

Proveniência de materiais nos sistemas a partir das suas propriedades magnéticas: potencialidades e alguns casos de estudo

Celeste R. Gomes¹, Ana Lourenço², Helena Sant'Ovaia³ e Armando Rocha⁴

Resumo: Os métodos do magnetismo ambiental consistem em estudar os materiais através das suas propriedades magnéticas e são usados, em especial, desde a década de 80 do séc. XX. Neste texto, os objetivos são apresentar: os métodos magnéticos; os métodos de amostragem e de preparação das amostras; os métodos de obtenção dos dados; os equipamentos e laboratórios de magnetismo; os métodos de representação e interpretação dos dados; e o tipo de problemas de investigação aos quais é possível responder. São apresentados também alguns casos de estudo. Como conclusões, salientamos que estes métodos são poderosos na resolução de problemas de ambientes atuais e em paleoambientes, em especial, em estudos de poluição por partículas, em contaminação e evolução de solos e sedimentos, em estudos de proveniências de materiais, e em estudos forenses. Os parâmetros magnéticos, avaliados em vários tipos de materiais, permitem estimar a contribuição de materiais ferromagnéticos s.l. detriticos naturais, de origem antrópica e biológica e ainda determinar a origem dos materiais, a granulometria e o tipo de estrutura. Por exemplo, em estudos de poluição urbana, é possível construir a cartografia de poluição, conhecer a origem dos materiais e relacionar os parâmetros magnéticos com a composição química. Em estudos de solos, é possível traçar modelos de evolução e de contaminação.

Palavras-chave: Magnetismo ambiental, Parâmetros magnéticos, Proveniência de materiais, Sistemas terrestres

Abstract: Environmental magnetic methods have been particularly used since the 1980s. In this paper the goals are to present: magnetic methods; sampling and sample preparation methods; data collection methods; data representation methods and the type of research problems that magnetic methods allow us to resolve. As conclusions, we note that magnetic methods are powerful in solving problems of current environments and paleoenvironments, especially in studies of pollution by particles, in studies of evolution and pollution of soils and sediments and in studies of materials sources, such as in forensic studies. The magnetic parameters evaluated in various types of materials allow us to find the contribution of detrital ferrimagnetic materials, biological and anthropogenic in origin. The magnetic parameters determine the origin (the signature) of the materials, the size and the type of structure. For example, in studies of urban pollution, it is possible to construct the mapping of pollution, and know the origin of materials and magnetic parameters relating to the chemical composition. In soil studies, it is possible to sketch evolution models and contamination.

Keywords: Environmental magnetism, Magnetic parameters, Origin of materials, Terrestrial systems

¹CGUC, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. E-mail: romualdo@dct.uc.pt

²CGUC, Universidade de Coimbra. E-mail: ana.lourenco@dct.uc.pt

³CGUP, DGAOT, Universidade do Porto. E-mail: hsantov@fc.up.pt

⁴CGUC, Agrupamento de Escolas Coimbra Sul. E-mail: armandoferreirarochoa@gmail.com

1. Introdução

Os métodos do magnetismo ambiental são usados, em especial, desde a década de 80 do séc XX (Thompson e Oldfield, 1986), embora o primeiro estudo de magnetismo de ambiental referido seja de Ising (1926), usando amostras de varvas (*in* Maher e Thompson 1999).

Desde o seu advento, têm sido desenvolvidos inúmeros estudos de magnetismo ambiental com aplicações muito diversificadas: poluição por partículas com origem nas atividades urbanas e na contribuição industrial (p. ex. Hanesch *et al.* 2003, Moreno *et al.* 2003, Gomes *et al.* 2006, Gomes 2008, Gomes *et al.* 2008, Sant’Ovaia *et al.* 2012); estudos de contaminação e evolução de solos (Lourenço *et al.* 2012, Lourenço *et al.* 2014); estudos de poluição e evolução de sedimentos (Chan *et al.* 2001, Rey *et al.* 2008) e ainda estudos de correlação de parâmetros magnéticos, tipo de solo, contaminação e a quantidade de nematodes em solos de batatais (Lourenço *et al.*, submetido).

Os parâmetros magnéticos, avaliados em rochas calcárias e margosas permitem encontrar contribuição de materiais ferrimagnéticos detríticos, antrópicos e, muito possivelmente, biológicos (Da Silva *et al.* 2014).

Estudos forenses são outro exemplo de aplicação dos parâmetros magnéticos dos materiais. Estes estudos permitem comparar os parâmetros das amostras e concluir sobre a origem dos materiais (Manrong *et al.* 2009).

2. Propriedades magnéticas dos materiais

A troca de materiais acontece em processos contínuos nos subsistemas terrestres. Os materiais podem ter origem natural, antrópica e extraterrestre. Todos os materiais são magnéticos, ou seja, todos os materiais respondem de uma forma característica, que se justifica pela sua composição química e/ou pela sua estrutura, quando submetido a um campo magnético (Figura 1). Da mesma forma, todos os materiais apresentam uma suscetibilidade mag-

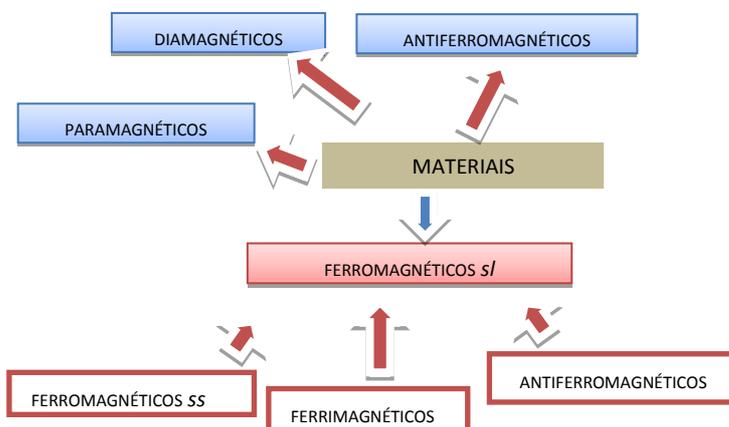


Figura 1. Tipos de materiais considerando as suas propriedades magnéticas.
Figure 1. Types of materials considering their magnetic properties.

nética (SM) característica (capacidade de se magnetizar, função do campo aplicado). Assim, os materiais diamagnéticos, como o quartzo, a calcite, a matéria orgânica, dizem-se diamagnéticos porque se magnetizam no sentido oposto ao do campo magnético aplicado e não guardam qualquer magnetização remanescente, após a remoção do campo. O valor da SM tem valor absoluto muito baixo e é negativo (p. ex. Thompson e Oldfield 1986, Butler 1992).

Os materiais paramagnéticos, como a biotite e a olivina, magnetizam-se no sentido do campo aplicado e não guardam qualquer magnetização remanescente, após a remoção do campo aplicado. O valor absoluto da SM apresenta valor absoluto muito baixo e é positivo (p. ex. Thompson e Oldfield 1986, Butler 1992).

Os materiais ferromagnéticos *s.l.* são detentores de uma magnetização remanescente e magnetizam-se no sentido do campo aplicado (Figura 2). Nestes incluem-se: 1) os materiais antiferromagnéticos imperfeitos, como a hematite; 2) materiais ferrimagnéticos, como a magnetite e 3) materiais ferromagnéticos *s.s.*, como o ferro e o gadolínio. Muitos materiais em circulação são detetados pelos métodos magnéticos.

Os objetivos deste texto são apresentar: os métodos magnéticos; os métodos de amostragem e de preparação das amostras; os métodos de obtenção e de representação dos dados; o tipo de problemas de investigação aos quais os métodos magnéticos permitem responder.

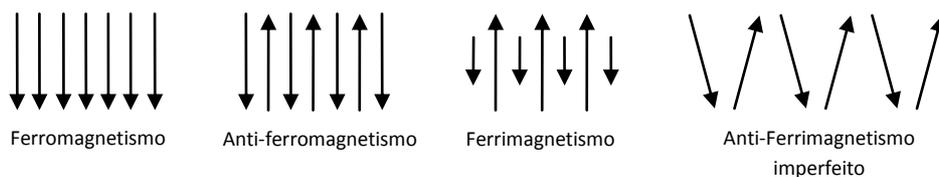


Figura 2. Tipos de estruturas, em função do tipo de acoplamento dos momentos magnéticos dos elétrons (adaptado de Thompson e Oldfield 1986).

Figure 2. Figure 2 - Magnetic structures, according to the type of coupling of the electrons' magnetic moments (after Thompson and Oldfield 1986).

3. Métodos e equipamentos

3.1. Os métodos magnéticos

Os métodos magnéticos consistem na determinação de parâmetros, como a SM (a baixa frequência e a alta frequência), a magnetização remanescente isotérmica (MRI) a vários campos, a desmagnetização por campos magnéticos alternos a várias intensidades, a magnetização remanescente anistérmica (MRA) a vários campos, desmagnetização térmica, determinação de curvas de variação da susceptibilidade com a temperatura e curvas de histerese. Os métodos mais comuns, em magnetismo ambiental, são a medição da SM (K), da MRA e da MRI.

A partir dos parâmetros medidos é possível calcular várias razões, como a variação da SM e a frequência do campo usado na medição e, ainda, obter curvas de magnetização e desmagnetização. Nas curvas de magnetização inversas é possível fazer a leitura do campo coercivo. Com as curvas de magnetização e desmagnetização pode ler-se o campo necessário para

desmagnetizar metade da magnetização remanescente. As razões consistem no cálculo da percentagem da fracção de alta coercividade e os valores S que permitem identificar a presença das estruturas ferrimagnéticas, como a magnetite. A magnetite satura com a aplicação de um campo de cerca de 0,3 T (Tesla) e o valor de $S_{0,3T}$ ($MRI_{0,3T}/MRI_{1T}$) é próximo da unidade. Nestes casos, é possível calcular o tamanho aproximado das partículas ferrimagnéticas através do cociente MRI_{1T}/K_r . No caso da presença de estruturas ferrimagnéticas, também é possível avaliar o tamanho das partículas a partir das curvas de desmagnetização das amostras, previamente magnetizadas a 1 T. As curvas podem ser comparadas com curvas teóricas obtidas para granulometria de substâncias sintéticas e cujo diâmetro é conhecido (Dunlop e Odzemir 1995, Gomes *et al.* 2008).

3.2. Equipamentos

De uma forma geral, os estudos traduzem que estes métodos são baratos, rápidos e não destrutivos (p. ex. Maher e Thompson 1999). Na verdade, os métodos são baratos quando comparados com outros porque as medições são efectuadas em equipamentos de paleomagnetismo existentes em laboratórios Paleomagnéticos. Porém, estes equipamentos são, por vezes, dispendiosos. Algumas das determinações, como a da SM, são relativamente rápidas; contudo, a determinação de uma curva de magnetização ou de desmagnetização é um processo que pode ser demorado. As amostras não são destruídas, se não forem aquecidas, e podem reconstituir-se se forem desagregadas.

Os equipamentos mais usados, em magnetismo ambiental (Figura 3), são a ponte de susceptibilidade, o magnetizador por campos pulsados e o magnetómetro. Outros equipamentos habitualmente existentes nos laboratórios de (Paleo)magnetismo dos materiais são os desmagnetizadores por campos magnéticos alternos, magnetizadores anisteréticos e desmagnetizadores térmicos; sistemas de determinação da SM, com a variação da temperatura, e equipamentos para determinação das curvas de histerese. Os equipamentos não são todos iguais, e os de medição podem apresentar resoluções muito diferentes. Para medir a SM e a magnetização remanescente natural de algumas amostras, é necessário usar uma ponte de susceptibilidade e um magnetómetro com resolução elevada. No caso deste último, deve usar-se um criogénico.

3.3. Métodos de amostragem e preparação das amostras

Os métodos de amostragem e a preparação de amostras dependem do tipo de estudo e dos materiais a serem estudados (p. ex. Gomes *et al.* 2006, Sant'Ovaia 2012, Lourenço *et al.* 2012, Lourenço *et al.* 2014). No caso do estudo das poeiras urbanas, podem amostrar-se utilizando: acumuladores biológicos como as folhas de plantas, os líquenes, os musgos e a casca das árvores; acumuladores improvisados como, por exemplo, tiras de esponja usada para calafetar portas e janelas; poeiras acumuladas em amostradores que as sugam e acumulam por granulometria. Podem igualmente colher-se amostras de poeiras acumuladas em superfícies previamente limpas. A amostragem de materiais biológicos tem a desvantagem de poder não ser fácil conhecer o tempo de acumulação das partículas. Como vantagens é um método menos dispendioso e que menos consome tempo, dado que basta uma deslocação a cada



1



2A



2B



3



4

Figura 3. Equipamentos: 1) Ponte de suscetibilidade Bartington; 2A) Magnetizador Molspin e 2B) Magnetizador anisterético Agico (2A e 2B); 3) Magnetómetro Minispin Molspin ; e 4) Desmagnetizador por campos alternos Molspin.

Figure 3. Equipment: 1) Bartington magnetic susceptibility meter Bartington; 2A) Magnetizer Molspin and 2B) Agico Anhyseretic magnetizer Agico; 3) Molspin Minispin Magnetometer Minispin Molspin); and 4) Molspin alternating field demagnetizer Molspin.

local de amostragem. No caso dos amostradores comerciais, estes são muito eficientes, mas não conseguimos usar vários ao mesmo tempo, o que originaria um método muito dispendioso.

No caso dos estudos de solos, as amostras podem ser da superfície ou retiradas em profundidade, em perfis. No caso das amostras de superfície, define-se um quadrado e retira-se uma subamostra, em cada canto do quadrado, e ao centro. Retira-se, sempre que possível, cerca de 1,5 kg de amostra, por sítio. No laboratório, as amostras são quarteadas e separadas

em frações granulométricas. A fração que se utiliza em magnetismo ambiental é, habitualmente, a fração inferior a 2 mm.

A amostragem e preparação das amostras dos sedimentos são semelhantes às utilizadas nos estudos dos solos. As amostras devem ser sempre devidamente localizadas e etiquetadas. No laboratório, é obrigatório o cuidado de não contaminar as amostras. O trabalho deve ser feito com máscara e luvas.

Em alguns casos é necessário secar as amostras numa estufa. Não devem ser utilizadas temperaturas superiores a 40 °C, sob pena de provocar alterações mineralógicas (p. ex. Lourenço 2012).

3.4. Métodos de representação dos dados

Os dados podem ser analisados, através de estatística descritiva ou inferencial. Podem ser representados em tabelas (Tabela 1) e gráficos (Figura 4), dependendo do objetivo e, ainda, em mapa (Figuras 5 e 6). Podem construir-se modelos utilizando ferramentas como o ArcGIS. Os dados representados nestes formatos podem ser comparados com dados de outros estudos (p. ex. Gomes 2008, Gomes *et al.* 2006, 2008, Sant’Ovaia *et al.* 2012, Lourenço *et al.* 2012, Chaparro *et al.* 2013, Lourenço *et al.* 2014).

Tabela 1. Representação de dados magnéticos em tabela (adaptado de Lourenço *et al.* 2012):

Valores de SM, cálculos por massa ($\chi \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), medidos a baixa frequência K_{lf} (10^{-5} SI), medidos a alta frequência K_{hf} (10^{-5} SI); MRI_{1T} (10^{-3} Am^{-1}); MRA (10^{-3} Am^{-1}); K_{MRA} (10^{-5} SI) HMRI (10^{-3} Am^{-1}).

Table 1. Magnetic data presented in a table (after Lourenço *et al.* 2012): MS values, calculations by weight ($\chi \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), measured at low frequency K_{lf} (10^{-5} SI) measured at high frequency K_{hf} (10^{-5} SI), IRM_{1T} (10^{-3} Am^{-1}), ARM (10^{-3} Am^{-1}), K_{ARM} (10^{-5} SI) HIRM (10^{-3} Am^{-1}).

	Intervalo/ interval	M	Mdn	P10	P25	P75	P95
χ ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	12,50-710,11	65,54	60,16	32,55	43,39	70,10	103,76
K_{lf} (10^{-5} SI)	6,00-325,00	31,70	26,00	12,30	19,00	33,25	61,40
K_{hf} (10^{-5} SI)	6,00-79,00	25,67	25,00	11,20	17,00	30,00	45,00
K_{fd} (10^{-5} SI)	0,00-91,96	6,82	6,90	0,00	3,33	8,70	12,45
MRI_{1T} (10^{-3} Am^{-1})	252,00-18174,00	1909,29	1480,90	721,08	1106,30	2112,93	3587,86
MRA (10^{-3} Am^{-1})	4,40-493,00	40,87	29,73	12,45	17,91	48,00	100,30
K_{MRA} (10^{-5} SI)	0,84-94,8	7,86	5,76	2,39	8,44	9,26	19,29
HMRI (10^{-3} Am^{-1})	-48,55-192,25	49,59	41,28	-11,45	16,40	62,36	163,26

M – média; Mdn - Mediana; P – Percentil. M - Average; Mdn - Median P - Percentile

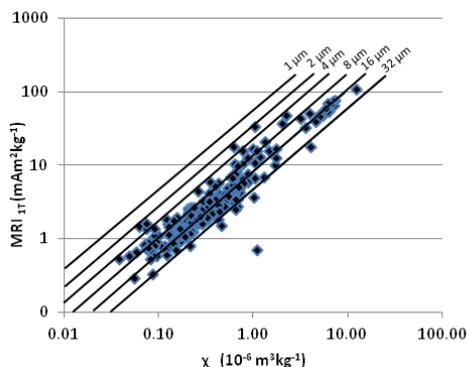


Figura 4. Representação, em gráfico, de dados de SM, calculados por massa (m^3kg^{-1}), e da MRI_{1T} , também calculados por massa ($\text{mAm}^2\text{kg}^{-1}$), (Lourenço 2012). O gráfico permite-nos obter dados de granulometria das partículas ferromagnéticas s.l.

Figure 4. Magnetic data presented in a scatter plot (Lourenço 2012). Representation in graphic data of MS, calculated by mass (m^3kg^{-1}), and IRM_{1T} , also calculated by mass ($\text{mAm}^2\text{kg}^{-1}$). The graph allows us to obtain data from particle size of ferromagnetic s.l particles.

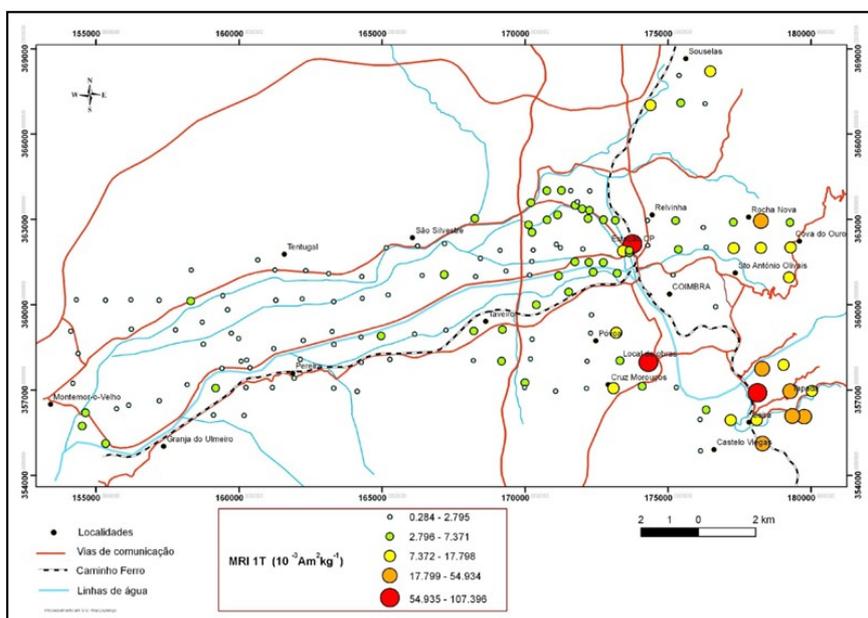


Figura 5. Representação de dados magnéticos em mapa (Lourenço 2012): variação espacial da MRI_{1T} , calculados por massa, na área entre Montemor-o-Velho e Coimbra. Os valores variam entre 0,28 e 107,40 E-03 $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$, traduzindo a quantidade de partículas ferromagnéticas s.l., o tipo de solo e os níveis de contaminação (Lourenço 2012). Os locais mais poluídos são próximo da estação de caminho-de-ferro, próximo de estradas e de obras e os locais menos poluídos são em campos, entre a área urbana de Coimbra e Montemor-o-Velho.

Figure 5. Magnetic data presented in a map (Lourenço 2012): spatial variation of MRI_{1T} , calculated by weight, in the area between Montemor-o-Velho and Coimbra. Values range from 0.28 to 107.40 E-03 $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$, reflecting the amount of s.l ferrimagnetic particles, the type of soil and contamination levels (Lourenço 2012). The most polluted sites are close to the railway station, roads and near building works and the least polluted places are in the countryside between the urban area of Coimbra and Montemor-o-Velho.

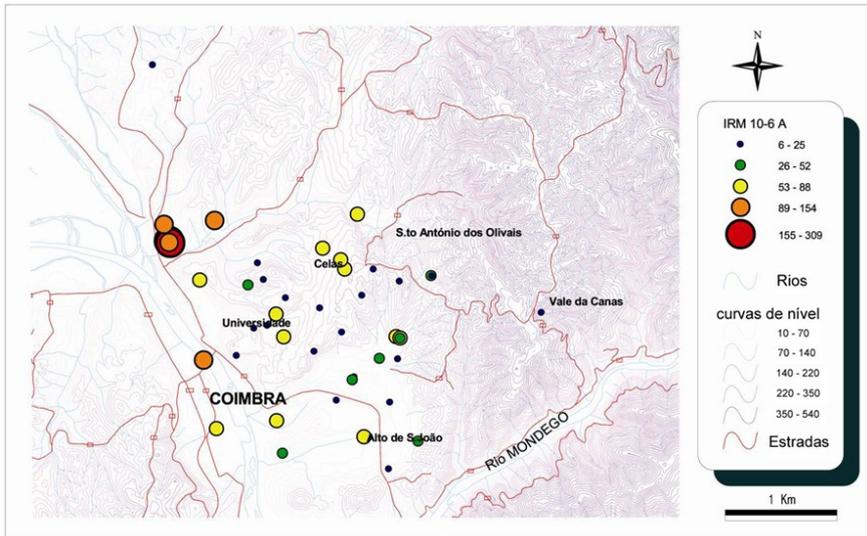


Figura 6. Variação espacial da MRI_{1T} , calculada por área das folhas de árvore medidas, na cidade de Coimbra. Os valores variam entre 6,00 e 309,00 E-06 A, traduzindo a quantidade de partículas ferromagnéticas s.l. e os níveis de poluição (Gomes *et al.* 2006). Os valores variam em função da quantidade de tráfego automóvel. O local mais poluído é próximo da estação de caminho-de-ferro e os locais menos poluídos são nos jardins e nalguns bairros com pouco trânsito.

Figure 6. Spatial variation of $IRM1 T$ calculated by area of the tree leaves measured, in the city of Coimbra. The values vary between 6.00 and 309.00 E-06 A, reflecting the amount of ferrimagnetic particles s.l and pollution levels (Gomes *et al.* 2006). Values vary depending on the amount of traffic. The most polluted site is close to the railway, the railway station and the least polluted places are in the gardens and in some quarters neighbourhoods with little traffic.

4. Problemas de investigação

Os métodos do magnetismo ambiental têm sido usados para resolver problemas de: 1) avaliação de níveis de poluição por poeiras, em especial, em áreas urbanas (p. ex. Gomes *et al.* 2006, 2008, Gomes 2008, Sant’Ovaia *et al.* 2012); 2) no estudo de amostras de solos para avaliar os níveis de poluição e a evolução dos solos (p. ex. Lourenço *et al.* 2012, Lourenço *et al.* 2014); em estudos que relacionam as propriedades magnéticas, o tipo de solo, a contaminação e a presença de seres vivos, como os nematodes (Lourenço *et al.*, submetido); em estudo de sedimentos para obter respostas relacionadas com processos de poluição ou com a sua evolução, com as variações ambientais, como a temperatura do planeta e a ciclicidade dos processos da formação dos sedimentos (Boulila *et al.* 2008, Rey *et al.* 2008, Da Silva 2013); determinações para resolver problemas forenses, onde ganha importância a proveniência dos materiais (Manrong *et al.* 2009); determinações em materiais biológicos (Sant’Ovaia *et al.*, em preparação).

4.1. Dados usados como indicadores

Para avaliar a presença de determinados elementos tóxicos seria ideal fazer análises químicas a um conjunto de amostras, o que tornaria o estudo muito dispendioso. Os dados magnéticos são muito mais baratos do que as análises químicas e, em cada caso e em cada modelo, verifica-se que existem correlações estatisticamente significativas entre os parâmetros magnéticos e a concentração de determinados elementos químicos tóxicos. Assim, conhecido o modelo é possível usar os parâmetros magnéticos como indicadores (p. ex. Gomes *et al.* 2006, 2008, Gomes 2008, Lourenço *et al.* 2012, Sant’Ovaia *et al.* 2012, Lourenço *et al.* 2014).

Contudo, quanto mais métodos se utilizarem mais fidedignas serão as determinações. Habitualmente usam-se também dados de geoquímica, de SEM e de microanálises, de mineralogia e de granulometria.

4.2. Proveniência dos materiais

As propriedades dos materiais permitem determinar a sua proveniência. Por exemplo, um estudo na China permitiu encontrar o criminoso, a partir das propriedades magnéticas dos componentes encontrados no pavimento de uma autoestrada (Manrong *et al.* 2009).

Os estudos de poluição por partículas urbanas permitem identificar as partículas com origem na queima dos combustíveis fósseis nos automóveis, nos componentes das carroçarias dos carros e dos comboios, com origem na queima de lenha nas lareiras e nos fogos florestais. Em especial, nas áreas urbanas, uma fonte de partículas importante são as obras de construção ou reconstrução (exemplo da reconstrução do Estádio de Coimbra (Gomes *et al.* 2006). Também é possível identificar os materiais provenientes das unidades industriais, embora estas atualmente, estejam equipadas com sistemas de filtros que impedem a dispersão de partículas.

5. Exemplos de estudos

No laboratório do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, foram desenvolvidos: estudos de poluição por partículas em cidades portuguesas (Gomes *et al.* 2006, Gomes *et al.* 2008, Sant’Ovaia *et al.* 2012); estudos de contaminação e de evolução de solos da área de Coimbra (Lourenço 2012, Lourenço *et al.* 2012, Gomes e Lourenço 2013, Lourenço *et al.* 2014); estudos de correlação com a presença de nematodes (Lourenço *et al.* submetido); estudos de paleoambientes (Gomes *et al.*, em preparação).

5.1. Estudos de poluição por partículas em cidades portuguesas

Estes estudos foram efetuados com amostras de poeiras acumuladas em amostras biológicas, como folhas e casca do tronco das árvores e líquenes (Gomes *et al.* 2006, Gomes *et al.* 2008, Sant’Ovaia *et al.* 2012). Os resultados permitiram concluir que: as partículas tinham origem, em especial, na atividade urbana, como as atividades na cidade com a contribuição do tráfego rodoviário; os locais mais poluídos são aqueles com relevo acentuado, os locais de paragem obrigatória e os coincidentes com os de tráfego intenso. O aquecimento no inverno com queima de lenha ou outros combustíveis também contribuem para a produção de poei-

ras. Outra fonte de produção de partículas são as obras de construção ou de reconstrução. Como exemplo, podemos referir as obras no Estádio Cidade de Coimbra que fizeram disparar os valores dos parâmetros magnéticos que revelam a quantidade de partículas, durante o tempo em que ocorreram as obras de reconstrução, como os valores da SM e da MRI_{1T}. Atualmente, os mapas mostram que os pontos mais contaminados são a área da casa do Sal (local com muito trânsito) e próximo da Estação de caminho-de-ferro (Figura 6).

Os dados de granulometria e de SEM mostram a existência de partículas com diâmetro inferior a 10 micra. Estes estudos são muito importantes porque permitem monitorizar a quantidade de partículas. Quanto menor for o tamanho das partículas mais estas afetam a saúde e a qualidade de vida dos cidadãos, em especial as crianças, os idosos e aqueles que sofrem de doenças respiratórias, como a asma (p. ex. Maher *et al.* 2008).

5.2. Estudos de poluição e de evolução de solos da área de Coimbra

Os estudos dos solos da área mostram que estão muito contaminados (Lourenço *et al.* 2012 e Lourenço *et al.* 2014) o que se justifica pela contaminação acumulada ao longo da história de Coimbra (Gomes e Lourenço 2013). Os materiais poluentes acumulados podem ter origem na Cimenteira de Souselas, sobretudo antes das preocupações ambientais; na laboração de outras indústrias, entretanto extintas; no tráfego rodoviário e ferroviário, nas obras de construção civil e na queima de resíduos nos Hospitais de Coimbra. De referir que após a lavagem das partículas acumuladas em várias superfícies, através da chuva, estas são transportadas nas águas e incorporadas nos solos, que são considerados um sumidouro e reservatório de materiais poluentes.

5.3. Estudos de correlação em amostras com a presença de nematodes

Os estudos de correlação de parâmetros magnéticos e a quantidade e tipo de nematodes de solos de batatais permitiram registar correlações estatisticamente significativas entre alguns parâmetros e a quantidade e tipo de nematodes. As amostras foram colhidas nas regiões do Porto, Aveiro, Coimbra, Guarda, Castelo Branco, Mafra, Caparica e Faro (Figura 7). Nas amostras dos solos destes batatais foram calculadas também correlações entre os parâmetros magnéticos e os níveis de poluição, no caso de um batatal próximo do Aeroporto Sá Carneiro, no Porto (Lourenço *et al.*, submetido). Também foram encontradas relações entre os parâmetros magnéticos e as litologias de rochas básicas que estão na base da formação dos solos na região da Guarda.

Os mapas da caracterização dos solos, por propriedades magnéticas, também podem ser utilizados para interpretações em estudos forenses.

5.4. Estudos de rochas calcárias e margosas do Jurássico inferior no perfil de Maria Pares

Os parâmetros magnéticos, avaliados em rochas calcárias e margosas de unidades do Jurássico inferior, do perfil de Maria Pares, permitem encontrar contribuição detrítica e muito possivelmente com origem biológica, como sendo os magnetossomas das bactérias magnetotáteis, dado que está provado que estas bactérias existem em todos os ambientes (Gomes *et al.*, em preparação).

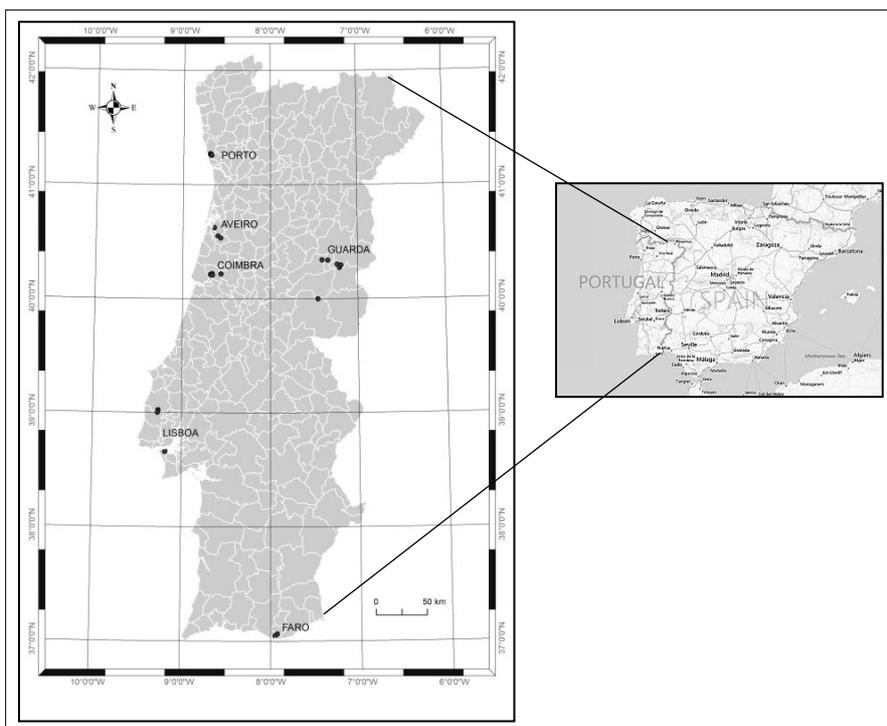


Figura 7. Localização das áreas de colheita de amostras em batatas (Lourenço et al., submetido).
Figure 7. Location of sampling areas in potato crops (Lourenço et al., submitted).

6. Conclusões

Os métodos do magnetismo ambiental são poderosos na resolução de problemas de ambientes atuais e em paleoambientes, em especial 1) em estudos de poluição por partículas, em ambientes urbanos; 2) em contaminação e evolução de solos e sedimentos; e 3) em estudos de proveniências de materiais.

As metodologias empregues no domínio do magnetismo ambiental são vantajosas em relação a outras metodologias mais tradicionais, em termos de consumo de tempo e custos económicos; podem ser aplicadas em diversos campos como a monitorização ambiental, pedologia, paleoclimatologia, limnologia, arqueologia e estratigrafia, entre outros. A sua aplicabilidade a estudos do domínio forense constitui uma das mais recentes linhas de investigação. Os métodos magnéticos podem ajudar na investigação criminal, auxiliando na detecção da proveniência de solos/sedimentos de uma forma relativamente simples, económica e não-destrutiva. As partículas em suspensão, na atmosfera, podem ser quantificadas e discriminadas através de medições magnéticas, após a sua deposição. Pode obter-se informação acerca das principais fontes de emissão e taxas de deposição, por exemplo, através de estudos efec-

tuados em perfis de solo. Em sedimentos lacustres é possível estabelecer, de modo expedito, correlações entre testemunhos de sondagens verticais através da variação em profundidade das propriedades magnéticas, podendo-se deste modo caracterizar, quantificar e identificar a origem do “fluxo” de sedimentos. A medição de vários parâmetros magnéticos pode ser complementada com análises químicas e de microscopia de varrimento electrónico, permitindo assim obter informação mais detalhada sobre a morfologia, a dimensão e a composição química das partículas. Estes dados são particularmente importantes para discriminar e identificar as fontes materiais em vários subsistemas (hidrosfera, atmosfera e litosfera).

Agradecimentos

À FCT, no âmbito do projecto PEst-OE/CTE/UI0611/2001 do Centro de Geofísica da Universidade de Coimbra. Ao Prof. Doutor Pedro Morgado Dinis, do Departamento de Ciências da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pelo convite para a redação deste texto e pelo incentivo. Ao revisor anónimo, pelas sugestões.

Referências

- Boulila S., Galbrun B., Hinnov L.A., Collin P.Y. 2008. High-resolution cyclostratigraphic analysis from magnetic susceptibility in a Lower Kimmeridgian (Upper Jurassic) marl-limestone succession (La Méouge, Vocontian Basin, France). *Sedimentary Geology* 203 (1-2): 54-53.
- Butler R.F. 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to geological Terranes*. Blackwell Scientific.
- Chan L.S., Ng S.L., Davis A.M., Yim W.W.S., Yeung C.H. 2001. Magnetic properties and heavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny’s Bay, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin* 7 (42): 569-583.
- Chaparro M.A.E., Lavornia J.M. Chaparro M.A.E., Sinito A.M. 2013. Biomonitors of urban air pollution: Magnetic studies and SEM observations of corticolous foliose and microfoliose lichens and their suitability for magnetic monitoring. *Environmental Pollution* 172: 61-69.
- Da Silva A.C., De Vleeschouwer D., Boulvain F., Claeys P., Fagel N., Humblet M., Mabilbe C., Michel J., Sardar Abadi M., Pas D., Dekkers M.J. 2013. Magnetic susceptibility as a high-resolution correlation tool and as a climatic proxy in Paleozoic rocks - Merits and pitfalls: Examples from the Devonian in Belgium. *Marine and Petroleum Geology* 46: 173-189.
- Dunlop D.J., Odzimir O. 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gomes C.R. 2008. Poluição por partículas na área urbana da Figueira da Foz. Comparação com os valores de Coimbra. In: Lopes, F.C, Callapez, P.M. (Eds.), *Por Terras da Figueira*. Kiwanis da Figueira da Foz Publishing: 91-97.
- Gomes C.R., Dinis A.M., Rocha A.F., Gomes E.M.C., Neves L.F. 2008. Magnetic Properties and Size of Microscopic Pollutant Particles in the Urban Area of Coimbra. *Microscopy & Microanalysis* 14, S3: 144-145.
- Gomes C.R., Lourenço A. 2013. História da contaminação na área de Coimbra. Colóquio História das Ciências para o Ensino, 20-21 de Junho, Universidade de Coimbra, Coimbra, <https://sites.google.com/site/celestesantosgomes1/a/home>.
- Gomes C.R., Rocha A.L.F., Neves L.F., Rey D.G. 2006. A influência do tráfego rodoviário na qualidade do ar em meios urbanos: Um estudo na cidade de Coimbra. *Actas 2º Cong. Luso-Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável*. Pluris, Braga, Portugal.
- Hanesch M., Scholger R., Rey D. 2003. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring parameters of tree leaves. *Atmospheric Environment* 37: 5125-5133.
- Lourenço A.M., Rocha F., Gomes C.R. 2012. Relationships between magnetic parameters, chemical composition

- and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal. *Natural Hazards Earth Systems Science* 12: 2545-2555.
- Lourenço A.M. 2012. Caracterização de solos entre Coimbra e Montemor-o-Velho. Um estudo de magnetismo ambiental. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Lourenço A.M., Esteves I., Rocha A., Abrantes I.M., Gomes C.R. (submetido). Magnetic characterisation of agricultural soils — a multidisciplinary study in the scope of environmental magnetism. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Lourenço A.M., Sequeira E., Sant’Ovaia H., Gomes C.R. 2014. Magnetic, geochemical and pedological characterisation of soil profiles from different environments and geological backgrounds near Coimbra, Portugal. *Geoderma* 213: 408-418.
- Maher B.A., Thompson R. 1999. *Quaternary Environments, Climates and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge.
- 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. *Atmospheric Environment* 42 (2): 364-373
- Manrong C., Yu L., Niu X., Chen B. 2009. Application of environmental magnetism on crime detection in a highway traffic accident from Yangzhou to Guazhou, Jiangsu Province, China. *Forensic Science International* 187: 29-33.
- Moreno E., Sagnotti L., Dinarès-Turell J., Winkler A., Cascella A. 2003. Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. *Atmospheric Environment* 37: 2967-77.
- Rey D., Rubio B., Mohamed K., Vilas F., Alonso B., Ercilla G., Rivas T. 2008. Detrital and early diagenetic processes in Late Pleistocene and Holocene sediments from the SW Galicia Bank inferred from high-resolution environ magnetic and geochemical records. *Marine Geology* 249 (1-2): 64-92.
- Sant’Ovaia H., Lacerda M.J., Gomes C. 2012. Particle pollution - An environmental magnetism study using bio-collectors located in northern Portugal. *Atmospheric Environment* 61: 340-349.
- Thompson R., Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. Allen e Unwin, London.