceso dominante en estos suelos ha sido la pérdida por reducción de la magnetita y titanomagnetita detrítica. Ello se encuentra asociado a una mayor evolución del suelo determinada por las concentraciones y tipo de arcillas detectadas. La mayor concentración de arcillas en estos suelos habría facilitado condiciones más reductoras y una mayor pérdida de partículas magnéticas detríticas asociada a ello. Según la interpretación de los autores, la pérdida se vio reforzada por las condiciones de drenaje más deficitarias detectadas por parámetros no geofísicos. Los contenidos de minerales ferrimagnéticos disminuyeron en horizontes superiores de los tres suelos estudiados en esta localidad (R1, R2 y R3: figura 2), lo que indica una pérdida de esta mineralogía como consecuencia de la pedogénesis. Conforme con la hipótesis sostenida respecto al origen de la señal magnética, el proceso dominante en estos suelos ha sido la pérdida por reducción de la magnetita y/o titanomagnetita detrítica, seguida de una oxidación parcial en un ambiente básico en el tope de las secciones estudiadas (especialmente en R2) en donde se detectó un aumento de las coercitividades. Las mayores concentraciones de arcillas en estos suelos con respecto a los de la otra localidad estudiada, habrían facilitado condiciones más reductoras en los primeros respecto a los segundos, sencillamente por una menor aireación.

En el suelo pobremente drenado de localidad de Zárate (Ap: figura 2) se observó una concentración de partículas magnéticas en el horizonte Bt, la cual se asoció a un proceso de iluviación. Para el suelo bien drenado y complejo de esta misma localidad se interpretó la neoformación de partículas SP, las cuales tendrían una vida efímera hasta un nuevo período húmedo en

Figura 2. Parámetros magnéticos obtenidos de suelos de la Provincia de Buenos Aires, Argentina



Orgeira *et al.*, 2008.

el ciclo anual. Si bien algunas características de la señal magnética aparecen reforzadas por las condiciones de drenaje, este aspecto fue considerado significativo en estas localidades, en donde los gradientes topográficos son despreciables.

Los valores obtenidos para los parámetros magnéticos extensivos ( $\kappa$ , Ms y Mrs) en el suelo pobremente drenado (Ap: figura 2) indican una

concentración de partículas magnéticas detríticas en los horizontes BA y Bt; ello puede atribuirse a un proceso físico de iluviación. Para el suelo bien drenado (Sz: figura 2), el incremento de  $\kappa$  y  $M_s$  estaría asociado a la generación de partículas SP, según la interpretación de los estudios a bajas temperaturas. Por otra parte, el proceso evolutivo de Sz, según los resultados de las concentraciones de arcilla, sería menor por interrupción de la pedogénesis por erosión y posterior reinstalación de la misma.

Las tendencias de la señal magnética general son similares en los perfiles estudiados para cada una de las localidades ubicadas en diferentes posiciones del paisaje. Por lo tanto, si bien algunas características aparecen reforzadas por las condiciones de drenaje, este aspecto no parece ser demasiado significativo, al menos en la región Chaco-pampeana, en la que los gradientes topográficos son muy bajos.

Sin embargo, teniendo en cuenta los datos de localidad de Verónica, la pérdida de magnetita detrítica es mayor en el suelo menos drenado (Ap), consistente con la destrucción de magnetita detrítica por procesos reductores en aquellos sectores del paisaje con almacenamiento de agua.

El principal resultado obtenido indica que la señal magnética de los parámetros extensivos es opuesta en ambas áreas. Esto no sería esperable si se tiene en cuenta que ambas se encuentran bajo condiciones climáticas semejantes, se localizan en geoformas muy parecidas, y se han formado a partir de materiales originarios similares. Sin embargo, si bien ambas áreas presentan grados de desarrollo pedogenético parecidos, las concentraciones de arcillas como la esmectita y las concentraciones de arcillas totales podrían indicar un menor tiempo involucrado en el desarrollo del suelo de la localidad de Zárate, en particular en Sz (Orgeira *et al.*, 2008). Los datos climáticos, por su parte, sugieren que la humedad en los suelos estudiados podría explicar parte de las diferencias antes señaladas, ya que la localidad de Zárate tiene a lo largo de los últimos 30 años un mayor balance hídrico positivo en sus suelos. Por otra parte, existen diferencias estacionales en la precipitación en ambas localidades, así como en la influencia de los vientos húmedos provenientes del mar y en la intensidad de los mismos (Orgeira *et al.*, 2008). Tales diferencias de humedad ambiental y balance hídrico en los

suelos podría provocar que diferentes posicionamiento de la napa freática a lo largo del año, lo que finalmente afecta la meteorización de los minerales magnéticos o su neoformación.

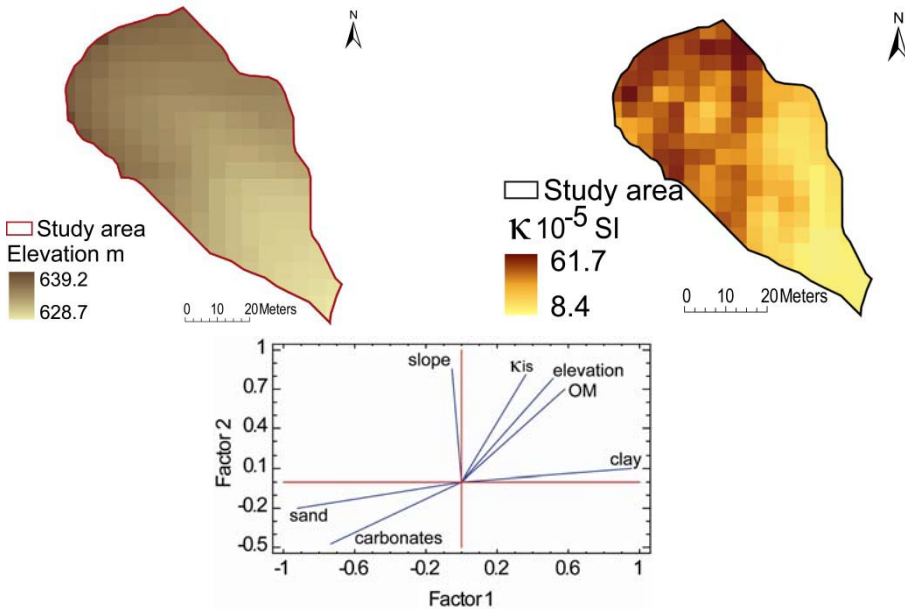
En cuanto a alteraciones por actividad agrícola, las propiedades magnéticas de los suelos utilizadas en combinación con parámetros fisiográficos y edáficos son indicadores significativos de las condiciones de un suelo y pueden proveer de información de gran utilidad para describir algunos de los procesos que ocurren en los mismos.

Se presentan a continuación algunos ejemplos en el mundo. En suelos de la región NE de España (Zaragoza), clasificados como *calsisols*, Quijano *et al.* (2011a, 2011b, 2014) estudiaron la influencia humana en el uso de la tierra. El área de estudio es un pequeño campo de cultivo (con bordes delimitados de forma natural) que ha sido trabajado para el cultivo por más de 150 años, en consecuencia la parte superior del suelo, o capa de sembrado (25-30 cm), ha sido completamente mezclada. El campo de estudio puede dividirse en tres partes fisiográficas principales: alta, media y baja; siendo la parte alta relativamente plana y no afectada por movimiento del agua (a través de un canal) como ocurre en la parte media y baja. Este pequeño campo de cultivo que forma una unidad hidrológica puede ser considerado como representativo de agro-sistemas de ambientes montañosos Mediterráneos.

Los resultados preliminares fueron reportados en Quijano *et al.* (2011a, 2011b). En este estudio, la susceptibilidad magnética (fue medida *in situ* y en laboratorio en muestras colectadas en el campo. Si bien se midió este parámetro con el objeto de detectar la presencia y concentración de minerales magnéticos en el suelo, también se encontraron correlaciones significativas entre las mediciones de campo y las de laboratorio ( $r = 0.88$ ;  $p < 0.05$ ). Esto último permite realizar mapeos rápidos y fiables en el campo con mediciones de susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ). La susceptibilidad magnética también se relacionó con diferentes atributos topográficos con el objeto de inferir relaciones entre la susceptibilidad magnética medida *in situ* y algunas características físicas de la superficie del terreno como la elevación (por ejemplo:  $r = 0.75$ ;  $p < 0.05$ ), la pendiente, la concavidad-convexidad,

la perpendicular a la curvatura y el aspecto. Se encontró que los valores de  $\kappa$  son afectados por la elevación y la posición de la pendiente (figura 3). Tanto los atributos topográficos como la susceptibilidad magnética se pueden relacionar con el movimiento del agua superficial y la redistribución de componentes del suelo. Estas relaciones pueden utilizarse para describir el modelo espacial de la concentración y redistribución de los minerales magnéticos en los suelos cultivados.

Figura 3. Estudios de magnetismo en un suelo de la región NE de España (Zaragoza), en un pequeño campo de cultivo trabajado por más de 150 años



Elaboración propia: A la izquierda el modelo de elevación digital ( $n= 154$ , grilla regular de  $5 \times 5$  m); al centro la distribución espacial de la susceptibilidad magnética y correlación entre  $\kappa$  y elevación del terreno (Quijano *et al.*, 2011b); y a la derecha el análisis de componentes principales para variables texturales, topográficas, magnéticas y geoquímicas (Quijano *et al.*, 2014).

A partir de este trabajo, Quijano *et al.* (2014) profundizaron el estudio realizando un análisis de las mediciones de campo, mediciones magnéticas, geoquímicas y texturales detalladas. Los resultados integrados de distintos estudios magnéticos (susceptibilidad magnética, magnetización remanente

anhistérica –MRA–, magnetización remanente isotérmica –MRI– y análisis termomagnéticos) muestran a la magnetita como mineral predominante y como subordinado a la hematita. El análisis de las características topográficas que define la redistribución del suelo a través del patrón de drenaje, los resultados de la variación espacial de los parámetros magnéticos y las propiedades del suelo (textura, materia orgánica, contenido de carbonatos), son consistentes con las relaciones encontradas entre minerales magnéticos, elevación, partículas suelo más finas y contenido de materia orgánica y carbonatos (figura 3). Este resultado sugiere que la erosión por flujo de agua es determinante en la redistribución de minerales en el campo. Esta parece ser la principal causa en la variabilidad de la distribución de minerales magnéticos que propicia la remoción de las componentes más finas del suelo.

Las prácticas de cultivo por más de un siglo y medio han influido en la distribución de los minerales magnéticos con la profundidad, además, han mezclado las capas superiores del suelo mejorando la aereación y la infiltración del agua, favoreciendo la formación de minerales magnéticos ultrafinos, magnetita SP, en las capas superiores. La mayor presencia de granos SP se observó en un 76% de los valores de  $\kappa_{fd}\%$  [ $(\kappa_{470\text{Hz}} - \kappa_{4700\text{Hz}})/\kappa_{470\text{Hz}} * 100$ ] (10.0-13.1%) para las muestras de las capas superiores del suelo (5 cm). Si bien los minerales SP son favorecidos por las condiciones del suelo en la capa de sembrado, se observó también que hay áreas preferenciales de preservación de granos SP. En particular, se encontraron más bajas concentraciones de granos SP en las posiciones bajas del campo ( $\kappa_{fd} = 15.1 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) que en las posiciones altas ( $\kappa_{fd} = 49.5 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), probablemente asociados a los procesos de erosión.

Rouzaut *et al.* (2012) presentan los primeros resultados de suelos estudiados en una importante área agrícola de Argentina, la Provincia de Córdoba. Allí se relacionan parámetros magnéticos en perfiles de suelos con vegetación autóctona y suelos cultivados de la Serie Corralito en la provincia de Córdoba, Argentina. Ambos perfiles se encuentran en la misma región geomorfológica, bajo el mismo régimen climático, y en similar actitud topográfica y de drenaje. Las muestras fueron tomadas de los suelos

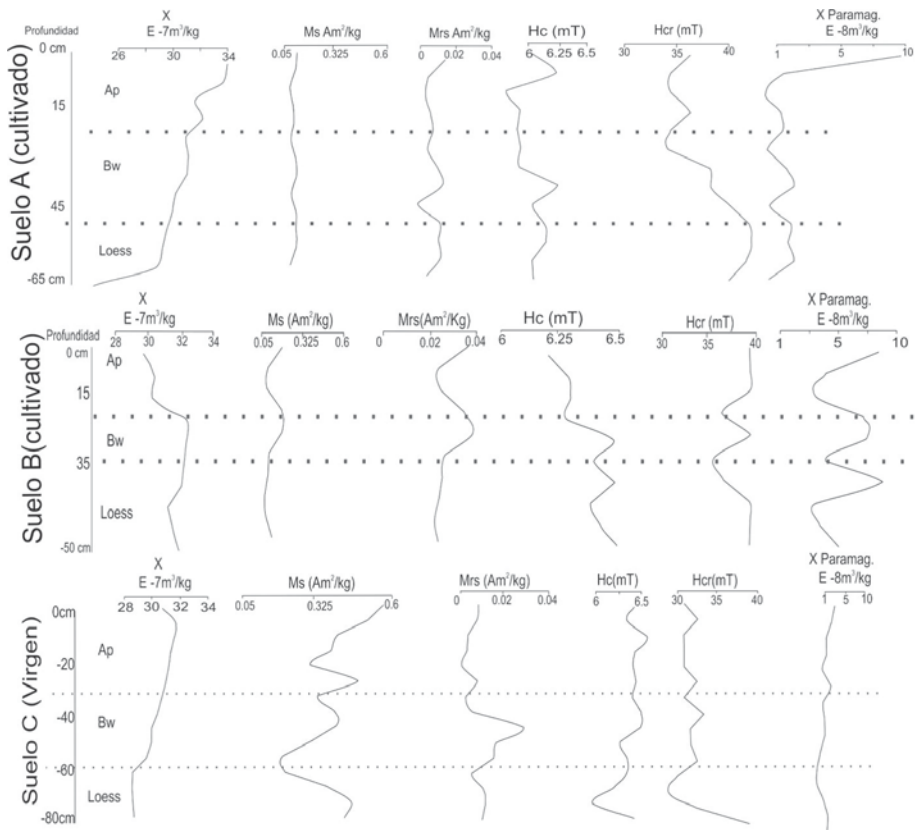


representativos del área, con similar drenaje, uno con vegetación autóctona y dos cultivados. El área en estudio pertenece al dominio semiseco con tendencia al semihúmedo y térmicamente se define como mesotermal. La precipitación se concentra en las estaciones cálidas de primavera-verano, con promedios anuales de 700 mm. El material parental es loess parcialmente retrabajado. En los suelos cultivados la rotación de cultivo ha sido la misma en los últimos 30 años, soja-maíz-soja durante la época estival y trigo o cebada en invierno. El suelo inalterado presenta vegetación autóctona, pertenecientes a las provincias fitogeográficas del “espinal” o “chaco empobrecido”.

En los suelos estudiados se observa un epipedón mólico y un horizonte subsuperficial cámbico; la serie se corresponde a un Haplustol típico. El horizonte superior es de color oscuro (a veces muy degradado tanto física como químicamente) de color pardo grisáceo oscuro, textura franco limosa y pH ligeramente ácido, que se extiende hasta 20 cm. Continúa hacia abajo un horizonte subsuperficial con estructura en bloques débiles de textura franco limosa (Bw), con escasos barnices en las caras de los agregados que se extiende hasta los 37 cm. Luego de un horizonte transicional (BC), aparece el horizonte C o material originario con carbonatos libres en la masa del suelo. En la figura 4 se presentan los resultados magnéticos de Rouzaut *et al.* (2012). Se ha representado la susceptibilidad magnética, susceptibilidad paramagnética y los parámetros extensivos tales como la magnetización de saturación ( $M_s$ ), magnetización de saturación remanente ( $M_{rs}$ ) y campos coercitivos, coercitividad ( $H_c$ ) y coercitividad de remanencia ( $H_{cr}$ ). El suelo A y el suelo B corresponden a suelos cultivados. La toma de muestras en el suelo A se realizó en el mes de marzo luego de la cosecha de soja y el suelo B en noviembre, también luego de la cosecha de soja. El suelo C es un suelo prístino, sobre el que se encuentra vegetación autóctona. El análisis de la susceptibilidad magnética en el suelo virgen C presenta un ligero enriquecimiento en minerales magnéticos con respecto al material parental, acompañado de un incremento en las propiedades extensivas. El campo coercitivo ( $H_c$  y  $H_{cr}$ ) tienen ligeras variaciones a lo largo del perfil y los valores son compatibles a los de

magnetita y/o titanomagnetita pobre en titanio. La susceptibilidad paramagnética manifiesta un ligero incremento hacia el techo del perfil, el cual se atribuye a un consistente aumento de arcillas paramagnéticas. De acuerdo a las relaciones de  $H_{cr}/H_c$  y  $M_{rs}/M_s$  (Dunlop 2002), el tamaño de los minerales magnéticos se encuentra en pseudodominio simple (PDS).

Figura 4. Parámetros magnéticos de suelos vírgenes y antropizados por actividad agrícola de la Provincia de Córdoba (Argentina)



Rouzaut *et al.*, 2012.

El análisis de la susceptibilidad magnética en el suelo B muestra una ligera disminución en el horizonte Ap, asociada a un decrecimiento en las propiedades extensivas tales como Ms y Mrs, sin embargo vuelven a aumentar en el tope de Ap. Estas disminuciones pueden atribuirse a pérdida en minerales magnéticos con respecto al material parental. El comportamiento de la susceptibilidad paramagnética presenta un marcado incremento hacia el techo del perfil, el cual se interpreta como un aumento de arcillas paramagnéticas. El campo coercitivo permite inferir la presencia de magnetita y/o titanomagnetita. Las variaciones de la susceptibilidad con respecto a las altas temperaturas señalan temperaturas de Curie y bajas temperaturas, sugiriendo nuevamente la presencia de magnetita o titanomagnetitas pobres en titanio (Rouzaut *et al.*, 2012).

El análisis de la susceptibilidad magnética en el suelo A (figura 4) muestra un enriquecimiento en minerales magnéticos con respecto al material parental en el horizonte Ap; éste es acompañado de un incremento en las propiedades extensivas tales como Ms y Mrs, así como de la susceptibilidad paramagnética atribuible a la concentración de arcillas. Los campos coercitivos (Hc y Hcr) no muestran grandes variaciones e indicarían minerales magnéticos tales como magnetita y titanomagnetita. El tamaño de los minerales magnéticos se encuentra en dominio simple (DS) con presencia de superparamagnéticos (SP) (Dunlop, 2002).

En cuanto al suelo virgen C presenta una distribución de tamaño de partícula magnética muy amplia en todos los horizontes, de tamaño PDS. Esta distribución de tamaño de partícula magnética es la esperable para suelos desarrollados sobre loess retrabajado como el suelo aquí estudiado. La actividad antropogénica en los suelos cultivados A y B ha modificado sustancialmente esta distribución natural y los tamaños de partícula magnética tienen una distribución muy restringida principalmente en el campo de las DS-SP. Ello es compatible con suelos antropizados, susceptibles a la erosión hídrica, en donde el material grueso se lava concentrando los finos en los horizontes superiores (Rouzaut *et al.*, 2012).

Por otra parte, en el suelo C, no cultivado, el ligero incremento (10%) de la señal magnética, estimado a partir de la susceptibilidad magnética, se puede asociar a un enriquecimiento de minerales magnéticos asociados a

los procesos pedogenéticos. Tal incremento podría atribuirse a la generación de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y/o preservación de magnetita y titanomagnetita ( $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$ ), las dos últimas detríticas.

Las señales magnéticas de estos suelos antropizados, expresadas sintéticamente por la susceptibilidad magnética, son opuestas: mientras en el suelo A crece en el suelo B decrece ligeramente. Ello podría deberse a varios motivos concurrentes vinculados al uso humano. Este diferente comportamiento magnético podría ser consecuencia del crecimiento de los distintos cultivos. La susceptibilidad tendería a decrecer en los diferentes estados vegetativos de los cultivos hasta el momento de la cosecha. Luego, durante el crecimiento se producen transformaciones mineralógicas que están vinculadas a la toma de Fe por parte de los cultivos, así como también la migración vertical del Fe dentro del perfil (Sapkota *et al.*, 2011). Por otra parte, ambos campos llevan distinto tiempo bajo siembra directa que acarrea una disminución de la porosidad efectiva, hecho que podría generar una mayor preservación de los minerales magnéticos en el campo con más tiempo bajo cultivo. Otra hipótesis podría sustentarse en que el suelo B ha recibido recientemente mayor abono, hecho evidenciado por un ligero aumento en el porcentaje de materia orgánica en el horizonte Ap; este mayor abono habría facilitado la formación de más ligandos orgánicos bidentados que, como ya fue mencionado arriba, favorecen la pérdida de magnetita durante la pedogénesis (Orgeira *et al.*, 2011).

Por último, estimaciones cualitativas de la erosión de suelo y su redistribución, las principales deficiencias y el rol de los diferentes factores ambientales aplicando parámetros magnéticos fueron presentados en diversas contribuciones, de Jong *et al.* (1998), Royall (2001, 2004, 2007) y Landgraf y Royall (2006), entre otros. Royall (2001) demostró que la susceptibilidad magnética y su dependencia de la frecuencia de corriente aplicada para su medición en el laboratorio, pueden ser utilizadas para estimar la pérdida de suelo por una práctica de labranza. Algunos factores relevantes tales como el tamaño de partícula del material parental, fueron considerados en posteriores contribuciones (Royall, 2004, 2007). Jordanova *et al.* (2011) presentan un detallado estudio de campo y laboratorio efectuado en un área de dimensiones discretas del orden 0,84 hectáreas de tierras agrícolas

cerca la ciudad de Sofía (Bulgaria). El objetivo del trabajo fue verificar la aplicabilidad de los métodos magnéticos en la estimación de la erosión del suelo en el caso particular de material parental fuertemente magnético. Las conclusiones a las que arriban los citados autores indican que los parámetros magnéticos son una opción económica y rápida con respecto a estudios no magnéticos, para estimar características de interés en los suelos, como por ejemplo la estimación del grado de erosión del suelo, siempre y cuando la señal magnética está dominada por una mineralogía magnética del material parental fuertemente magnético. La pérdida de suelo se estima importante y estaría relacionada principalmente a práctica de labranza.

### **Contaminación en suelos, tipos de contaminantes y señal que producen**

La señal magnética del suelo es una respuesta global de los distintos constituyentes que lo conforman. Si bien todas las sustancias poseen propiedades magnéticas, se identifican materiales magnéticos con distintas características, entre ellos, diamagnéticos, paramagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos (goethita, hematita, magnetita, maghemita, pirrotita, greigita). Estos materiales evidencian diferencias importantes en su respuesta magnética, por ejemplo, los valores de susceptibilidad magnética específica varían ampliamente de acuerdo al tipo de materiales magnéticos: diamagnéticos ( $\kappa \sim -6 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), paramagnéticos ( $\kappa \sim 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), antiferromagnéticos ( $\kappa \sim 0.1-5.9 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), y ferrimagnéticos ( $\kappa \sim 0.3-5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) (Maher y Thompson, 1999; Peters y Dekkers, 2003). A partir de los valores definidos, es evidente que una pequeña proporción de minerales ferrimagnéticos será suficiente para dominar la señal magnética del suelo. En general, esta fracción minoritaria de minerales ferrimagnéticos suele no superar el 1% del peso.

La señal magnética de los suelos puede modificarse por causas naturales o por distintas actividades humanas, entre las cuales, las actividades urbanas (por ejemplo: tráfico vehicular, emisiones domésticas) e industriales son una de las problemáticas de la actualidad. Éstas pueden afectar negativamente los suelos, así como vegetales y seres vivos, a través de las emisiones de

particulado fino, ya que contienen contaminantes que son puestos en circulación y pueden ser transferidos e incorporados en los mismos (Chaparro *et al.*, 2006).

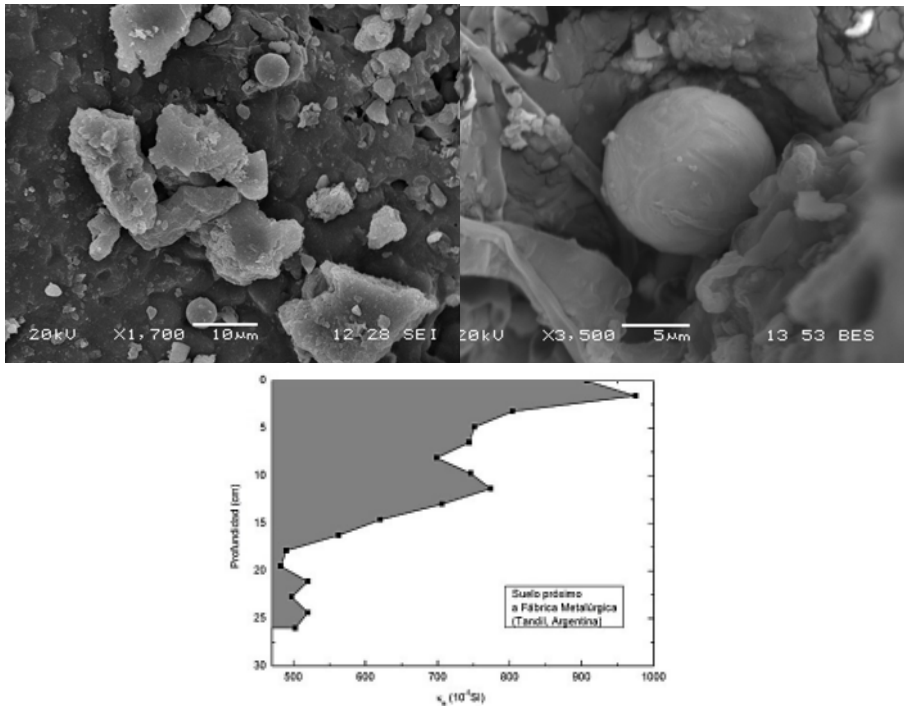
Las partículas finas (tamaño menor/igual a limo muy fino/arcilla), derivadas de emisiones industriales y vehiculares son producidas por procesos de combustión a altas temperaturas y emitidas directamente en la atmósfera. Estas partículas contaminantes pueden incluir minerales magnéticos con un tamaño de grano que varía desde el submicrón hasta decenas de micrón (Petrovský y Ellwood, 1999; Chaparro *et al.*, 2010), metales pesados (Vassilev *et al.*, 2004), hidrocarburos aromáticos policíclicos (Rachwał *et al.*, 2015), generalmente perjudiciales a la salud. La producción de estos contaminantes dependen de varios factores, tales como, características del material combustible, condiciones de combustión entre otros (Kukier *et al.*, 2003). Las concentraciones de materiales magnéticos y de metales pesados pueden estar ligadas, aunque distintos factores pueden diluir los enlaces entre ellos; de acuerdo a Kukier *et al.* (2003), la fracción magnética de las cenizas producto final de la combustión puede ser menos resistente a los procesos de lixiviación que la fracción no magnética. La relación de materiales magnéticos con elementos tóxicos se basa en que los mismos pueden actuar como hospedadores de metales pesados y otros contaminantes, incorporándolos en su estructura cristalina, o bien, adsorbiéndolos en su superficie.

Como se ha mencionado, las cenizas generadas por actividades contaminantes pueden ser emitidas por fábricas metalúrgicas (Strzyszczyk *et al.*, 1996; Durza, 1999; Chaparro *et al.*, 2002a), plantas cementeras (Goluchowska, 2001), centrales de energía de quemado de carbón (Hullet *et al.*, 1980; Vassilev, 1992; Kapicka *et al.*, 2001a; Kukier *et al.*, 2003) y fábricas productoras de coque (Bidegain *et al.*, 2011; Gargiulo *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Rachwał *et al.*, 2015) entre otras. Las esférulas ricas en Fe (figura 5, derecha y centro) constituyen unas de las partículas características emitidas por las industrias. Estas partículas además de ser dispersadas en el aire y afectar su calidad, son capaces de producir “aumento magnético” como consecuencia de su deposición y acumulación en los horizontes

superficiales de los suelos como lo reportó Chaparro (1999) en un suelo urbano próximo a una fábrica metalúrgica (figura 5, izquierda). El tamaño de estas partículas pueden variar ampliamente de acuerdo a distintos autores, por ejemplo:  $<100\ \mu\text{m}$  (Vassilev *et al.*, 2004), entre unos pocos micrómetros hasta  $50\ \mu\text{m}$  (Hornig *et al.*, 2009), entre  $1$  y  $20\ \mu\text{m}$  (Chaparro *et al.*, 2013), entre  $\sim 2$  y  $10\ \mu\text{m}$  (Bidegain *et al.*, 2011), desde  $\sim 20$  hasta  $500\ \mu\text{m}$  (Rachwal *et al.*, 2015).

Este material particulado (MP) puede ser perjudicial para la salud humana dado que puede ser respirado y alojado en seres vivos. Las partículas con diámetros aerodinámicos menores a  $10\ \mu\text{m}$  impactan gravemente en la

Figura 5. Contaminantes magnéticos de origen industrial



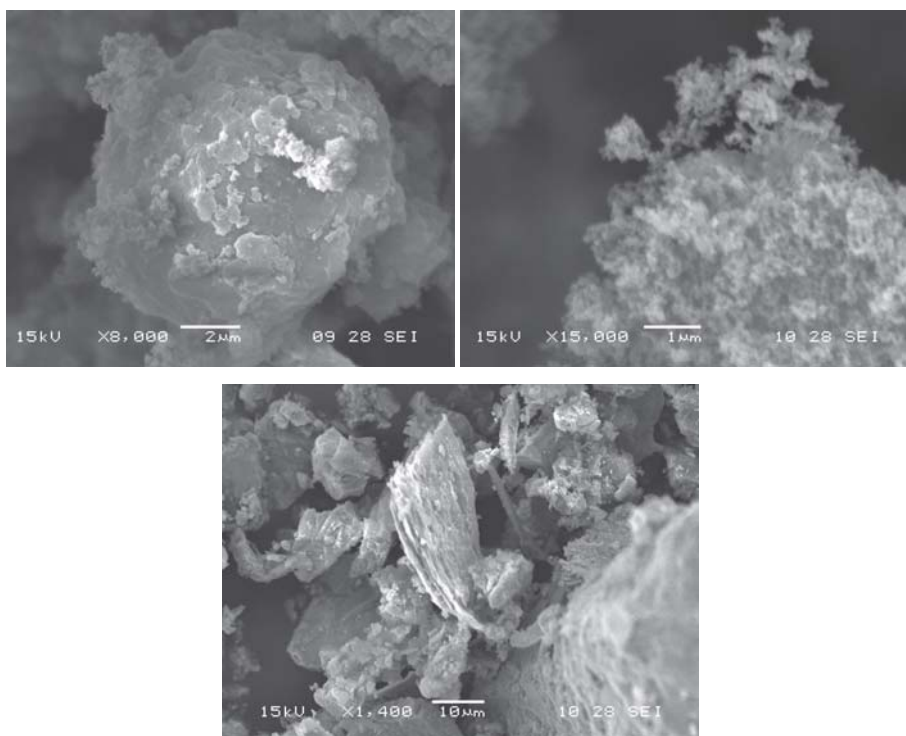
Izquierda, centro: esférulas magnéticas de origen industrial (fábrica metalúrgica) acumulados en líquenes (adaptado de Chaparro *et al.*, 2013); derecha: aumento magnético observado en un suelo próximo a una fábrica metalúrgica de Tandil (metalúrgica Tandil) (adaptado de Chaparro, 1999).

salud humana ya que son altamente respirables y pueden llegar a alojarse en órganos y torrente sanguíneo (Raga *et al.*, 2001). Las partículas menores a 4,6  $\mu\text{m}$ , resultan peligrosas a nivel bronquial, mientras que las menores a 1,1  $\mu\text{m}$  llegan a depositarse en los alvéolos. Algunas enfermedades asociadas son asma, enfisemas, bronquitis silicosis, cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares y enfermedades oculares (Marié, 2017).

Por otro lado, los contaminantes también pueden provenir de emisiones urbanas, entre ellas, una de las principales contribuciones es atribuida al tráfico vehicular (Palmgren *et al.*, 2003), que comprenden diferentes fracciones de partículas: partículas ultra finas (<30 nm, 30-10 nm) formadas en el motor y en el caño de escape o inmediatamente después de la emisión; partículas finas (0.1-2  $\mu\text{m}$ ) formadas durante reacciones químicas u otros procesos; y partículas más gruesas (>2  $\mu\text{m}$ ) formadas mecánicamente por la abrasión de material de las rutas, neumáticos y sistema de frenos (Palmgren *et al.*, 2003). De este modo las emisiones vehiculares no solo incluyen estas partículas magnéticas producto de los gases de combustión emitidos por los automotores (Hunt *et al.*, 1984; Beckwith *et al.*, 1986; Flanders, 1994; Hoffmann *et al.*, 1999; Kasper *et al.*, 1999; Matzka y Maher, 1999; Abdul-Razzaq y Gautam, 2001; Lu *et al.*, 2005; Maher *et al.*, 2008; Bucko *et al.*, 2010; Chaparro *et al.*, 2010), sino que también pequeñas partículas sólidas generadas por la corrosión y abrasión de distintas partes del automóvil (*e.g.* sistema de frenado) como puede observarse en la figura 6 (Chaparro *et al.*, 2010). Marié (2010) encontró que estas partículas muestran enriquecimiento de algunos elementos traza (Ba, Cr, Cu, Zn y Pb) y son de tamaño de grano fino (0.1-5  $\mu\text{m}$ ). De este modo, pueden ser fácilmente inhaladas y constituyen un grave riesgo para la salud, contribuyendo a aumentar las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, las cuales representan dos de las primeras causas de muerte en algunos países (Pope *et al.*, 2002; Knutsen *et al.*, 2004; Knox, 2006).



Figura 6. Contaminantes magnéticos de origen vehicular



Partículas magnéticas producto de combustión para motores (izquierda) a gasolina, (centro) diésel y de la abrasión del sistema de frenos (derecha). Partículas muy finas (sub y micrométricas), respirables y nocivas para la salud (Chaparro *et al.*, 2010; Marié, 2010).

### *Contaminación por industrias y tráfico vehicular*

La contaminación antropogénica suele tener una señal que las técnicas magnéticas han demostrado ser capaces de captar permitiendo su cuantificación y la discriminación entre diferentes fuentes de contaminación, junto con otras líneas de evidencia. Este hecho ha posibilitado un gran número de estudios que no podrían ser realizados mediante otras técnicas sin la inversión de gran cantidad de tiempo y dinero. El impacto de los

contaminantes antropogénicos (que contienen partículas ricas en Fe) en suelos genera en un aumento magnético de los horizontes superficiales que puede manifestarse con diferente intensidad. El valor absoluto de este aumento magnético depende del nivel de contaminación y de las características pedológicas de los suelos (Zawadzki *et al.*, 2012). Los estudios realizados por Magiera *et al.* (2006) en distintos suelos de Europa muestran que los suelos contaminados tienen una señal característica, los autores lo identifican como suelos Tipo A y se caracterizan por mostrar un fuerte aumento de la susceptibilidad magnética en los primeros 8 cm y luego un decrecimiento importante con la profundidad.

El monitoreo magnético se basa en estudios que indican una relación potencial entre metales pesados y parámetros magnéticos para distintos ambientes (Hunt *et al.*, 1984; Beckwith *et al.*, 1986; Heller *et al.*, 1998; Hoffman *et al.*, 1999; Hanesch y Scholger, 2002; Chaparro *et al.*, 2004, 2006, 2012, 2015; Bucko *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2013). Los eventos de contaminación antropogénica también pueden estudiarse teniendo en cuenta la naturaleza espacial del problema. Este enfoque alternativo para el uso del magnetismo ambiental se constituye simplemente asumiendo los eventos de contaminación como procesos que se desarrollan y afectan un espacio determinado, en un cierto intervalo de tiempo. Entre las principales ventajas que caracterizan la aplicación de técnicas de medición de parámetros magnéticos en el estudio de procesos de contaminación antropogénica, se destacan tanto su rapidez como su relativamente bajo costo de determinación. Estas características, sumado a la facilidad de acceso y la precisión de las tecnologías de geolocalización, hacen del magnetismo ambiental una herramienta sumamente eficiente para aplicar en estudios espaciales de contaminación. El monitoreo magnético ha sido satisfactoriamente realizado en distintas áreas del mundo sobre áreas amplias o reducidas con mallas de muestreo de distinta densidad (Schibler *et al.*, 2002; Chaparro *et al.*, 2007; Blundell *et al.*, 2009; Zawadzki *et al.*, 2009, 2012; Jordanova *et al.*, 2013).

La influencia de contaminantes emitidos por fábricas metalúrgicas localizadas en el área urbana de Tandil (Argentina) fue estudiado por Chaparro *et al.* (2002). La ciudad de Tandil es relativamente pequeña

(~108000 habitantes) y cuenta con un reducido número de fábricas (alrededor de 0.2 por km<sup>2</sup>) ubicadas en su área urbana. En este estudio se observó, a partir de los parámetros magnéticos dependientes de la concentración ( $\kappa$  y magnetización remanente isotérmica de saturación –MRIS–), un comportamiento diferente para suelos cercanos a las fábricas metalúrgicas y suelos naturales. Las muestras del área industrial revelan valores más altos de susceptibilidad y MRIS ( $\kappa = 341\text{--}412 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ; MRIS =  $31\text{--}56 \times 10^{-3} \text{ A m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) con respecto los suelos naturales sin influencia de la contaminación ( $\kappa = 32\text{--}136 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ; MRIS =  $4\text{--}8 \times 10^{-3} \text{ A m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ). Por otra parte, los suelos del área industrial muestra valores menores de coercitividad de remanencia ( $H_{cr} = 32\text{--}34 \text{ mT}$ ), y una ubicación diferente en el gráfico de MRIS versus susceptibilidad magnética. Estos resultados sugieren una proporción más alta de óxidos ferrimagnéticos y tamaños de grano mayores en las zonas contaminadas. Los principales portadores magnéticos son óxidos ferrimagnéticos, tales como, magnetita DS/PDS para las áreas industriales, y magnetita DS con contribución de granos SP para una de las áreas naturales. La presencia de hematita se sugiere también para una de las áreas naturales. Es también posible, la presencia de una baja proporción de materiales ferrimagnéticos de origen secundario, como maghemita. Los resultados de difracción de RX apoyan la presencia de magnetita para ambos sitios, aunque la proporción más alta se encuentra en los sitios industriales. Estudios recientes de biomonitorio en el área de interés (Chaparro *et al.*, 2013) son consistentes con estos resultados, ejemplos de estas partículas magnéticas contaminantes acumuladas en líquenes pueden apreciarse en la figura 5.

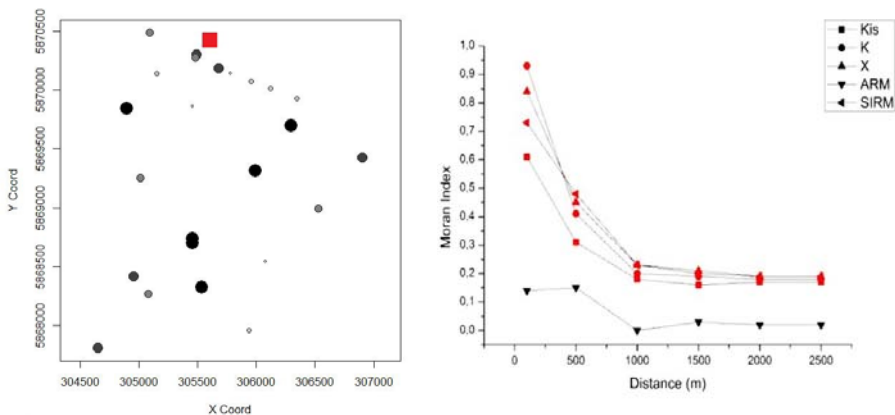
Las fábricas productoras de coque constituyen otra de las fuentes de contaminación industrial. Bidegain *et al.* (2011) reportaron estudios magnéticos y no magnéticos de emisiones de una coquera ubicada en La Plata. Estas emisiones involucran minerales del tipo magnetita y partículas de diferente tamaño (<2.5  $\mu\text{m}$ , 2.5-10  $\mu\text{m}$ ), morfología y composición. Entre los elementos perjudiciales para la salud, se encontraron además metales tales como Fe, Cu, Zn, V y Pb. Más recientemente, Rachwa *et al.* (2015) presentan un estudio detallado de contaminantes industriales

(fábricas de coque y metalúrgicas) en suelos de Polonia utilizando métodos magnéticos, geoquímicos y mineralógicos. Ellos concluyen que los contaminantes emitidos por ambas fábricas contienen partículas magnéticas, metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos. El contenido de estos contaminantes decrece con la distancia a las fuentes emisoras y en contra de los vientos predominantes.

Los estudios de contaminación generada por una fábrica de coque en Tandil fueron reportados por Gargiulo *et al.* (2011). Las emisiones de MP comprenden una amplia variedad de tamaños de granos, morfología y composición. Los estudios químicos y de mineralogía magnética mostraron alta concentración de Vanadio-Níquel y una fuerte predominancia de minerales magnéticos del tipo ferrimagnéticos. Por otro lado, la distribución espacial de estas variables mostró concordancia con los resultados del modelo Gaussiano de dispersión de metales pesados. La figura 7 muestra la representación espacial de la  $\kappa$  en suelos superficiales para la dispersión y deposición de MP de la fábrica de coque metalúrgico (Gargiulo *et al.*, 2011).

Como puede observarse, a partir del análisis visual de la figura 7, resulta difícil obtener conclusiones sobre la estructura espacial del problema (por

Figura 7. Dispersión de contaminantes magnéticos de origen industrial



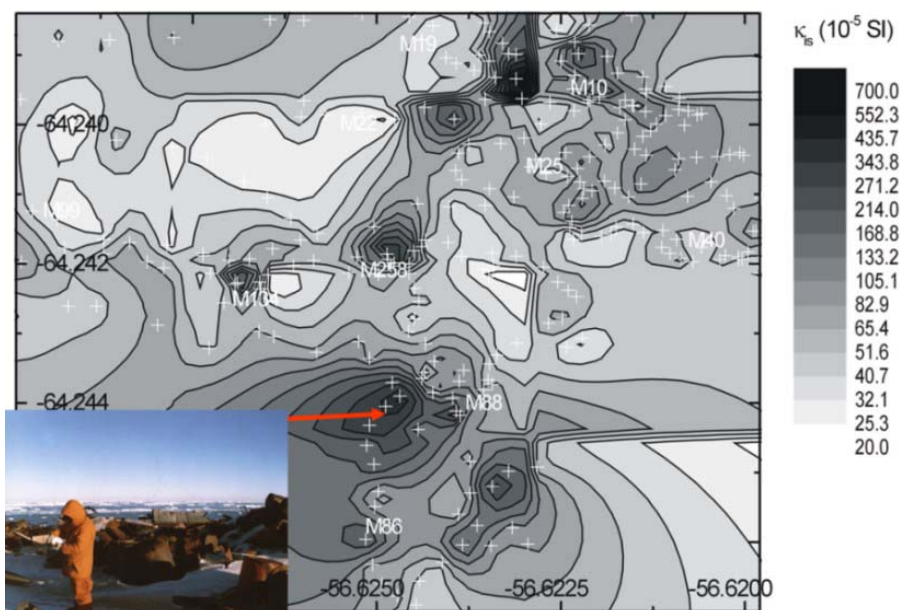
Izquierda: registros de la  $\kappa$  en un caso de dispersión atmosférica de MP de una fábrica de coque (rectángulo rojo). El tamaño de los puntos y la escala de grises indican la magnitud de la variable. Derecha: correlogramas de varios parámetros magnéticos en muestras de suelos superficiales. Los puntos rojos indican significancia estadística ( $p < 0,05$ ).

ejemplo, regiones claramente definidas donde aumenta o disminuye la  $\kappa$ ). El índice de Moran (IM, Cressie, 1993) permite describir, diagnosticar y encontrar el grado de autocorrelación espacial.

La representación de este índice para diferentes clases de distancia, denominado *Correlograma*, permite explorar la dependencia espacial de los datos (figura 7). Los parámetros  $\kappa_{is}$ ,  $\kappa$  y MRIS mostrados en la figura 7 son indicativos de concentración de minerales magnéticos y muestran una fuerte autocorrelación positiva que decrece con la distancia. La MRA es el único parámetro que muestra un comportamiento espacial disperso, indicando una posible contribución de minerales ferrimagnéticos finos que necesitan de una variable explicativa para analizar correctamente el patrón espacial que desarrollan.

En la Antártida, la ocupación humana ha modificado localmente áreas de influencia de distintos asentamientos. Especialmente, debido a que ningún tipo de control ni cuidados para el medio ambiente fue realizado hasta el acuerdo del Protocolo de Madrid en 1991, prolongándose hasta el 2000. Chaparro *et al.* (2007) realizaron un estudio preliminar de la contaminación en el área, realizando uno de los primeros estudios de monitoreo magnético en suelos antárticos (Base Marambio, Antártida). Los autores observaron diferentes contaminantes en los suelos, entre ellos, residuos sólidos diversos, restos metálicos y óxidos ya incorporados en los sedimentos, restos de pintura, y cenizas emitidas por motores a combustión. Las mediciones de susceptibilidad magnética *in situ* variaron en un amplio rango, alcanzando valores de  $\kappa = 700 \times 10^{-5}$  SI (figura 8).

Estudios realizados en suelos de la Base Antártica Marambio (Chaparro *et al.*, 2007). A partir de estas mediciones se identificaron zonas de incrementos magnéticos que están relacionadas con contaminantes dispersos e incorporados en los suelos. Entre las conclusiones obtenidas en este lugar, se puede observar que, a) se discriminaron zonas afectadas por contaminantes visibles (restos metálicos) y no visibles a partir de mediciones magnéticas validando la utilización de técnicas de magnetismo en esta problemática; b) las mediciones magnéticas en laboratorio indicaron la predominancia de minerales ferrimagnéticos (magnetita, titanomagnetita) sobre antiferromag-

Figura 8. Monitoreo de la contaminación utilizando susceptibilidad magnética *in situ* ( $\kappa_{is}$ )

Elaboración propia.

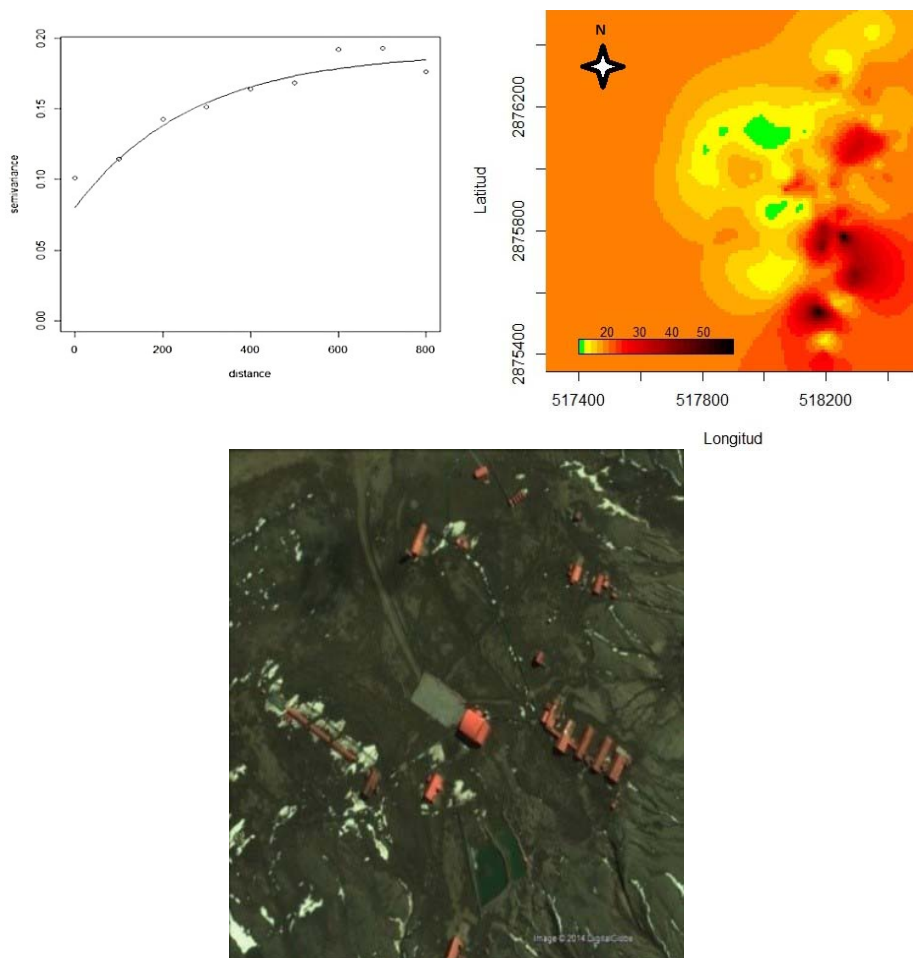
néticos (hematita); c) los parámetros relacionados con tamaños de granos magnéticos revelaron granos más gruesos ( $\sim 5\text{-}20\ \mu\text{m}$ ) para zonas contaminadas que en las zonas naturales ( $<1\ \mu\text{m}$ ); d) a partir de los estudios químicos se detectaron altos contenidos de plomo, zinc y el índice PLI (Tomlinson Pollution Index), superando varias veces sus valores de base (hasta 4 veces para el PLI,  $\text{PLI} \sim 4$ ); e) los análisis estadísticos mostraron la existencia de correlaciones significativas entre variables magnéticas y químicas; f) los parámetros magnéticos  $\kappa$  y  $\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$  pueden ser utilizados en la Antártida, para el monitoreo de la contaminación en forma espacial y temporal.

Gargiulo y Chaparro (2012) continuaron los trabajos en la Antártida sobre una colección de muestras en suelos de la Base Marambio. Estos nuevos datos se incorporaron y analizaron utilizando métodos magnéticos y geoestadísticos estudiando la distribución espacial de la  $\kappa$  con el objetivo

de describir geoestadísticamente (magnitud y extensión) la influencia de la actividad humana en el área de estudio. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la  $\kappa$  entre sitios de control ( $\langle \kappa \rangle = 14.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , máximo de  $19.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) y con actividad antropogénica ( $\langle \kappa \rangle = 31.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , máximo de  $615.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), confirmando la efectividad del método para la evaluación de la contaminación. Por otro lado, se analizaron los variogramas experimentales generados a partir de los datos georreferenciados. Esta herramienta (Cressie, 1993; Diggle y Ribeiro, 2007), permite un análisis profundo de la estructura espacial de los datos, ya sobre ellos se ajustan diferentes modelos que luego son utilizados. La figura 9 muestra el variograma experimental obtenido en esta región para la variable  $\kappa$ . Este variograma muestra una excelente dependencia espacial hasta los 800 m (que se define como el Rango o alcance para el área considerada). Dada las características del método de medición y el protocolo empleado, la principal fuente de varianza de pequeña escala la produce la discontinuidad de valores en puntos próximos en los que se encontraron valores muy altos de  $\kappa$ . Por ejemplo, en puntos muestrales donde se identifican restos metálicos, la  $\kappa$  es muy alta respecto a sus alrededores. La figura 9 muestra el mapa de interpolación de Kriging, donde se observa claramente las regiones hacia donde aumenta la  $\kappa$ . Estos mapas muestran el área de influencia de las fuentes de contaminación en este sitio de interés.

Marié *et al.* (2010) y Chaparro *et al.* (2010) llevaron a cabo estudios de contaminantes derivados del tráfico vehicular, provenientes de fuentes primarias (vehículos), rutas (área pavimentada), suelos próximos a la ruta (banquinas) y áreas adyacentes. El análisis de los parámetros magnéticos sugieren que la señal magnética de las emisiones de los vehículos es controlada por minerales del tipo magnetita, y la estimación del tamaño de grano magnético revela la presencia de partículas finas ( $< 5 \mu\text{m}$ ) y muy finas ( $0.1\text{-}2 \mu\text{m}$ ), las que pueden ser inhaladas y por lo tanto son peligrosas para la salud. Los análisis de correlación realizados entre variables químicas y magnéticas revelaron correlaciones estadísticamente significativas ( $R = 0.55\text{-}0.83$ ), por lo cual puede confirmarse que los parámetros representativos de concentración ( $\kappa$ ,  $\kappa$  y magnetización remanente anhística) y de tamaño

Figura 9. Variograma experimental y ajuste por mínimos cuadrados de la  $\kappa$  y mapa de Interpolación Kriging de la  $\kappa$  [en  $\text{m}^3/\text{kg}$ ] en suelos de la Base Marambio, Antártida Argentina



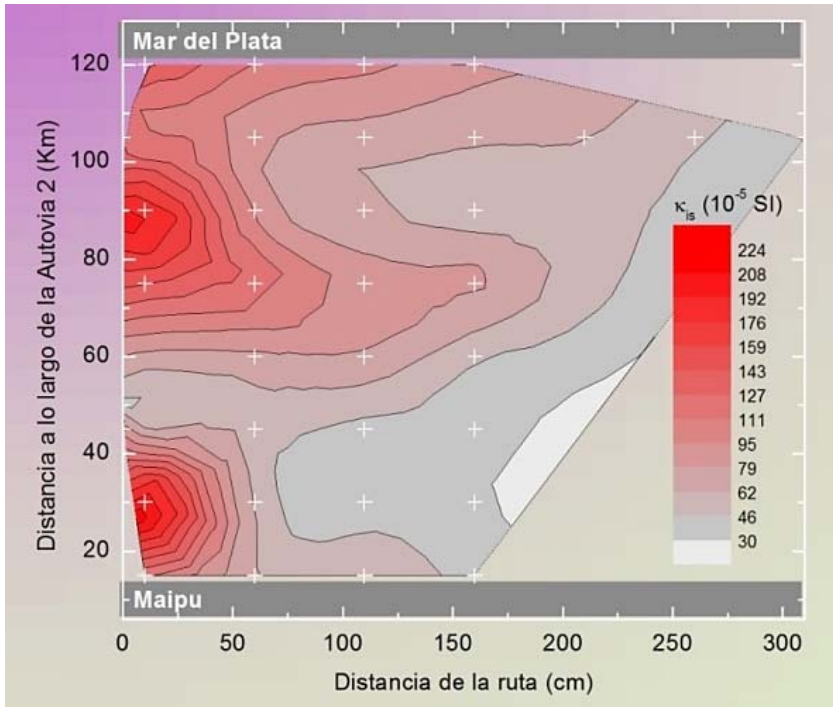
Elaboración propia.

de grano magnético ( $\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$ ) son potenciales indicadores para evaluar la presencia de trazas de elementos tóxicos: Ba, Cr, Zn, Cd y Pb derivados de la contaminación vehicular. Marié *et al.* (2010) también realizaron mediciones de  $\kappa$  sobre la capa superficial de suelos próximos al pavimento (en banquina) a lo largo de la Autovía 2, entre el peaje Maipú y Mar del



Plata (Provincia de Buenos Aires). Los resultados se representaron en un mapa de contornos (figura 10) que muestran la distribución espacial de los valores de  $\kappa$ , se observan valores altos de  $\kappa$  próximos al borde de la ruta.

Figura 10. Mediciones de susceptibilidad magnética *in situ* realizadas en suelos (zona de banquina) a lo largo de la Autovía 2 (Provincia de Buenos Aires)



Adaptado de Marie *et al.* (2010).

Tal comportamiento es esperable debido a que los contaminantes son emitidos por los vehículos (única fuente de contaminación a lo largo de la Autovía 2), transportados desde la ruta y acumulados sobre la banquina. En la Fig. 10 se observa que los valores más bajos de  $\kappa$  varían entre 30 y 45  $\times 10^{-5}$  SI y se observan aproximadamente a partir de 1-2.5 m desde el borde de la ruta, por otro lado, los valores más altos ( $\kappa \sim 200 \times 10^{-5}$  SI) se encontraron en las cercanías de la superficie asfáltica, esto es dentro de aproximadamente los 0.5 m y puede explicarse a partir del transporte,

atmosférico y por agua de lluvia, de los minerales magnéticos (Marié 2010). Este comportamiento concuerda con otros estudios realizados en otros países (Hoffmann *et al.*, 1999; Gautam *et al.*, 2004; Amereih *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006; El-Hasan, 2008).

### **Modificación antrópica de propiedades magnéticas por actividad de poblaciones cazadoras-recolectoras prehispanicas**

Las poblaciones humanas pasadas que estudia la arqueología a través del registro material macroscópico o microscópico, se instalaron principalmente sobre suelos, por ser éstos superficies geomorfológicas estables. También habitaron sectores del espacio no edafizados, como son la mayoría de los reparos rocosos (cuevas y alero), pero los sitios arqueológicos sobre suelos son más la regla que la excepción. Una expresión particular del registro arqueológico son las modificaciones geoquímicas, magnéticas, sedimentológicas y micromorfológicas que tienen lugar en la matriz de los suelos o depósitos sedimentarios, contenedores de los restos materiales como huesos, desechos líticos, valvas de molusco, cerámica, entre otros.

Específicamente, las modificaciones de las propiedades magnéticas en los contextos arqueológicos están sujetas al tipo de actividad humana llevada a cabo y a todos los procesos que ocurrieron desde que dicha actividad terminó. Esto equivale a decir que el diseño metodológico para detectar señales magnéticas en arqueología debe contemplar toda la serie de procesos (naturales y antrópicos) que pudieron ocurrir y –en efecto– distorsionar las modificaciones magnéticas de la conducta humana pasada que se desea estudiar. Vale destacar que muchas veces ocurre que el objetivo son los procesos naturales *per se*, en tanto que el ambiente también es objeto de estudio en arqueología.

En contextos pre-industriales como los discutidos en este apartado, una de las actividades humanas que mayor modificación magnética imprime en los suelos o sedimentos son las vinculadas a la quema o combustión de materiales orgánicos. Le Borne (1960) y varios otros autores en las décadas siguientes (Tite y Mullins, 1971; Aitken, 1970; Mullins, 1974; Oldfield

*et al.*, 1981; Fitzpatrick, 1985; Maher, 1986; Maher y Taylor, 1988; Dearing *et al.*, 1996) demostraron que el fuego (natural o antrópico) generaba un ambiente anaeróbico en los suelos promoviendo una serie de mecanismo que conducían al enriquecimiento de la señal magnética (producción de magnetita y maghemita al oxidarse), dada una cierta proporción de materia orgánica y la presencia de hierro en el suelo, entre otros factores.

Desde entonces, los estudios magnéticos en arqueología, específicamente los de susceptibilidad magnética, han comenzado a formar parte del protocolo de trabajo, principalmente como complemento de análisis geoquímicos (fósforo, multielementos, carbonatos, etc.) y sedimentológicos (Thompson y Oldfield, 1986; Crowther, 2003; French, 2003; Goldberg y Macphail, 2006). Dalan y Banerjee (1998) y más recientemente Dalan (2008) ofrecen una revisión exhaustiva de las potencialidades de las distintas propiedades magnéticas aplicables en distintos contextos arqueológicos. Los autores exponen numerosos casos de estudio y señalan una serie de aplicaciones que podrían resumirse en las siguientes.

- 1 Definición de los límites de áreas de actividad, funcionalidad de los espacios, estrategias de construcción de los mismos e intensidad de ocupación humana (Allen y Macphail, 1987; Oldfield *et al.*, 1985; Clark, 1990; Gose *et al.*, 1994; Ellwood *et al.*, 1995; Dalan y Banerjee, 1998; Marmet *et al.*, 1999; Orgeira *et al.*, 2000; Macphail y Crowther, 2004; Rosendhal *et al.*, 2014; Ozán y Orgeira, 2015; Ozán *et al.*, 2017). Aquí vale mencionar el caso de la construcción de los famosos montículos de Cahokia (que alcanzan dimensiones de unos 30 metros de altura y 300 m de lado), ubicados en el suroeste del estado de Mississippi (Dalan, 1997; Dalan y Banerjee, 1998). A través de un programa intensivo y extensivo de medición magnética se registraron claros contrastes entre los valores de susceptibilidad magnética y magnetización remanente anhística dentro del sitio y en áreas naturales de control, permitiendo inferir el origen de los sedimentos removidos para la construcción de los montículos. Asimismo, este estudio descubrió que estas poblaciones

no sólo removieron toneladas de sedimentos de áreas aledañas, sino que nivelaron las depresiones resultantes de dicha remoción (Dalan, 1997).

- 2 Modificación humana del paisaje. Asociado a lo anterior, los contrastes entre las alteraciones dentro de los sitios arqueológicos y fuera de ellos pueden convertirse en una medida cuantitativa del grado de “contaminación” humana en el pasado (Dockrill y Simpson, 1994; Crowther y Barker, 1995). Aquí vale aclarar que existen sustanciales diferencias entre la arqueología de ciudades medievales o romanas, aldeas neolíticas, poblados mayas o incas, campos de agricultura de tiempos históricos y la arqueología de poblaciones cazadoras-recolectoras con alta movilidad de, por ejemplo el centro y sur de Argentina y Chile o el desierto australiano. En otras palabras, el grado o intensidad de modificación humana de un espacio no sólo se vincula al tipo de actividad, sino a la duración y redundancia con la que se llevó a cabo en el mismo espacio. Esto último variará de acuerdo a si se trate de cazadores-recolectores nómades, pastores con movilidad estacional, habitantes de aldeas, poblados, ciudades de distinta envergadura y todos los matices entre estas categorías arbitrarias.
- 3 Propiedades magnéticas como medio de datación. El paleomagnetismo (comportamiento del campo geomagnético en el pasado) puede ser usado en una estratigrafía arqueológica como método de datación por correlación de rasgos magnéticos (reversiones o excursiones) con edades conocidas (Eighmy y Sternberg, 1990; Nami, 1995; Sinito *et al.*, 2001). En este sentido también pueden analizarse las señales magnéticas de ciertos objetos tecnológicos metálicos como monedas y cerámica cuya arcilla puede contener minerales compuestos por hierro (Evans, 1977; Tarling, 1983; Schmidbauer *et al.*, 1986; Moskowitz *et al.*, 1987; Borradaile *et al.*, 1998).

Desde este tipo de enfoques se destaca el trabajo de Ellwood y colaboradores (1997, 2004) quienes midieron la susceptibilidad

magnética de numerosas cuevas en diferentes partes del mundo y encontraron –entre otras cosas– que la secuencia estratigráfica de una cueva en Bélgica (“Scladina”) se relacionaba con unos núcleos marinos y en efecto pudo ser datada en *ca.* 90000 años.

- 4 Propiedades magnéticas como proxy ambiental de pedogénesis, incendios naturales y dinámica geomorfológica. Esto ya ha sido mencionado en el comienzo del capítulo cuando se describió cómo los horizontes superficiales de un suelo pueden –bajo determinadas circunstancias– mostrar un pico en la señal magnética. Pese a que la resolución temporal de un suelo es baja, por su propia naturaleza tiempo-transgresiva- su presencia junto a materiales arqueológicos sugiere que las poblaciones ocuparon espacios estables y bajo condiciones climáticas moderadas dado que la formación de un suelo supone ciertos valores mínimos de humedad y temperatura para su formación (Oldfield *et al.* 1983; Thompson y Oldfield 1986; Almgren 1989; Dearing *et al.* 1990; Brown 1992; Ollendorf 1993; Lageras y Sandgren 1994; Orgeira *et al.* 2000).

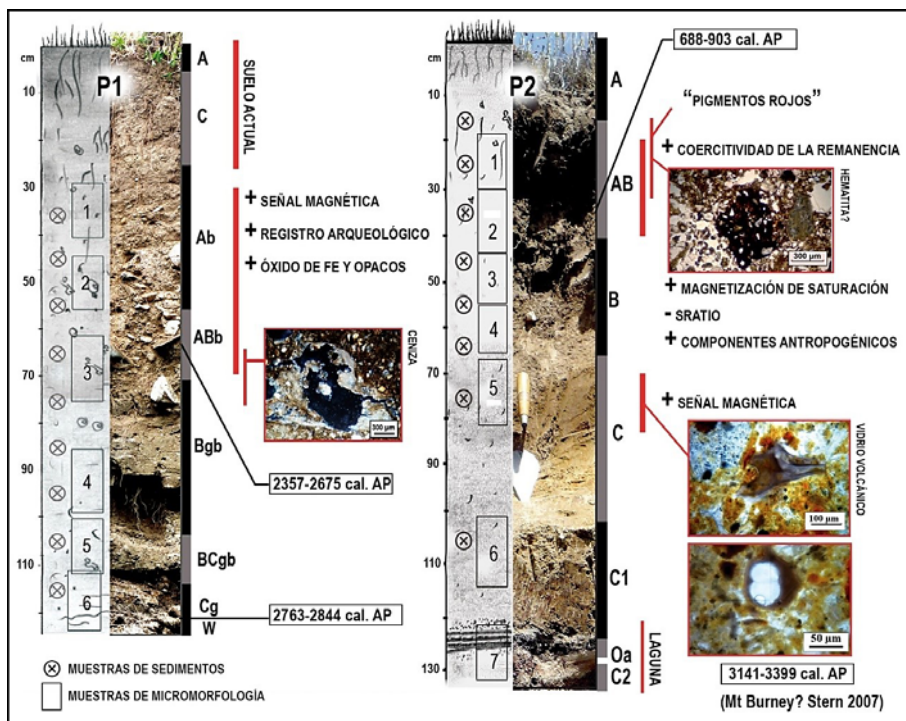
Por caso el trabajo de Tsatskin y Nadel (2003) en el sitio perteneciente al Pleistoceno tardío (*ca.* 23000 AP) Ohalo II, (margen sur del Mar de Galilea, Israel), combinó susceptibilidad magnética, micromorfología de suelos y análisis sedimentológicos para comprender la evolución de la fluctuación del Lago Lisan, aledaño al sitio arqueológico. El reconocimiento de la señal magnética de los sedimentos lacustres (que contenían granos de basalto) contribuyó al reconocimiento de episodios de inundación del sitio arqueológico, generando discordancias erosivas en la estratigrafía y –en efecto– potenciales sesgos en su interpretación.

*Un caso de estudio: propiedades magnéticas en contextos de cazadores-recolectores de latitudes extremas.*

Con el objeto de discutir el origen de la señal magnética (natural y/o antrópica) en relación a las características micromorfológicas de dos perfiles

de suelo pertenecientes a un sitio arqueológico del Holoceno tardío (Marazzi 2) en el noroeste de la Isla Grande de Tierra del Fuego, Chile (figura 11), se llevaron a cabo mediciones de tres propiedades magnéticas: a) susceptibilidad magnética, b) ciclos de histéresis y c) magnetización remanente isotérmica con campo inverso (Ozán y Orgeira, 2015). De las últimas dos se obtuvieron los parámetros de magnetización de saturación ( $M_s$ ), magnetización remanente de saturación ( $M_{rs}$ ), coercitividad ( $H_c$ ) y coercitividad de la remanencia ( $H_{cr}$ ) para dar cuenta del tipo de mineral (antiferromagnéticos o ferrimagnéticos, de alta o baja coercitividad respectivamente), la cantidad de mineral magnético y –en menor medida– el tamaño de partícula y la naturaleza de la misma.

Figura 11. Síntesis esquemática de los principales aspectos que surgen de las propiedades magnéticas de P1 y P2



Elaboración propia. Los límites entre horizontes son difusos, pese a que en la representación con barras se observan con claridad.

La figura 11 sintetiza los aspectos relevante de este caso de estudio (la información completa puede verse en Ozán y Orgeira, 2015). El trabajo con propiedades magnéticas en el perfil P1, ubicado en una terraza fluvial alta, indica un aumento en la señal magnética (por presencia de magnetita y/o titanomagnetita) entre los 30-70 cm de profundidad. Esta señal coincide con un horizonte Ab y ABb, en el que se registra una actividad antrópica intensa que incluye restos de carbón, ceniza vegetal y material óseo alterado térmicamente, todos claros indicadores de combustión. Más aún, las partículas de dominio simple y superparamagnéticas registradas a los 60-70 cm de profundidad coinciden exactamente con la mayor abundancia de cenizas vegetales registradas en las muestras micromorfológicas. Asimismo, en estos horizontes, los estudios mineralógicos muestran que la frecuencia de nódulos de óxido de hierro y minerales opacos (parte de ellos probablemente atribuibles a magnetita) presentan un pico a esta profundidad. Esto último, que coincide con un incremento en la señal magnética, podría corresponder a magnetita antropogénica originada por combustión en los fogones (Allen y Macphail, 1987; Marmet *et al.*, 1999). Cabe agregar que los valores de susceptibilidad magnética de Ab y ABb en P1 son superiores a los registrados en los sondeos arqueológicos y perfiles naturales dispersos en un área aledaña al perfil de unas decenas y algunos cientos de metros de diámetro.

Si bien como se señaló reiteradas veces la pedogénesis provoca un aumento de la señal magnética, al igual que la combustión, en este caso se descarta la primera porque la alteración de magnetita detrítica por pedogénesis es sugerida si hay precipitaciones pluviales moderadas a abundantes, destacada disponibilidad de materia orgánica, pH ácido y/o presencia de agua poral con sílice en solución (Orgeira *et al.*, 2011), condiciones que no se cumplen en P1. Esto estaría señalando con mayor robustez que las ocupaciones humanas fueron las causantes del enriquecimiento de la señal magnética. Una implicancia arqueológica directa de este hecho es que es altamente probable que el contexto de P1 sea *in situ*, y no una acumulación por procesos coluviales u otros agentes no-antrópicos. Dicho en otras palabras, los sedimentos que contienen el material

arqueológico son “coherentes” con las propiedades de los mismos: materiales que indican combustión contenidos en sedimentos enriquecidos en su señal magnética por temperatura.

Por su lado, el perfil P2, ubicado en una cota más alta, al pie de una depresión correspondiente a un *kettle hole*, presenta diferencias en los minerales magnéticos presentes. Se destacan valores elevados de coercitividad de la remanencia entre 20-40 cm de profundidad, compatibles con hematita finamente particulada (5-25  $\mu\text{m}$ ; De Boer, 1999). Esta hematita, (que también parece observarse en los estudios micromorfológicos, Tsatskin *et al.*, 2006) podría incluso tener un origen antrópico. La excavación arqueológica ubicada a unos 15 metros al sur de P2 (Morello *et al.*, 1998) describe la presencia de “pigmento rojo” entre los 15 y 30 cm de profundidad, coincidiendo con el pico de coercitividad de P2. Vale destacar que el uso de pinturas corporales y sobre objetos entre las poblaciones Selk’nam del norte de la Isla se encuentra bien documentado desde la llegada de los primeros europeos (Fiore *et al.*, 2008). Este hecho plantea la posibilidad de que dichos pigmentos sean total o parcialmente los responsables del incremento del parámetro de coercitividad.

A su vez, este pico de coercitividad también coincide con un ligero incremento de la magnetización de saturación, un descenso marcado de  $S_{\text{ratio}}$ , la presencia de un horizonte AB y la máxima abundancia de componentes antropogénicos registrados en las muestras micromorfológicas que incluyen carbón. Adicionalmente la muestra ubicada a 73-80 cm de profundidad se destaca por sus valores relativamente altos en la señal magnética y su consistencia entre todos los otros parámetros. A esta profundidad no se observan componentes antropogénicos microscópicos (Ozán *et al.*, 2017), ni aflora material arqueológico en el perfil. Este aumento de la señal probablemente se relaciona con el incremento de concentración de minerales magnéticos (magnetita y/o titanomagnetita) contenidos el abundante vidrio volcánico que se observa en las secciones delgadas (figura 11). Más aún, según la relación de parámetros de histéresis establecida (Dunlop, 2002) se puede inferir presencia de magnetita superparamagnética, posiblemente como inclusión en dicho vidrio volcánico.



Este depósito de vidrio volcánico de tipo básico se corresponde con un horizonte C, y la excelente preservación de las trizas (formas angulares) sugiere una deposición eólica y rápido sepultamiento en un medio relativamente neutro. Como se indica en la figura 12, este depósito podría tratarse de la última erupción de Mt. Burney, datada en  $3115 \pm 110$  AP (Stern, 2007) y registrada en la región.

En síntesis, este caso de estudio en contextos de cazadores-recolectores de alta movilidad, en latitudes extremas, muestra que la intensidad de las actividades humanas a cielo abierto vinculadas a la combustión (cocción de alimentos, calefacción, etc.), modificaron las propiedades magnéticas naturales de los suelos. Este estudio también destaca que la presencia de minerales magnéticos de alta coercitividad como la hematita es potencialmente atribuida a la utilización por parte de las poblaciones humanas de óxidos de hierro como sustancias colorantes; y que la micromorfología de suelos resultó ser una herramienta clave junto al análisis de propiedades magnética. Esta técnica permitió el reconocimiento de cenizas vegetales (no visibles macroscópicamente) y otros componentes asociados a la combustión; el registro de procesos de reducción y lavado de los óxidos de hierro; y la cuantificación mineralógica (especialmente opacos, óxidos de hierro y vidrio volcánico), entre otros aspectos, que contribuyeron a discutir las variaciones y causas de la señal magnética de ambos perfiles.

## **Agradecimientos**

Agradecemos al Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) de Argentina, a la Universidad de Buenos Aires y a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires por la financiación de las investigaciones de los trabajos nacionales expuestos. Asimismo, agradecemos al Archivo Fotográfico de la Asociación de Investigaciones Antropológicas por las fotografías presentadas.

## Referencias

- Abdul-Razzaq, W., Gautam, M. (2001) "Discovery of magnetite in the exhausted material from a diesel engine": *Appl. Phys. Lett.*, 78, pp. 2018-2019.
- Aitken, M. J. (1970) "Magnetic Location": Brothwell, D., Higgs, E. (Eds.) *Science in Archaeology*, Praeger Publishers, pp. 681-694.
- Allen, M. J., Macphail, R. I. (1987) "Micromorphology and magnetic susceptibility studies: their combined role in interpreting archaeological soils and sediments": Fedoroff, N., Bresson, L. M., Courty, M. A. (Eds.) *Soil Micromorphology*, Association Française pour l'Étude du Sol, pp. 669-676.
- Almgren, E. B. C. (1989) *Woodland Establishment, Expansion, and Regression in Association with Prehistoric and Later Human Settlements around Lough Gur, Co. Limerick, Ireland*, tesis doctoral, University of Minnesota, Minneapolis.
- Amereih, S. *et al.*, (2005) "Antimony speciation in soil samples along two Austrian motorways by HPLC-ID-ICP-MS": *J. Environ. Monit.*, 7, pp. 1200-1206.
- Banerjee, S. K. (2006) "Environmental magnetism of nanophase iron minerals: testing the biomineralization pathway": *Physical and Earth Planetary Interiors*, 154, pp. 210-221.
- Beckwith, P. R. *et al.* (1986) "Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments": *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, pp. 67-75.
- Bidegain J. C. *et al.* (2011) "Air pollution caused by manufacturing coal from petroleum coke in Argentina": *Environmental Earth Sciences*, 62 (4), pp. 847-855.
- Blundell, A. *et al.* (2009) "Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: A reappraisal using an England and Wales database": *Environmental Pollution*, 157, pp. 2878-2890.
- Borradaile, G. J., Stewart, J. D., Ross, W. A. (1998) "Characterizing Stone Tools by Rock-Magnetic Methods": *Geoarchaeology*, 13, pp. 73-91.
- Boyko, T. *et al.* (2002) "Anthropogenic and geogenic impacts on magnetic susceptibility anomalies of forest topsoil in Austria. Extended abstract for the International Symposium on Fundamental Rock Magnetism and Environmental Applications": *Erice*, 26.
- Brown, A. G. (1992) "Slope Erosion and Colluviation at the Floodplain Edge": Bell, M., Boardman, J. (Eds.) *Past and Present Soil Erosion: Archaeological and Geophysical Perspectives*, Oxbow Monograph 22, Oxford, Oxbow Books, pp. 77-87.

- Bucko, M. S. *et al.* (2010) "Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes – case study from Finland": *Water, Air, and Soil Pollution*, 209, pp. 295-306.
- Chaparro, M. A. E. (1999) *Caracterización magnética de distintos tipos de suelos – Aplicaciones*, tesis de licenciatura en Ciencias Físicas, UNCPBA: Facultad de Ciencias Exactas.
- (2006) *Estudio de Parámetros Magnéticos de Distintos Ambientes Relativamente Contaminados en Argentina y Antártida*, Monografía No. 7, UNAM: Geofísica.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2002) "Preliminary Results of Magnetic Characterisation of Different Soils in Tandil Region (Argentina) Affected by the Pollution of Metallurgical Factory": *European Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, Vol. 7, pp. 35-58.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2004) "Magnetic Studies Applied to Different Environments (Soils and Stream-Sediments) from a Relatively Polluted Area in Buenos Aires Province, Argentina": *Environmental Geology*, 45 (5), pp. 654-664.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2006) "Review of Magnetism and Heavy Metal Pollution Studies of Various Environments in Argentina": *Earth, Planets Space*, 58 (10), pp. 1411-1422.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2007) "Magnetic screening and heavy metal pollution studies in soils from Marambio station, Antarctica": *Antarct. Sci.*, 19, pp. 379-393.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2010) "Magnetic studies and scanning electron microscopy - x-ray energy dispersive spectroscopy analyses of road sediments, soils, and vehicle-derived emissions": *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54 (4), pp. 633-650.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2012) "An interval fuzzy model for magnetic monitoring: estimation of a pollution index": *Environmental Earth Sciences*, 66 (5), pp. 1477-1485
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2013) "Biomonitoring of urban air pollution: Magnetic studies and SEM observations of corticolous foliose and microfoliose lichens and their suitability for magnetic monitoring": *Environmental Pollution*, 172, pp. 61-69.
- Chaparro, M. A. E. *et al.* (2015) "An interval fuzzy model for magnetic biomonitoring using the specie *Tillandsia recurvata* L": *Ecological Indicators*.

- Clark, A. J. (1990) *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*, B. T. Batsford, London.
- Cressie, N. A. C. (1993) *Statistics for Spatial Data Revised Ed.*, John Willey and sons, New York.
- Crowther, J. (2003) "Potential magnetic susceptibility and fractional conversion studies of archaeological soils and sediments" *Archaeometry*, 45, pp. 685-701.
- Crowther, J., Barker, P. (1995) "Magnetic susceptibility: distinguishing anthropogenic effects from the natural": *Archaeological Prospection*, 2, pp. 207-215.
- Dalan, R. A. (1997) "The Construction of Mississippian Cahokia": Pauketat, T. R., Emerson, T. E. (Eds.), *Cahokia: Domination and Ideology in the Mississippian World*, University of Nebraska Press, pp. 89-102.
- Dalan, R. A., Banerjee, S. K. (1998) "Solving Archaeological Problems Using Techniques of Soil Magnetism": *Geoarchaeology*, 13 (1), pp. 3-36.
- De Boer, C. B. (1999) *Rock-Magnetic studies on the hematite, maghemite and combustion-metamorphic rocks. The quest to understand the "hidden attraction" of rocks*, Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aedwetenschappen, Universitat Utrecht.
- Dearing, J. A. *et al.* (1990) "Recent and Long-Term Records of Soil Erosion from Southern Sweden": Boardman, J., Foster, I. D. L., Dearing, J. A. (Eds.) *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley and Sons, England, pp. 173-200.
- Dearing, J. A. *et al.* (1996) "Frequency-dependent Susceptibility Measurements of Environmental Materials": *Geophysical Journal International*, 124, pp. 228-240.
- Dearing J. A., Livingstone, I. P., Bateman, M. D. (2001) "Paleoclimate records from OIS 8.0–5.4 recorded in loesspaleosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating": *Quat Int*, 76-77, pp. 43-56.
- Diggle, P. J., Ribeiro, P. J. (2007) *Model-based Geostatistics*, Springer-Verlag New York, [<http://www.springer.com/gp/book/9780387329079>].
- Dockrill, S. J., Gater, J. A. (1992) "Exploration and Interpretation in a Prehistoric Landscape": Spoerry, P. (Ed.) *Geoprospection in the Archaeological Landscape*, Oxbow Monograph 18, Oxbow Books, Oxford, pp. 25-31.
- Dockrill, S. J., Simpson, I. A. (1994) "The Identification of Prehistoric Anthropogenic Soils in the Northern Isles Using an Integrated Sampling Methodology": *Archaeological Prospection*, 1, pp. 75-92.

- Dunlop, D. J. (2002) "Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) Theoretical curves and tests using titanomagnetite data": *Journal of Geophysical Research*, 107 (B3), pp. 1029-2001.
- Durza, O. (1999) "Heavy contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant": *Phys. Chem. Earth* (A), 24, No. 6, pp. 541-543.
- Eighmy, J. L., Sternberg, R. S. (1990) *Archaeomagnetic Dating*, The University of Arizona Press, Tucson.
- El-Hasan, T. (2008) "The detection of roadside pollution of rapidly growing city in arid region using the magnetic proxies": *Environ. Geol.*, 54, pp. 23-29.
- Ellwood, B. B. *et al.* (1995) "Magnetic and Geochemical Variations as Indicators of Paleoclimate and Archaeological Site Evolution: Examples from 41 TR68, Fort Worth, Texas": *Journal of Archaeological Science*, 22, pp. 405-415.
- Ellwood, B. B., Petruso, K. M., Harrold, F. B. (1997) "High-resolution paleoclimatic trends for the Holocene identified using magnetic susceptibility data from archaeological excavations in caves": *Journal of Archaeological Science*, 24, pp. 569-573.
- Evans, B. J. (1977) "Magnetism and Archaeology: Magnetic Oxides in the First American Civilization": *Physica*, 86-88B, pp. 1091-1099.
- Evans, M. E., Heller, F. (2003) *Environmental Magnetism. Principles and applications of environmagnetics*, Academic Press, Elsevier.
- Fiore, D. *et al.* (2008) "Chemical analyses of the earliest pigment residues from the uttermost part of the planet (Beagle Channel region, Tierra del Fuego, Southern South America)": *Journal of Archaeological Science*, 35, pp. 3047-3056.
- Fischer, W. R. (1988) "Microbiological reactions of iron in soils": Stucki, V. *et al.* (Ed) *Iron in Soils and Clay Mineals*, Dorotrecht Reidel Publishing Company, pp. 715-748.
- Fitzpatrick, R. W. (1985) "Iron Compounds as Indicators of Pedogenic Processes: Examples from the Southern Hemisphere": Stucki, J. W., Goodman, B. A., Schwertmann, U. (Eds.), *Iron in Soils and Clay Minerals*, NATO ASI Series C 217, Dordrecht, pp. 351-396.
- Flanders, P. J. (1994) "Collection, measurement, and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment": *Journal of Applied Physics*, 75 (10), pp. 5931-5936.
- French, C. (2003) *Geoarchaeology in Action: Studies in soil micromorphology and landscape evolution*, Routledge, London.

- Gargiulo, J. D. *et al.* (2011) "Study of PM emission from a coke factory using environmental magnetism and complementary methods": *Latinmag Letters*, Vol. 1, no. 2, pp. 1-6.
- Gargiulo, J. D., Chaparro, M. A. E. (2012) "Estudios de contaminación antropogénica en la Base Marambio (Antártida) utilizando métodos de magnetismo ambiental y geoestadística" (ponencia), 8vo. Encuentro del Internacional Center For Earth Sciences, E-ICES 8. Mar del Plata, 30 de Oct. - 2 de Nov., 2012.
- Gautam P. *et al.* (2004) "Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area": *Nepal. Phys. Chem. Earth*, 29, pp. 973-984.
- Geiss, C. E., Zanner, C. W., Banerjee, S. K. (2004) "Signature of magnetic enhancement in a loessic soil in Nebraska": *Earth Planet Science Letters*, 228, pp. 355-367.
- Geiss, C. E., Zanner, C. W. (2006) "How abundant is pedogenic magnetite? Abundance and grain size estimated for loessic soils based on rock magnetic analyses": *Journal of Geophysical Research*, 111.
- (2007) "Sediment magnetic signature of climate in modern loessic soils from the Great Plains": *Quaternary International*, 162-163, pp. 97-110.
- Grimley, D. A., Follmer, L. R., Hughes, R. E. (2003) "Modern, Sangamon and Yarmouth soil development in loess of unglaciated southwestern Illinois": *Quaternary Science Reviews*, 22, pp. 225-244.
- Goldberg, P., Macphail, R. I. (2006) *Practical and Theoretical Geoarchaeology*, Blackwell Scientific, Oxford.
- Goluchowska, B. J. (2001) "Some factors affecting an increase in magnetic susceptibility of cement dusts": *J. Appl. Geophys.*, 48, pp. 103-112.
- Gose, W. A. *et al.* (1994) "Paleomagnetic Studies of Prehistoric Burend-Rock Features": *Transactions of the American Geophysical Union*, 75.
- Han, J., Lu, H., Wu, N. (1996) "Magnetic susceptibility of modern soils in China and its use for paleoclimate reconstruction": *Studia et Geophysica et Geodaetica*, 40, pp. 262-275.
- Hanesch, M., Scholger, R. (2002) "Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements": *Environ. Geol.*, 42, pp. 857-870.
- Heller, F., Strzyszczyk, Z., Magiera, T. (1998) "Magnetic record of industrial pollution in soils of Upper Silesia, Poland": *J. Geophys. Res.*, 103 (B8), pp. 17767-17774.

- Heller, F. *et al.* (1993) "Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess and paleoclimatic implications": *Earth Planetary Science Letters*, 114, pp. 385-390.
- Hoffmann, V., Knab, M., Appel, E. (1999) „Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution": *J. Geochem. Int.*, 66 (1-2), pp. 313-326.
- Horng, C-S. *et al.* (2009) "Air pollution history elucidated from anthropogenic spherules and their magnetic signatures in marine sediments offshore of Southwestern Taiwan": *Journal of Marine Systems*, 76, pp. 468-478.
- Hullet Jr., L. D. *et al.* (1980) "Chemical species in fly ash from coal-burning power plants": *Science*, 210, pp. 1356-1358.
- Hunt, A., Jones, J., Oldfield, F. (1984) "Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin": *Sci. Total Environ.*, 33, pp. 129-139.
- Jong, E., Nestor, P. A., Pennock, D. J. (1998) "The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution": *Catena*, 32, pp. 23-35.
- Jordanova, D. *et al.* (2013) "Industrial contamination of alluvial soils near Fe–Pb mining site revealed by magnetic and geochemical studies": *Geoderma*, 192, pp. 237-248.
- Jordanova, D. *et al.* (2011) "Soil tillage erosion estimated by using magnetism of soils—a case study from Bulgaria": *Environmental monitoring and assessment*, 183, (1-4), pp. 381-394.
- Kapicka, A. *et al.* (2001) "Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes": *J. Appl. Geophys.*, 48, pp. 93-102.
- Kasper, M. *et al.* (1999) „The influence of fuel additives on the formation of carbon during combustion": *J. Aerosol Sci.*, 30, pp. 217-225.
- Kim, W. *et al.* (2007) "Two-year magnetic monitoring in conjunction with geochemical and electron microscopic data of roadside dust in Seoul, Korea": *Atmos. Environ.*, 41, pp. 7627-7641.
- Knox, E. G. (2006) "Roads, railways and childhood cancers": *J. Epidemiol. Community Health*, 60, pp. 136-141.
- Knutsen, S. *et al.* (2004) "The association between ambient particulate air pollution levels and risk of cardiopulmonary and all-cause mortality during 22 years follow-up of a non-smoking cohort. Results from the AHSMOG study": *Epidemiology*, 15, S45.
- King, J. *et al.* (1982) "A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments": *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59, pp. 404-419.

- Kukier, U. *et al.* (2003) "Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions": *Environ. Pollut.*, 123, pp. 255-266.
- Kukla, G. *et al.* (1988) "Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility": *Geology* 16, pp. 811-814
- Lageras, P., Sandgren, P. (1994) "The Use of Mineral Magnetic Analyses in Identifying Middle and Late Holocene Agriculture, A Study of Peat Profiles in *Småland*, Southern Sweden": *Journal of Archaeological Science*, 21, pp. 687-697.
- Landgraf, C. E., Royall, D. (2006) "Spatial patterns of surface soil magnetism and soil redistribution across a fallow field, Northern Alabama": *Southeastern Geographer*, 46 (1), pp. 1-22.
- Liu, X. *et al.* (1995) "Quantitative estimates of paleoprecipitation at Xinfeng, in the Loess Plateau of China": *Paleogeogr Paleoclimatol Paleocol*, 113, pp. 243-248.
- Liu, G. *et al.* (2013) "Concentrations, profiles, and emission factors of unintentionally produced persistent organic pollutants in fly ash from coking processes": *J. Hazard. Mater.*, 261, pp. 421-426.
- Lovley, D. R. *et al.* (1987) "Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron reducing microorganism": *Nature*, 330, pp. 252-254.
- Lu, S. G. *et al.* (2005) "Magnetic properties and heavy metal contents of automobile emission particulates": *J. Zhejiang Univ. Sci.*, 6B (8), pp. 731-735.
- MacBride, J. (1994) *Environmental Chemistry of Soils*, Oxford University Press, Oxford.
- Macphail, R. I., Crowther, J. (2004) *White Horse Stone: Soil Micromorphology, Phosphate and Magnetic Susceptibility*. Oxford Archaeology, Oxford.
- Maher, B. A. (1986) "Characterisation of Soils By Mineral Magnetic Measurements": *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, pp. 76-92.
- Maher, B. A. (1988) "Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites": *Geophysical Journal*, 94, pp. 83-96.
- Maher, B. A., Taylor, R. M. (1988) "Formation of Ultrafine-Grained Magnetite in Soils": *Nature*, 336, pp. 368-371.
- Maher, B. (1998b) "Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications": *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 137, pp. 25-54.
- Maher, B. A., Thompson, R. (1999) *Quaternary Climate, Environments and Magnetism*, Cambridge University Press, Cambridge.



- Maher, B. A., Thompson, R., Zhou, L. P. (1994) "Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian paleomonsoon: a new mineral magnetic approach": *Earth Planetary Sci Lett*, 125, pp. 461-471.
- Maher, B. A., Alekseev, A., Alekseeva, T. (2003) "Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation": *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 201, pp. 321-341.
- Maher, B. A., Moore, C., Matzka, J. (2008) "Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves": *Atm. Environ.*, 42, pp. 364-373.
- Magiera, T. *et al.* (2006) "Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe": *Geoderma*, 130, pp. 299-311.
- Marié, D. C. (2010) *Estudio de la contaminación en rutas y autopistas en Buenos Aires (Argentina) debida al tránsito vehicular mediante el uso de parámetros magnéticos*, tesis de licenciatura en Física, Universidad Nacional de Mar del Plata: Facultad de Ciencias Físicas y Naturales.
- Marié D. C. *et al.* (2010) "Vehicle-derived emissions and pollution on the road Autovía 2 investigated by rock-magnetic parameters: a case of study from Argentina": *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54, pp. 135-152.
- Marié, D. C. (2017) *Estudios de Magnetismo Ambiental y Contaminación Vehicular e Industrial*, tesis doctoral, UNCPBA: Facultad de Ciencias Exactas, Argentina.
- Marmet, E. *et al.* (1999) "Relationships between Human Activity and the Magnetic Properties of Soils: A Case Study in the Medieval Site of Roissy-en-France": *Archaeological Prospection*, 6, pp. 161-170.
- Martin, W. A., Bruseth, J. E., Huggins, R. J. (1991) "Assessing Feature Function and Spatial Patterning of Artifacts with Geophysical Remote-Sensing Data": *American Antiquity*, 56, pp. 701-720.
- Matzka, J., Maher, B. A. (1999) "Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle derived particulates": *Atmos. Environ.*, 33, pp. 4565-4569.
- Morello, F. *et al.* (1998) "Excavación en el sitio Marazzi 2. Sector 2-Terraza superior (Río Torcido, Bahía Inútil). 1<sup>er</sup> avance": *Anales del Instituto de la Patagonia*, 26, pp. 119-126.
- Moskowitz, B. M. *et al.* (1987) "A Magnetic Study of Etruscan Bucchero Pottery: An Application of Rock Magnetism to Archaeometry": *Geoarchaeology*, 2, pp. 285-300.

- Mullins, C. E. (1974) "The Magnetic Properties of the Soil and Their Application to Archaeological Prospecting": *Archaeo-Physika*, 5, pp. 143-347.
- Nami, H. G. (1995) "Holocene Geomagnetic excursion at Mylodon Cave, Ultima Esperanza, Chile": *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 47, pp. 1325-1332.
- Oldfield, F., Thompson, R., Dickson, D. P. (1981) "Artificial Enhancement of Stream Bedload: A Hydrological Application of Superparamagnetism": *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 26, pp. 107-124.
- Oldfield, F., Dearing, J. A., Battarbee, R. W. (1983) "New Approaches to Recent Environmental Change": *Geophysical Journal*, 149, pp. 167-181.
- Oldfield, F. *et al.* (1985) "The Role of Mineral Magnetic Measurements in Archaeology": Fieller, N. R. J., Gilbertson, D. D., Ralph, N. G. A. (Eds.) *Palaeoenvironmental Investigations: Research Design, Methods and Data Analysis*, British Archaeological Reports International Series 258, Oxford, pp. 29-43.
- Ollendorf, A. L. (1993) *Changing Landscapes in the American Bottom (USA): An Interdisciplinary Investigation with an Emphasis on the Late-Prehistoric and Early-Historic Periods*, tesis doctoral, University of Minnesota, Minneapolis.
- Orgeira, M. J., Compagnucci, R. (2006) "Correlation between paleosol-soil magnetic signal and climate": *Earth, Planets and Space*, Special Issue "Paleomagnetism and Tectonics in Latinamerica" 58 (10), pp. 1373-1380.
- (2010) "Uso de la señal magnética de suelos y paleosuelos como función climática": *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65 (4), pp. 612-623.
- Orgeira, M. J., Egli, R., Compagnucci, R. (2011) "A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils. Chapter in Earth Magnetic Interior (IAGA special Sopron book series)": *Springer*, 25, pp. 361-368.
- Orgeira, M. J. *et al.* (2000) "Magnetismo ambiental en sedimentos holocenos tardíos de bahía San Sebastián (Tierra del Fuego): impacto climático y/o ¿señal antrópica?": *Revista Cuaternario y Ciencias Ambientales*, 4, pp. 71-79.
- Orgeira, M. J. *et al.* (2008) "Environmental magnetism in present soils, Buenos Aires province, Argentina": *Journal of South American Earth Science*, 26, pp. 217-224.
- Ozán, I. L., Orgeira, M. J. (2015) "Propiedades magnéticas y micromorfología de suelos en el sitio arqueológico Marazzi 2, Isla Grande de Tierra del Fuego, Chile": *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 72 (2), pp. 251-264.

- Ozán, I. L. *et al.* (2017) “Magnetic Alteration of Soils by Late Holocene Hunter–Gatherer Groups (Tierra Del Fuego, South America)” *Archaeometry*.
- Palmgren, F. *et al.* (2003) “Characterisation of particle emissions from the driving car fleet and the contribution to ambient and indoor particle concentrations”: *Phys. Chem. Earth*, 28, pp. 327-334.
- Peters, C., Dekkers, M. (2003) “Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size”: *Phys. Chem. Earth*, 28, pp. 659-667.
- Petrovský, E., Ellwood, B. (1999) “Magnetic monitoring of air, land and water pollution”: Maher, B. A., Thompson, R. (Eds.) *Quaternary Climates, Environment and Magnetism*, Cambridge University Press, pp. 279-322.
- Petrovský, E., Ellwood, B. (1999) Maher, B. A., Thompson, R. (Eds.) *Quaternary Climates, Environment and Magnetism*. Cambridge University Press, pp. 279-322.
- Petrovský, E. *et al.* (2000) “Low field susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems”: *Environ. Geol.*, 39 (3-4), pp. 312-318.
- Pope, C. A. *et al.* (2002) “Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution”: *J. Am. Med. Assoc.*, 287, pp. 1132-1141.
- Quijano, L. *et al.* (2011a) “Magnetic susceptibility in topsoils and bulk cores of cultivated Calcisols”: *Latinmag Letters*, Vol. 1 (2), D09, pp. 1-6.
- Quijano, L. *et al.* (2011b) “Soil magnetic susceptibility and surface topographic characteristics in cultivated soils”: *Latinmag Letters*, Vol. 1 (2), D10, pp. 1-6.
- Quijano, L. *et al.* (2014) “Relevant magnetic and soil parameters as potential indicators of the soil conservation status in Mediterranean agroecosystems”: *Geophysical Journal International*, 198, pp. 1805-1817.
- Rachwal, M., Magiera, T., Wawer, M. (2015) “Coke industry and steel metallurgy as the source of soil contamination by technogenic magnetic particles, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons”: *Chemosphere*, [<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.077>].
- Raga, G. *et al.* (2001) “Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960–2000)”: *Atmospheric Environment*, 35, pp. 4041–4058.
- Rosendahl, D. *et al.* (2014) “Integrating geoarchaeology and magnetic susceptibility at three shell mounds: a pilot study from Mornington Island, Gulf of Carpentaria, Australia”: *Journal of Archaeological Science*, 49, pp. 21-32.

- Rouzaut, S. *et al.* (2012) “Estudio de magnetismo de rocas en una serie de suelo con vegetación autóctona y cultivados en el centro de la provincia de Córdoba, Argentina”: *Geoacta* 37 (2), pp. 62-72.
- Royall, D. (2001) “Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain”: *Catena*, 46, pp. 15-34.
- (2004) “Particle-size and analytical considerations in the mineral–magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes”: *Catena*, 57, pp. 189–207.
- (2007) “A comparison of mineral-magnetic and distributed RUSLE modeling in the assessment of soil loss on a southeastern U.S. cropland”: *Catena*, 69, pp. 170-180.
- Sapkota, B., Cioppa, M., Gagnon, J. (2011) “Investigation of the changes in magnetic properties and chemicals properties of soil Turing plant growth in a controlled environment”: *Environmental Earth Science*.
- Shahin, A. M., Hermann, R. P., Grandjean, F. (2004) “Magnetic susceptibility applied as an age–depth–climate relative dating technique using sediments from Scladina Cave, a Late Pleistocene cave site in Belgium”: *Journal of Archaeological Science*, 31, pp. 283-293.
- Schibler, L. *et al.* (2002) “Topsoil magnetic susceptibility mapping: data reproducibility and compatibility, measurement strategy”: *Stud. Geophys. Geod.*, 46, pp. 43-57.
- Schmidbauer, E., Mosheim, E., Semioschkina, N. (1986) “Magnetization and <sup>57</sup>Fe Mossbauer Study of Obsidians”: *Physics and Chemistry of Minerals*, 13, pp. 256-261.
- Sinito, A. *et al.* (2001) “Observaciones paleomagnéticas en el sitio arqueológico Puesto segundo (Misiones, Argentina)”: *Anales AFA*, 13, pp. 237-241.
- Spiteri, C. *et al.* (2005) “Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils”: *Environ. Geol.*, 49, pp. 1-9.
- Stern, C. (2007) “Holocene tephrochronology record of large explosive eruptions in the southernmost Patagonian Andes”: *Bulletin of Volcanology*, 70 (4), pp. 435-454.
- Strzyszcz, Z., Magiera, T., Heller, F. (1996) “The influence of industrial immisions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia”: *Stud. Geoph. Geod.*, 40, pp. 276-286.

- Stumm, W. (1992) *Chemistry of the solid-water interface. Processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems*, John Wiley and Sons, New York.
- Takac, P. R., Collins, M. B., Gose, W. A. (1993) *The Archaeomagnetic Investigation of Burned Limestone Rocks: An Interpretive Technique*, 58th Annual Meeting, Society for American Archaeology, Minneapolis.
- Tamaura, Y., Ito, K., Katsura, T. (1983) "Transformation of  $\gamma$ -FeO(OH) to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> by adsorption of iron(II) ion on  $\gamma$ -FeO(OH)": *J. Chem. Soc. Dalton Trans*, 2, pp. 189-194.
- Tarling, D. H. (1983) "The Possible Utilisation of the Magnetization of Archaeological Metallic Artifacts": *Journal of Archaeological Science*, 10, pp. 41-42.
- Taylor, R. M., Maher, B. A., Self, P.G. (1987) "Magnetite in soils: I. The synthesis of single-domain and superparamagnetic magnetite": *Clay Minerals*, 22, pp. 411-422.
- Thompson, R., Oldfield, F. (1986) *Environmental Magnetism*, Allen and Unwin, London.
- Tite, M. S., Mullins, C. (1971) "Enhancement of the Magnetic Susceptibility of Soils on Archaeological Sites": *Archaeometry*, 13, pp. 209-219.
- Torrent, J. *et al.* (2007) "Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess-paleosol sequence, Chinese Loess Plateau": *Soil Science Society of America Journal*, 71 (5), pp. 1570-1578.
- Tronc, E. *et al.* (1992) "Transformation of ferric hydroxide into spinel by iron (II) adsorption": *Langmuir*, 8 (1), pp. 313-319.
- Tsatskin, A., Gendler, T., Heller, F. (2006) "Identification of multiphase paleosols in eolian sequences by micromorphology, enviromagnetism and Mössbauer spectroscopy": *Geophysical Research Abstracts*, 8: 05025.
- Tsatskin, A., Nadel, D. (2003) "Formation Processes at the Ohalo II Submerged Prehistoric Campsite, Israel, Inferred from Soil Micromorphology and Magnetic Susceptibility Studies": *Geoarchaeology: An International Journal*, 18 (4), pp. 409-432.
- Vassilev, S. V. (1992) "Phase mineralogy studies of solid waste products from coal burning at some Bulgarian thermoelectric power plants": *Fuel*, 71, pp. 625-633.
- (2004) "Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 3. Characterization of magnetic and char concentrates": *Fuel*, 83, pp. 1563-1583.

- Wang, X., Qin, Y. (2006) "Magnetic properties of urban topsoils and correlation with heavy metals: a case study from the city of Xuzhou, China": *Environ Geol.*, 49, pp. 897-904.
- Zawadzki, J., Magiera, T., Fabijanczyk, P. (2009) "Geostatistical evaluation of magnetic indicators of forest soil contamination with heavy metals": *Stud. Geophys. Geod.*, 53, pp. 133-149.
- Zawadzki, J. *et al.* (2012) "Geostatistical 3-dimensional integration of measurements of soil magnetic susceptibility": *Environ. Monit. Assess.*, 184, pp. 3267-3278.
- Zhang, C. *et al.* (2006) "Magnetic properties of highroad-side pine tree leaves in Beijing and their environmental significance": *Chinese Sci. Bull.*, 51, pp. 3041-3052.
- Zhang, C. *et al.* (2012) "Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods": *Journal of Geochemical Exploration*, 119-120, pp. 60-75.
- Zhu, Z. *et al.* (2013) "Identification of trace metal pollution in urban dust from kindergartens using magnetic, geochemical and lead isotopic analyses": *Atmospheric Environment* 77, pp. 9-15.