

UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
Departamento de Ciências da Terra

Ana Maria Ribeiro Malho Rodrigues Lourenço

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS ENTRE COIMBRA E  
MONTEMOR-O-VELHO, PORTUGAL CENTRAL  
UM ESTUDO DE MAGNETISMO AMBIENTAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências  
e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
para a obtenção do grau de Doutor em Geologia,  
especialidade em Geodinâmica Externa

**Orientadores científicos**

Prof.<sup>a</sup> Doutora Celeste dos Santos Romualdo Gomes, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia, Universidade de Coimbra  
Investigador Coordenador Doutor Eugénio Manuel Bilstein de Menezes de Sequeira,  
ex-Estação Agronómica Nacional, Oeiras.

**2012**

## **Agradecimentos**

À Professora Doutora Celeste dos Santos Romualdo Gomes, que orientou o presente trabalho, pelo incentivo e apoio constantes, pelas críticas construtivas, sugestões e conselhos. Pela amizade e respeito mútuo e, sobretudo também pela enorme coragem demonstrada, nunca deixando de me apoiar, mesmo atravessando uma fase muito complicada... Dificilmente poderei expressar a minha gratidão.

Ao Doutor Eugénio Manuel Bilstein Menezes de Sequeira que co-orientou este trabalho e que sempre me apoiou e incentivou de uma forma extraordinária. Pela sua sapiência e gosto em partilhar os seus conhecimentos. Também por me ter ensinado tudo o que sei sobre solos, e me ter sensibilizado para a sua importância como recurso a conhecer e proteger. O meu bem-haja!

Ao Professor Doutor Fernando Rocha pelos seus ensinamentos sobre argilas, por me ter permitido a realização das análises de DRX no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, bem como pela ajuda na interpretação dos difractogramas.

À Doutora Anabela Ramos que me apoiou em todas as fases deste trabalho, nomeadamente nos trabalhos de campo e de SIG, e me facultou diverso material de apoio. Pela sua amizade, companheirismo, boa disposição e capacidade de me “aturar” mesmo nos meus momentos de crise...

À Professora Doutora Helena Sant’Ovaia por me ter facultado o acesso ao Laboratório de Magnetismo da Universidade do Porto.

Aos funcionários do Departamento de Ciências da Terra,  
Sr. João Moura, D.<sup>a</sup> Conceição Caldeira e D.<sup>a</sup> Aurora Ferreira, pela ajuda prestada sempre que foi necessário.

À Escola Universitária Vasco da Gama, na qual leccionei a componente prática da disciplina de Pedologia, que me prestou apoio na execução dos perfis de solo e colheita de amostras. Agradeço também a colaboração dos meus alunos à época.

Agradeço também ao Centro de Geofísica e ao Departamento de Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra, no âmbito dos quais foi realizado este trabalho.

Acima de tudo agradeço ao meu marido e aos meus filhos, pelo apoio e compreensão,  
e à minha mãe, a quem dedico este trabalho.

## Resumo

Neste estudo apresenta-se uma aplicação das técnicas do magnetismo ambiental na caracterização dos solos entre Coimbra e Montemor-o-Velho (Portugal central). Foram feitas análises magnéticas, mineralógicas, químicas e de microscopia eletrónica de varrimento em amostras de solo a fim conhecer as suas características, encontrar possíveis relações e obter implicações ambientais. As amostras (213) foram colhidas em malha quadrada (1 km x 1 km e 500 m x 500 m) e em perfis de solo, numa área de  $\approx 400 \text{ km}^2$ . Foram medidos os seguintes parâmetros magnéticos: susceptibilidade magnética, magnetização remanescente natural e magnetização remanescente isotérmica. Os valores mais elevados para estes parâmetros foram observados na periferia dos centros urbanos, próximo das vias rodoviárias e linhas de água, o que sugere que a poluição urbana, particularmente a derivada do tráfego automóvel, é a principal responsável por estes valores. Os resultados das medições magnéticas também sugerem que o sinal magnético é principalmente controlado por uma fase ferrimagnética (magnetite/maghemite), com uma contribuição menor, em alguns casos, de uma fase antiferromagnética (hematite/goethite). As análises químicas revelaram que a concentração de vários elementos tóxicos (metais pesados) é superior aos valores médios de base para os solos portugueses; os teores dos metais pesados correlacionam-se positiva, e significativamente, com as propriedades magnéticas. As análises mineralógicas indicaram que o quartzo é o mineral mais abundante, seguindo-se os filossilicatos e os feldspatos; os minerais argilosos mais abundantes são os do grupo da illite e do grupo da caulinite e em menor proporção os minerais do grupo da clorite. A presença de interstratificados do tipo illite-smectite é comum em todas as amostras. A microscopia electrónica de varrimento revelou a presença de partículas magnéticas de morfologia esférica, típicas da queima de combustíveis fósseis, nas camadas superficiais do solo, pelo que se atribui à deposição atmosférica de partículas derivadas da poluição antrópica, a principal razão para o aumento superficial do sinal magnético. Nas camadas mais profundas do solo, o sinal magnético é controlado pelo material parental. A Análise de Componentes Principais suporta a relação entre parâmetros magnéticos e teores em metais pesados, bem como a hipótese de que o tráfego rodoviário é a principal fonte de poluição na área de estudo. A medição dos parâmetros magnéticos, conjugada com a informação relativa à composição química dos solos, permitiu obter informação sobre ao grau de contaminação/poluição da área de estudo, à superfície e em profundidade. Os resultados obtidos mostram o potencial das metodologias do magnetismo ambiental na caracterização dos solos e na avaliação da sua evolução.

## Abstract

This study presents an application of environmental magnetism techniques in the characterisation of soils near Coimbra (central Portugal). Magnetic, mineralogical, scanning electron microscopy and geochemical analyses were carried out on soil samples in order to find possible relationships and to obtain environmental implications. A total of 213 samples were taken over a square grid in an area ( $\approx 400 \text{ km}^2$ ) between the city of Coimbra and the village of Montemor-o-Velho, in central Portugal. Six soil profiles were also sampled and studied using classic pedological methods. The following magnetic parameters were measured: magnetic susceptibility, natural remanent magnetisation and saturation isothermal remanent magnetisation. Higher magnetic parameter values were observed near roads, rivers and urban area, therefore urban pollution and road traffic emissions seem to be to blame for these values. The magnetic susceptibility and remanent magnetisation results also suggest that the magnetic signal of these soils is mainly controlled by ferrimagnetic minerals (magnetite-like minerals) and only slightly by antiferromagnetic carriers (such as hematite minerals). Chemical analyses show that the concentration of various toxic elements was higher than the mean background values for Portuguese soils. Heavy metals showed a significant correlation with the magnetic properties. A semi-quantitative X-ray diffraction study was carried out on a representative set of subsamples, using peak areas. Illite, kaolinite, chlorite and irregular illite-smectite mixed-layers are the major clay minerals groups identified. Scanning electron microscope observations revealed that the atmospheric deposition of fly ashes is the main reason for the enhancement of the magnetic signal in the topsoil. In the underlying soil horizons the magnetic signal is mainly controlled by the bedrock. The Principal Component Analysis results supported not only the relationship between the magnetic parameters and the chemical results, but also the hypothesis that the road traffic is the main source of pollution in the study area. These results demonstrate the potential of environmental magnetism methods for fast preliminary site assessment, greatly reducing the scale of subsequent geochemical sampling and analyses.



## ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 Enquadramento e estado da arte	2
I.2 Interesse do trabalho	5
I.3 Objectivos	6
I.4 Estrutura do trabalho	6
CAPÍTULO II - ENQUADRAMENTO TEÓRICO	8
II.1 Campo magnético	9
II.1.1 Indução magnética e magnetização	9
II.2 Campo magnético terrestre	10
II.2.1 Origem e variações do campo geomagnético	11
II.3 Minerais Magnéticos	13
II.3.1 Óxidos de ferro	13
II.3.2 Outros minerais magnéticos	20
II.4 Estruturas magnéticas	20
II.5 Grandezas e unidades	27
II.5.1 Magnetização	27
II.5.1.1 Magnetização remanescente natural	27
II.5.1.2 Magnetização remanescente térmica	28
II.5.1.3 Magnetização remanescente química	28
II.5.1.4 Magnetização remanescente detrítica	29
I.5.2 Magnetizações impostas laboratorialmente	30
I.5.2.1 Magnetização remanescente isotérmica	30
I.5.2.2 Magnetização remanescente anisterética	30
II.5.3 Susceptibilidade magnética	30
II. 6 Equipamentos laboratoriais	33
II. 6.1 Susceptibilímetros	33
II. 6.2 Magnetizadores	33
II. 6.3 Magnetómetros	35

CAPÍTULO III - IMPORTÂNCIA DOS MINERAIS MAGNÉTICOS NO ESTUDO DE SOLOS E SUA RELAÇÃO COM ELEMENTOS TÓXICOS	36
III.1 Circulação dos minerais magnéticos na litosfera, atmosfera e hidrosfera	37
III.2 Importância dos óxidos de ferro magnéticos nos solos	38
III.3 Minerais magnéticos nos solos: contribuição litogénica versus contribuição antropogénica	40
III.3.1 Factores responsáveis pelo aumento das propriedades magnéticas dos solos	45
III.4 Elementos tóxicos nos solos: relação com minerais magnéticos	45
III.5 Parâmetros magnéticos e relações frequentemente utilizados em estudos de solos	51
CAPÍTULO IV - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	57
IV.1 Localização geográfica	58
IV.2 Enquadramento geológico e geomorfológico	59
IV.2.1 Geologia	59
IV.2.1.1 Cartografia geológica na área de estudo	60
IV.2.2 Geomorfologia	71
IV.3 Enquadramento climático	75
IV.4 Enquadramento pedológico	86
CAPÍTULO V - METODOLOGIAS	91
V.1 Trabalho de campo	92
V.1.1 Colheita das amostras	92
V.1.2 Obtenção de coordenadas	92
V.1.3 Execução e descrição morfológica dos perfis pedológicos	94
V.2 Trabalho laboratorial	100
V.2.1 Preparação das amostras para análise magnética	100
V.2.2 Preparação das amostras para análise química	102
V.3 Análises magnéticas	102
V.4 Análises químicas	104
V.5 Análises mineralógicas	105
V.6 Análises convencionais de solo	106
V.7 Análises SEM/EDS	107
V.8 Produção de cartografia, gráficos e tratamento estatístico dos dados	108
CAPÍTULO VI - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
VI.1 Análises magnéticas	111
VI.1.1 Susceptibilidade magnética	111

VI.1.2 Magnetização remanescente natural e isotérmica	119
VI.1.2.1 Relação entre a magnetização remanescente isotérmica e a susceptibilidade magnética	121
VI.1.2.2 Quocientes S e HMRI	123
VI.1.2.3 Quociente L	125
VI.2 Análises químicas	126
VI.2.1 Avaliação do grau de poluição do solo: Factores de Enriquecimento e Índice de Poluição	130
VI.2.2 Relação entre elementos químicos e parâmetros magnéticos	133
VI.3 Análise de Componentes Principais	139
VI.4 Análises SEM/EDS	142
VI.5 Análises mineralógicas	149
VI.6 Perfis de solo	152
VI. 6.1 Descrição morfológica dos perfis de solo	152
VI.6.2 Análises convencionais de solos: parâmetros pedológicos	164
VI. 6.3 Parâmetros magnéticos nos perfis de solo	166
VI. 6.3.1 Susceptibilidade magnética	166
VI.6.3.2 MRI, quocientes S e HMRI	175
VI.6.3.3 Relação magnetização remanescente isotérmica –susceptibilidade	176
VI.6.3.4 Relação entre parâmetros pedológicos e parâmetros magnéticos	177
VI. 6. 4 Variação em profundidade do teor em metais pesados	179
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES	186
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
ANEXO 1	209
ANEXO 2	211
ANEXO 3	212
ANEXO 4	216
ANEXO 5	218
ANEXO 6	219
ANEXO 7	221
ANEXO 8	224

**Capítulo I**  
**INTRODUÇÃO**

---

## I.1 ENQUADRAMENTO E ESTADO DA ARTE

O trabalho que ora se apresenta enquadra-se no âmbito do Magnetismo Ambiental. Nos últimos 30 anos tem-se assistido a um número crescente de estudos aplicados a problemas ambientais através da aplicação das técnicas do magnetismo das rochas, dando assim origem a um novo ramo de investigação comumente denominado “magnetismo ambiental” (Thompson *et al.*, 1980). As metodologias empregues nesta nova área de investigação são vantajosas em relação a outras metodologias mais tradicionais, em termos de consumo de tempo e custos económicos e 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 (Ribeiro *et al.*, 2011). Os métodos magnéticos podem ajudar na investigação criminal, auxiliando na detecção da proveniência de solos/sedimentos de uma forma simples, económica e não-destrutiva (Chen *et al.*, 2009).

Estudos recentes têm evidenciado as vantagens e as potencialidades dos métodos do magnetismo ambiental, como auxiliares preciosos na detecção e delimitação de áreas afectadas pela poluição de origem antrópica (*e.g.* Bityukova *et al.*, 1999; Blaha *et al.*, 2008; Boyko *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2008; Matýsek *et al.*, 2008). Por exemplo, a susceptibilidade magnética (que traduz a facilidade com que os materiais se magnetizam) é um dos parâmetros muito utilizados em estudos desta natureza, sendo definida como a razão entre a magnetização induzida e o campo magnético “indutor”. Este parâmetro permite estimar a concentração de minerais magnéticos em amostras de materiais como sedimentos e solos, nomeadamente, a concentração da magnetite/maghemite, dado que a susceptibilidade magnética destes minerais é cerca de 1000 vezes maior que a de outros óxidos de ferro (Mullins, 1977, cit. em de Jong, 1998). A sua aplicação no domínio de estudos ambientais baseia-se no pressuposto de que os processos (industriais e outros) que utilizam a queima de combustíveis fósseis libertam para a atmosfera partículas (cinzas volantes) contendo uma quantidade significativa de minerais ferromagnéticos *s.l.* (Flanders, 1994; Flanders, 1999). Estas partículas são transportadas pelas correntes atmosféricas, depositando-se e acumulando-se posteriormente na camada superficial dos solos (“topsoils”). Assim, sua concentração pode ser facilmente detectada através da medição da susceptibilidade magnética dos solos à superfície (*e.g.* Lecoanet *et al.*, 1999). O limite de detecção é extremamente baixo, na ordem de 1 ppb (Thompson *et al.*, 1980), o que é particularmente útil, por exemplo, em estudos forenses em que nem sempre é possível dispor de amostras com volume suficiente para submeter a outras técnicas analíticas (Chen *et al.*, 2009).

A medição da susceptibilidade magnética, pelas suas vantagens em relação a outros métodos permite, ainda, o estabelecimento de malhas de amostragem com alguma

densidade (e.g. Hanesch e Scholger, 2002; Schibler *et al.*, 2002; Boyko *et al.*, 2004) e consequente produção de cartografia de pormenor. Os mapas obtidos permitem identificar os locais mais poluídos e as principais fontes de poluição. A susceptibilidade magnética das camadas superficiais do solo tem sido frequentemente utilizada como indicador da contaminação/poluição dos solos por elementos tóxicos provenientes de diversas fontes, difusas e estacionárias (e.g. Hoffmann *et al.*, 1999). A ligação entre susceptibilidade magnética e teor em metais pesados foi encontrada em diversos contextos ambientais (e.g. Strzyszcz e Magiera, 1998; Ďurža, 1999; Knab *et al.*, 2001; Petrovský *et al.*, 2001; Shu *et al.*, 2001; Xie *et al.*, 2001; Lourenço, 2003; Gautam *et al.*, 2005a; Gautam *et al.*, 2005b; Lourenço *et al.*, 2011b; Lourenço *et al.*, 2012). A medição deste parâmetro, além ser simples e rápida (cerca de 1 minuto) e de não requerer uma preparação elaborada da amostra, não implica a sua destruição, ficando disponível para poder, eventualmente, ser submetida a outro tipo de análises complementares. Esta é uma das características mais vantajosas relacionadas com a utilização deste tipo de técnicas evitando, assim, a duplicação de amostras.

O estudo de amostras de solo através dos parâmetros magnéticos permite delimitar as áreas mais afectadas pela poluição, nomeadamente junto a vias de comunicação (e.g. Hoffmann *et al.*, 1999; Knab *et al.*, 2001) ou na periferia de unidades industriais como siderurgias (e.g. Ďurža, 1999), centrais térmicas (e.g. Kapička *et al.*, 1999) e cimenteiras (Goluchowska, 2001). Estas serão as áreas preferenciais para uma colheita mais selectiva de amostras a submeter a análises químicas, por exemplo, para quantificação do nível de contaminação por metais pesados (“heavy metals”). As eventuais medidas de protecção e remediação serão aplicadas mais racionalmente, restringindo-se às áreas em questão.

A concentração de minerais magnéticos de uma amostra pode ser estimada a partir da medição da susceptibilidade e da magnetização remanescente isotérmica a 1 tesla (MRI 1T). Para obter informação sobre o tipo e granulometria dos minerais presentes, estabelecem-se vários tipos de relações entre parâmetros magnéticos, facilmente determináveis, como seja a magnetização remanescente imposta por campos de diferentes intensidades ou a susceptibilidade magnética, obtida em campos de frequências diferentes.

O estudo das propriedades magnéticas tem sido utilizado, em diversos países, como estimativa da poluição antropogénica de solos (Dearing *et al.*, 1996; Scholger, 1998; Petrovský *et al.*, 2000; Lecoanet *et al.*, 2001b; Lourenço, 2003; Moreno *et al.*, 2003; Strzyszcz e Fredyn, 2005; Chaparro *et al.*, 2006; Kapička *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2008) e também na monitorização da poluição atmosférica (Thompson e Oldfield, 1986; Evans e Heller, 2003; Gomes *et al.*, 2003; Gomes *et al.*, 2006). A medição dos parâmetros magnéticos de solos, em perfis verticais, fornece dados complementares que permitem

---

estabelecer o limite entre “solo poluído” e “solo não poluído”, em profundidade (Blaha *et al.*, 2008). Além da medição em amostras de solos, diversos autores têm realizado estudos através da utilização de outro tipo de superfícies colectoras como folhas de espécies arbustivas (e.g. Gomes *et al.*, 2007) e arbóreas (e.g. McIntosh *et al.*, 2001; Gomes *et al.*, 2003; Hanesh *et al.*, 2003; Sant’Ovaia *et al.*, 2012) e líquenes (Gomes *et al.*, 2012a, Gomes *et al.*, 2012b). Estes biocolectores são indicadores eficientes da poluição atmosférica por partículas antropogénicas, nomeadamente partículas PM10 (< 10 µm).

Face aos resultados positivos, como acima referido, pensamos que os métodos magnéticos podem e devem ser considerados como uma primeira escolha e uma estratégia adequada no planeamento de campanhas de estudos de poluição (Blaha *et al.*, 2008). A par dos estudos com finalidades “ambientais”, alguns autores têm tido preocupações com a qualidade das medições, com a normalização dos procedimentos e técnicas envolvidas nas investigações e com compatibilidade dos instrumentos (e.g. Schibler *et al.*, 2002; D’Emilio *et al.*, 2007). A repetibilidade e reprodutibilidade das medições dos parâmetros magnéticos são também objecto de análise por diversos autores (e.g. Lecoanet *et al.*, 1999; Boyko *et al.*, 2004).

Em Portugal, são escassos os trabalhos realizados no âmbito do magnetismo ambiental, aplicados especificamente ao estudo de solos (Lourenço, 2003; Lourenço *et al.*, 2003; Lourenço *et al.*, 2004; Lourenço e Gomes, 2010; Lourenço *et al.*, 2010; Lourenço *et al.*, 2011a; Lourenço *et al.*, 2011b; Lourenço *et al.*, 2012).

Para quem se interesse pelo tema do magnetismo ambiental, recomenda-se a consulta dos trabalhos de Thompson *et al.* (1980), Thompson e Oldfield (1986), Dunlop e Özdemir (1997), Dunlop (1995), Verosub e Roberts (1995), Maher e Thompson (1999), Walden *et al.* (1999) e Evans e Heller (2003).

## I.2 INTERESSE DO TRABALHO

O interesse pelo tema em apreço resulta da conjugação de factores como a formação e experiência profissional da investigadora, bem como da necessidade de dar continuidade ao trabalho realizado em 2003 (Lourenço, 2003). Consubstanciam-se estes propósitos 1) pelo aumento da área objecto de estudo, 2) pela complementação dos dados obtidos com informação relativa à variação dos parâmetros magnéticos, em profundidade e relativamente ao tipo de solos, através da execução e descrição de perfis pedológicos, 3) pelo aumento do conjunto de elementos químicos analisados e 4) pela obtenção de dados relativos à composição e morfologia das partículas magnéticas. Os dados obtidos sobre a variação das propriedades magnéticas são objecto de análise na sua relação com o teor em elementos químicos, alguns potencialmente tóxicos. Sempre que possível, procedeu-se à identificação e localização das principais fontes de poluição responsáveis pelas anomalias magnéticas e geoquímicas observadas.

“Os solos são um recurso limitado, não renovável à escala humana, suporte directo de vida e de um conjunto de recursos territoriais centrais ao desenvolvimento sustentável, e suporte das actividades humanas em geral” (D.G.O.T.D.U., 2011). Como tal, constituem um recurso a proteger, face ao uso intensivo a que estão sujeitos e cujas consequências são a sua destruição e degradação, com a crescente betonização/impermeabilização em primeiro plano. Portugal apresenta uma grande diversidade pedológica, mas apenas uma pequena percentagem dos seus solos, menos de 5%, é considerada muito fértil. É, também, o país da Europa com mais área construída por habitante, com maior percentagem de solo impermeabilizado e, ainda, o país que menos tem acautelado os solos de qualidade (Sequeira, E., inf. oral). Para proteger bem é preciso conhecer melhor, revestindo-se da maior importância a obtenção de dados sobre os actuais níveis de contaminação/poluição, com vista a quantificar o aumento destes níveis e tomar as medidas de remediação necessárias. Pretende-se, assim, que os estudos efectuados no âmbito da tese em apreço constituam um contributo para o conhecimento dos solos da área seleccionada, de modo a que possam ser utilizados em futuros trabalhos de monitorização do grau de poluição/contaminação.



### **I.3 OBJECTIVOS**

Os objectivos do trabalho são:

1 - Caracterizar os solos da área seleccionada, entre Coimbra e Montemor-o-Velho, numa extensão de  $\approx 400 \text{ km}^2$ , quanto às suas propriedades magnéticas e pedológicas e composição mineralógica e geoquímica;

2 - Complementar o conjunto de estudos à superfície com informação relativa ao tipo de solos, em profundidade, através da descrição e análise de perfis pedológicos em locais seleccionados;

3 - Obter informação, através de Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM/EDS), sobre a proveniência das partículas responsáveis pelas propriedades magnéticas dos solos;

4 - Estabelecer, sempre que possível, o limite em profundidade entre “solo poluído” e “solo não poluído”;

5 - Fazer o estudo da variabilidade dos resultados, em função da localização espacial, e quantificar o grau de influência das principais fontes poluidoras;

6 - Comparar os parâmetros magnéticos com a concentração em elementos químicos tóxicos como por, exemplo, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn.

### **I.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está estruturado em:

**Capítulo I – INTRODUÇÃO**

**Capítulo II – ENQUADRAMENTO TEÓRICO**

**Capítulo III – IMPORTÂNCIA DOS MINERAIS MAGNÉTICOS NO ESTUDO DE SOLOS E SUA RELAÇÃO COM ELEMENTOS TÓXICOS**

**Capítulo IV - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

**Capítulo V - METODOLOGIAS**

**Capítulo VI – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO**

**Capítulo VII – CONCLUSÕES**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ANEXOS**

**Capítulo II**  
**ENQUADRAMENTO TEÓRICO**

## II.1 CAMPO MAGNÉTICO

Uma carga eléctrica animada de movimento gera um campo magnético. A nível atómico, este campo magnético resulta do movimento dos electrões em torno dos seus eixos, *momento dipolar de spin*, e ainda do movimento dos electrões em torno do núcleo do átomo, *momento dipolar orbital*. Na ausência de influências externas, os *spins* estão orientados de modo aleatório; quando colocados na presença de um campo externo tendem a orientar-se em função da configuração electrónica dos átomos, da estrutura atómica da substância da qual fazem parte e do campo actuante.

### II.1.1 Indução magnética e magnetização

Uma vez criado um campo magnético ( $H$ ) por uma carga eléctrica em movimento, num determinado espaço, qualquer material que esteja posicionado neste espaço reagirá à presença do campo. A resposta do material à presença do campo denomina-se indução magnética ( $B$ ) e, para ela, contribuem o campo magnético e a magnetização do material ( $M$ ) de acordo com a relação:

$$B = \mu_0 (H + M),$$

em que  $\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo, de valor igual a  $4\pi \times 10^{-7}$  ohm-segundo  $m^{-1}$  (ou  $Hm^{-1}$ , henry por metro).

Com excepção dos materiais ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos,  $M = 0$  e  $B$  e  $H$  são paralelos. Neste caso,  $B = \mu_0 H$ .

A indução magnética é expressa em tesla (T), no Sistema Internacional (SI), mas também é comum expressar-se esta grandeza em gauss (G), no sistema cgs. No entanto, alguns autores preferem utilizar a expressão “campo” em vez de “indução”, o que em termos práticos se faz utilizando a “indução do vácuo” ( $= \mu_0 H$ ) e o símbolo  $B_0$  a que se chama campo (Maher *et al.*, 1999). O campo  $B_0$  é medido em tesla e 1 T é equivalente a  $10^4$  oersted (Oe) As medições do campo também podem ser expressas em termos de  $H$ , cujas unidades são ampére por metro ( $Am^{-1}$ ).

De acordo com McElhinny e McFadden (2000), dado que  $H$  e  $B$  são paralelos, é indiferente utilizar um ou outro e, de um modo geral,  $B$  (indução magnética) é designado como o campo magnético  $B$ . É necessário ter em atenção a conversão de unidades do sistema cgs para o SI, bem como o facto de o cálculo de  $H$  envolver o factor  $4\pi$ . Naturalmente, quando se consideram campos magnéticos “dentro” dos materiais magnéticos ( $M \neq 0$ ) é importante distinguir  $M$  de  $H$ , dado não serem equivalentes, além de que podem não ser paralelos e, inclusivamente, podem ter sinais opostos.

## II.2 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

A direcção e intensidade do campo magnético terrestre podem facilmente determinar-se com o auxílio de uma agulha magnética. Esta alinhar-se-á paralelamente às linhas de força do campo (figura II.1) e, se a rodarmos cerca de  $90^\circ$  em relação à posição anterior, a força necessária para impedir que a agulha retorne a essa posição, dá-nos uma medida da intensidade do campo geomagnético (Thompson e Oldfield, 1986).

Para descrever o campo geomagnético são necessários três parâmetros: a intensidade ( $H$ ), a inclinação ( $I$ ) e a declinação ( $D$ ) (figura II.2). A inclinação é a medida do ângulo entre o vector  $H$  e a sua projecção no plano horizontal. A declinação é a medida do ângulo entre a componente horizontal e o norte geográfico (corresponde ao desvio da agulha da bússola em relação ao Norte geográfico).



Fig II.1 - Linhas de força do campo magnético terrestre. (<http://rbrebello.wordpress.com/2008/12/>).

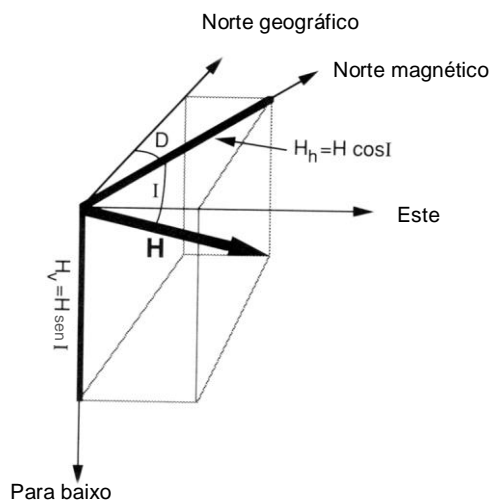


Fig. II.2 - Componentes do campo geomagnético (Butler, 1992).

O campo magnético terrestre pode, em cada instante, ser definido por um vector  $H$ , com uma direcção e intensidade determinadas. Este vector tem

uma componente vertical, ( $H_v$ ),

e uma componente horizontal, ( $H_h$ ),

em que

$$H_h = H \cos I \text{ e } H_v = H \sin I.$$

As componentes norte ( $H_N$ ) e este ( $H_E$ ) são dadas respectivamente por

$$H_N = H \cos I \cos D,$$

$$H_E = H \cos I \sin D.$$

A intensidade do campo geomagnético é dada pela seguinte relação:

$$H = \sqrt{H_N^2 + H_E^2 + H_V^2}.$$

O campo magnético da Terra pode ser idealizado como o campo gerado por uma barra magnética gigante, com o centro no núcleo do planeta. A projecção, à superfície do globo terrestre, dos pólos deste íman gigante não coincide exactamente com os pólos Norte e Sul geográficos. O modelo do dipolo geocêntrico inclinado considera que o campo geomagnético se assemelha ao campo gerado por uma barra magnética inclinada de um ângulo de  $11,5^\circ$  (para oeste), relativamente ao eixo de rotação da Terra. Esta aproximação é válida para cerca de 90 % do campo geomagnético. Em algumas zonas, a diferença entre o campo medido e aquele que melhor se adapta ao modelo teórico é de cerca de 20 %. As intersecções, à superfície, dos eixos do dipolo que melhor se adapta, denominam-se pólos geomagnéticos. O norte e o sul geomagnéticos posicionam-se a  $72.21^\circ\text{W}$ ,  $80.08^\circ\text{N}$  e  $107.79^\circ\text{E}$ ,  $80.08^\circ\text{S}$ , respectivamente (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>) e não devem ser confundidos com os pólos magnéticos, ou “dip poles” (figura II.3).

A intensidade do campo geomagnético, à superfície, é  $\sim 5 \times 10^{-5}$  T (Maher *et al.*, 1999) e apresenta uma variação de, aproximadamente,  $7 \times 10^{-5}$  T nos pólos magnéticos até  $2,5 \times 10^{-5}$  T, no equador magnético (Thompson e Oldfield, 1986).

### II.2.1 Origem e variações do campo geomagnético

A teoria mais promissora sobre a origem do campo geomagnético é a Teoria do Dínamo, desenvolvida por Elsasser (1946) e Bullard (1948) (cit. em Thompson e Oldfield, 1986). A ideia básica desta teoria é a de que o campo magnético tem origem no núcleo metálico denso e líquido, devido a correntes eléctricas geradas no próprio núcleo.

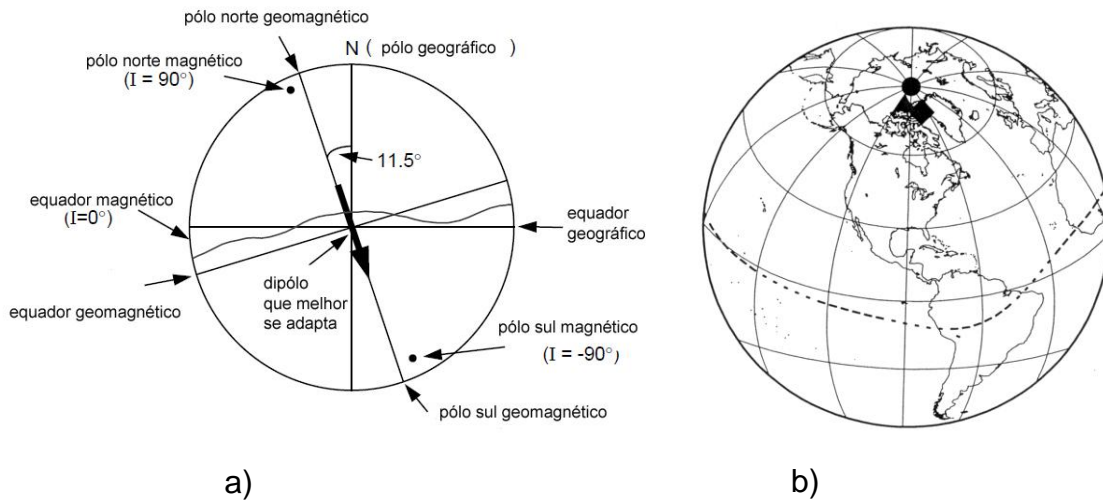


Fig. II.3 - Os diferentes pólos. a) em corte, com representação do dipolo que melhor se adapta ao campo geomagnético (adaptado de Butler, 1992) e b) em perspectiva: o triângulo corresponde ao Pólo Norte Magnético, em que  $I = +90^\circ$ ; o quadrado corresponde ao Pólo Norte Geomagnético, onde o eixo do dipolo intersecta a superfície. O círculo corresponde ao Pólo Norte Geográfico. A linha a tracejado representa o equador magnético em que  $I = 0^\circ$  (Tauxe, 1998).

Este sistema de correntes poderia ser mantido devido ao efeito de auto-indução, pelo que é usual designar esta teoria como Teoria do Dínamo de Auto-excitação. Actualmente, os dois planetas do sistema solar que ainda possuem dínamo activo são a Terra e Mercúrio (Alves *et al.*, 2003).

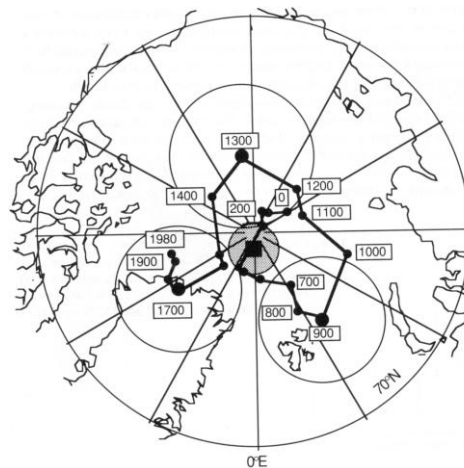


Fig. II.4 - Posições do pólo geomagnético nos últimos 2000 anos. Cada ponto representa a média para um período de 100 anos, as datas referem-se a anos d.C. (Butler, 1992).

---

O campo magnético terrestre não é constante e imutável. Pelo contrário, sofre variações ao longo do tempo, em que os pólos vão ocupando diferentes posições (figura II.4). As variações do campo geomagnético, cuja expressão máxima se traduz pela inversão de polaridade, vão desde a ordem do minuto até à ordem da dezena de milhares de anos.

### II.3 MINERAIS MAGNÉTICOS

Diz-se que um dado mineral apresenta propriedades magnéticas se, quando na presença de um campo magnético, ele reage a este campo adquirindo uma magnetização, denominada magnetização induzida. Os minerais magnéticos mais importantes incluem-se no grupo dos óxidos de ferro e no grupo dos sulfuretos de ferro. Em seguida, faz-se uma breve descrição dos principais minerais magnéticos. Uma descrição mais pormenorizada e completa encontra-se em, por exemplo, Lourenço (2003).

#### II.3.1 Óxidos de ferro

Os óxidos de ferro ocorrem sob diversas formas na Natureza. Os mais comuns são, provavelmente, a hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a maghemite ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) (Teja e Koh, 2008).

Consideram-se normalmente dois sub-grupos de minerais: os óxidos de ferro que cristalizam com a estrutura do corindo, como a hematite, e os óxidos de ferro que cristalizam com a estrutura da espinela, como a magnetite.

##### **Hematite, titanohematites e ilmenite**

A hematite é um mineral importante nas rochas ígneas oxidadas e nos sedimentos formados em condições oxidantes. É também o mineral de ferro dominante ou, por vezes, exclusivo, nas “red-beds”, sendo o principal responsável pelas propriedades magnéticas destes sedimentos (Collinson, 1983) e pela sua cor vermelha típica. É também conhecida como óxido de ferro férrico, ocre, especularite, e sesquióxido de ferro. Tem cor negra ou cinzento-escuro, apresenta cor vermelho-sangue quando transformada em pó (risca), é muito estável nas condições ambientais e é, frequentemente, o produto final da transformação de outros óxidos de ferro.

A estrutura da hematite consiste em camadas de catiões  $\text{Fe}^{3+}$ , paralelas ao plano basal (0001), alternando com camadas de aniões  $\text{O}^{2-}$  (figura II.5).



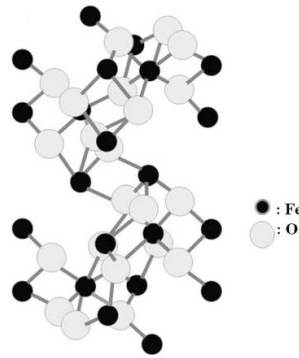


Fig. II.5- Estrutura cristalina da hematite (Teja e Koh, 2008).

Os momentos magnéticos estão acoplados de modo paralelo em relação aos planos (0001), isto é, dentro de cada camada os momentos magnéticos são paralelos, estando dispostos de modo aproximadamente antiparalelo entre camadas adjacentes (figura II.6). Tal disposição resulta num momento magnético fraco. A hematite é, pois, um mineral com anti-ferromagnetismo débil ou imperfeito que a torna importante no âmbito dos estudos paleomagnéticos.

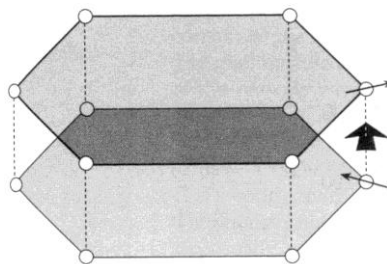


Fig. II.6 – Acoplamento dos momentos magnéticos dos cátions  $\text{Fe}^{3+}$  na hematite (adaptado de Butler, 1992).

As titanohematites têm composição intermédia entre a hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ). Na ilmenite, as camadas de  $\text{Fe}^{2+}$  alternam com camadas de  $\text{Ti}^{4+}$ , em relação às camadas de aniões de oxigénio (figura II.7). Os momentos atómicos de camadas de iões de ferro adjacentes são anti-paralelos. A ilmenite é antiferromagnética e tem uma temperatura de Néel ( $T_N$ ) (temperatura acima da qual o antiferromagnetismo desaparece) de  $-218\text{ }^\circ\text{C}$  (Butler, 1992). As titanohematites têm fórmula geral  $x\text{FeTiO}_3 (1-x) \text{Fe}_2\text{O}_3$ , em que  $x$  varia entre 0,1 e 0,9 ( $x=0$  para a hematite e  $x=1$  para a ilmenite). Para valores de  $x$  entre 0 e 0,45, as titanohematites possuem um comportamento antiferromagnético débil para valores entre 0,45 e 0,95 tornam-se ferrimagnéticas e, para  $x=1$ , adquirem a estrutura antiferromagnética da ilmenite.

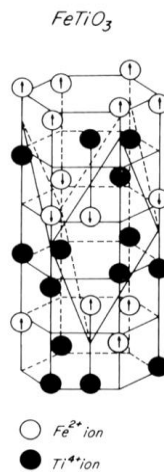


Fig. II.7 – Estrutura cristalina da ilmenite (Dunlop e Özdemir, 1997).

### Magnetite, titanomagnetite e ulvospinela

A magnetite é um mineral ferrimagnético muito comum sendo um dos óxidos de ferro mais abundantes e mais estudados. Apresenta uma estrutura em espinela inversa, em que a célula unitária tem 8 posições tetraédricas ocupadas com os iões  $Fe^{2+}$  e 16 posições octaédricas ocupadas por  $Fe^{3+}$  (figura II.8).

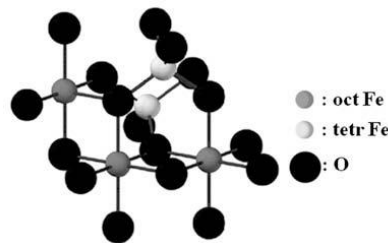


Fig. II.8 – Estrutura cristalina da magnetite (Teja e Koh, 2008).

A temperatura de Curie ( $T_C$ ) da magnetite, acima da qual a ordem ferrimagnética desaparece, é de 580 °C. Com uma magnetização de saturação na ordem dos 90-93 A  $m^2kg^{-1}$ , a magnetite é o mineral com propriedades magnéticas mais intensas. A saturação é atingida para campos entre 50 - 150 mT (Piper, 1987).

A aproximadamente -153 °C, a magnetite sofre igualmente uma modificação nas propriedades magnéticas, a transição de Verwey, envolvendo um decréscimo na simetria cristalográfica e uma alteração na sua condutividade eléctrica. Esta transição é uma característica própria da magnetite e tem sido utilizada para detecção deste mineral nas rochas (figura II.9). É influenciada pelo estado de oxidação da magnetite, constituindo um

“teste sensível” para determinar o grau de maghemitização nos solos, sedimentos e rochas (Özdemir e Dunlop, 1993), o que a torna particularmente importante em estudos de magnetismo ambiental.

As soluções sólidas entre a magnetite e a ulvospinela denominam-se genericamente por titanomagnetites, cuja fórmula geral é  $Fe_{3-x}Ti_xO_4$ , em que  $x$  varia entre 0,0, para a magnetite, e 1,0, para a ulvospinela. Se  $x=0,6$ , o mineral denomina-se TM60 (Tauxe, 1998).

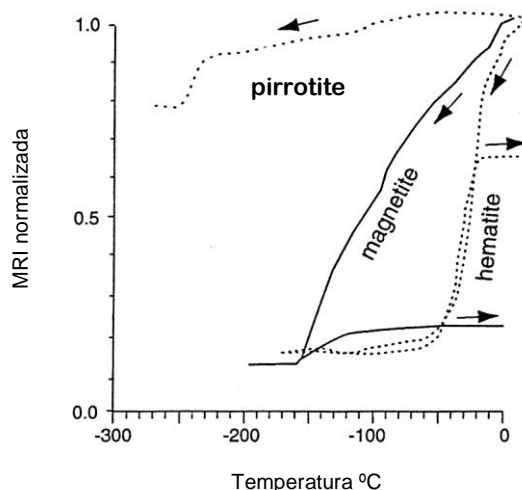


Fig. II.9 – Transição a baixas temperaturas para a pirrotite (-239 °C ou 34 K), a magnetite (-153 °C ou 118 K) e a hematite (-13 °C ou 260 K) (Dekkers, 1997).

A ulvospinela ( $Fe_3TiO_4$ ) tem estrutura idêntica à da magnetite, mas a composição é diferente. Os iões  $Ti^{4+}$  ocupam metade das posições octaédricas, preenchidas por  $Fe^{3+}$  na magnetite. Uma vez que existem 8 catiões  $Fe^{2+}$  nas posições octaédricas e 8 catiões  $Fe^{2+}$  nas posições tetraédricas, esta disposição resulta num momento magnético nulo, conferindo a este mineral propriedades antiferromagnéticas. No entanto, a  $T_N$  é de -153 °C, sendo a ulvospinela paramagnética à temperatura ambiente (Piper, 1987; Butler, 1992).

### Maghemite e titanomaghemites

A maghemite é um mineral fortemente ferrimagnético, com a mesma composição da hematite ( $\alpha-Fe_2O_3$ ), mas com estrutura cristalina idêntica à da magnetite. Tem propriedades magnéticas e magnetização de saturação semelhantes às da magnetite, o que pode induzir em erro na sua identificação.

Uma propriedade característica da maghemite é a sua conversão para hematite à temperatura de 300 °C (e.g. Tite e Linington, 1975; Thompson e Oldfield, 1986), embora a reacção de conversão seja bastante complexa, podendo ocorrer num intervalo de temperatura de  $\approx 200$  °C a 700 °C (Boer, 1999). Tendo em conta esta instabilidade, a sua  $T_C$  não está determinada com exactidão, embora se pense que ande à volta dos 645 °C

(Özdemir e Banerjee, 1984, cit. em Piper, 1987). A temperatura de conversão depende da granulometria, por exemplo, em maghemites naturais, e para a fracção 250  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ , a inversão ocorre a  $\approx 650$   $^{\circ}\text{C}$ , o que permite uma atribuição da temperatura de Curie a 610  $^{\circ}\text{C}$  (Boer e Dekkers, 1996). Impurezas como Na e Al podem compensar a deficiência em cátions de Fe e assim contribuir para estabilizar a estrutura da maghemite, diminuindo igualmente a  $T_C$ .

Na natureza, a maghemite forma-se predominantemente a partir da oxidação da magnetite a baixas temperaturas – maghemitização – em ambientes sub-aéreos ou marinhos, o que justifica a sua importância, quer em estudos paleomagnéticos, quer em estudos de solos e de reconstituições paleoclimáticas (Boer e Dekkers, 1996). A maghemite pode igualmente formar-se por desidratação da lepidocrocite ou por conversão de minerais antiferromagnéticos, como a hematite e a goethite, na sequência do aquecimento do solo (por um fogo florestal, por exemplo) numa série de transformações do tipo  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (Le Borgne, 1960).

As titanomaghemites têm uma composição química e uma localização no diagrama ternário (figura II.10) que pode ser descrita em função de dois parâmetros, um parâmetro  $x$ , que expressa a relação Fe:Ti, e um parâmetro  $z$ , que indica o grau de oxidação. As titanomaghemites podem formar-se acima dos 1000  $^{\circ}\text{C}$  em solução sólida e abaixo dos 600  $^{\circ}\text{C}$  por oxidação metastável. Por exemplo, em condições de oxidação, a baixas temperaturas, as titanomagnetites possuem uma deficiência em cátions, o que favorece a sua alteração para titanomaghemites. Assim, as titanomaghemites são dos óxidos de Fe e Ti mais abundantes na crosta terrestre. As propriedades físicas e magnéticas da hematite, magnetite e maghemite estão resumidas na tabela II.1.

### **Sulfuretos de ferro**

Os sulfuretos de ferro constituem o grupo de minerais magnéticos mais importantes a seguir ao dos óxidos de ferro. Entre o sulfureto de ferro raro que é a troilite, ( $\text{FeS}$ ), comum nos meteoritos, de estrutura monoclinica e propriedades antiferromagnéticas, e a pirite ( $\text{FeS}_2$ ), de estrutura cúbica e propriedades paramagnéticas, inclui-se um vasto grupo de minerais cuja fórmula geral é  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ , em que  $x$  varia entre 0,00 e 0,13. Neste grupo inclui-se a pirrotite, o sulfureto de ferro com propriedades magnéticas mais importantes, cuja composição varia entre  $\text{Fe}_7\text{S}_8$  e  $\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$ . A sua  $T_C$  é de 320  $^{\circ}\text{C}$ , para a composição  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ , e de 290  $^{\circ}\text{C}$  para a composição  $\text{Fe}_9\text{S}_{10}$  (Thompson e Oldfield, 1986). Impurezas como, por exemplo, o níquel fazem baixar ainda mais a  $T_C$ .

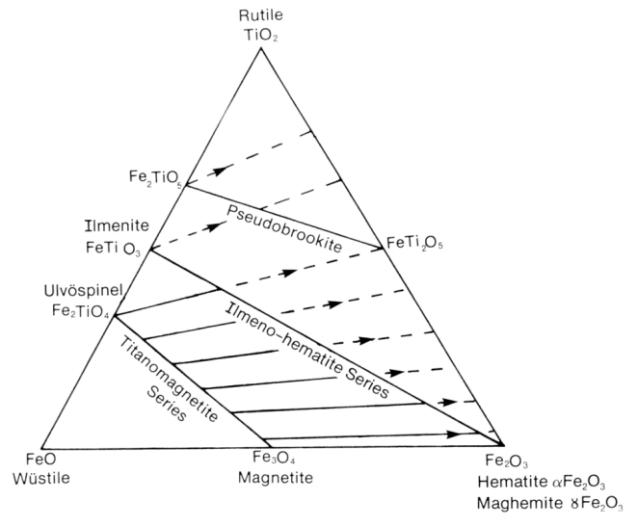


Fig. II.10 – Diagrama ternário  $\text{TiO}_2$  -  $\text{FeO}$  -  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  onde estão indicadas as séries das soluções sólidas (Piper, 1987).

### Pirrotite

A pirrotite ocorre em ambientes idênticos aos da pirite, nomeadamente em rochas ígneas básicas e rochas metamórficas (metamorfismo de grau baixo a médio). A sua formação tem lugar, também, durante a diagénese, em sedimentos marinhos em ambientes sedimentares com abundância de matéria orgânica (Butler, 1992).

Tabela II.1 – Caracterização dos principais óxidos de ferro (adaptado de Teja e Koh, 2008).

	Hematite	Magnetite	Maghemite
<b>Fórmula</b>	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
<b>Densidade (<math>\text{gm}^{-3}</math>)</b>	5,26	5,18	4,07
<b>Ponto fusão (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	1350,00	1583,00-1597,00	-
<b>Dureza</b>	6,50	5,50	5,00
<b>Tipo de magnetismo</b>	Antiferromagnetismo débil	Ferrimagnético	Ferrimagnético
<b><math>T_N, T_C</math> (K)</b>	956,00	850,00	820,00-986,00
<b>Magnetização de saturação a 300 K (<math>\text{Am}^2\text{kg}^{-1}</math>)</b>	0,30	92,00-100,00	60,00-80,00
<b>Sistema cristalográfico</b>	Romboédrico, hexagonal	Cúbico	Cúbico ou tetraédrico
<b>Tipo de estrutura</b>	Corindo	Espinela inversa	Espinela

---

A pirrotite raramente constitui um registo importante para os estudos paleomagnéticos, mas a sua susceptibilidade elevada pode ser utilizada como método de prospecção deste mineral (Thompson e Oldfield, 1986), a par da transição magnética que ocorre à temperatura de 34 K, característica deste mineral (figura II.9). O comportamento da magnetização durante esta transição depende da granulometria (Dekkers *et al.*, 1989).

### **Greigite**

A greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) é um sulfureto ferrimagnético, podendo ocorrer como mineral autigénico em sedimentos carbonatados. A presença de greigite de origem bacteriana em sedimentos foi detectada apenas na década de 90 (Mann, 1990, cit. em Fassbinder e Stanjek, 1994). A greigite não apresenta nenhuma transição magnética a baixas temperaturas, ao contrário da pirrotite e da magnetite, o que permite que as medições feitas a baixas temperaturas possam ser utilizadas como método indicador da sua presença. No entanto, a ausência de transição magnética a baixas temperaturas não deve ser considerada como uma evidência definitiva da sua presença (Roberts, 1995).

### **Goethite**

A goethite é um mineral de estrutura ortorrômbica, com propriedades antiferromagnéticas, podendo algumas goethites, no entanto, apresentar ferrimagnetismo fraco devido a uma deficiência em catiões de oxigénio que impede o cancelamento total de *spins* com momentos magnéticos opostos (Piper, 1987).

A goethite apresenta uma  $T_N$  de 120 °C e a partir dos 300 – 400 °C, desidrata para hematite (Thompson e Oldfield, 1986), de acordo com a reacção  $2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ .

A goethite, bem como outros óxidos de ferro hidratados (akagénite,  $\beta\text{FeOOH}$ , lepidocrocite,  $\gamma\text{FeOOH}$  e ferroxite,  $\delta\text{FeOOH}$ ), é um produto de meteorização ocorrendo em rochas e solos com cores amarelo a castanho-avermelhado.

### **Lepidocrocite**

A lepidocrocite tem cor castanha e estrutura ortorrômbica, é menos comum que a goethite, tem uma  $T_N$  de -196 °C e, portanto, não comporta uma magnetização remanescente à temperatura ambiente. Aquecendo a lepidocrocite até temperaturas na ordem dos 250 °C a 350 °C, esta desidrata para maghemite (Thompson e Oldfield, 1986).

### **Limonite**

Limonite é um termo geral atribuído a todos os óxidos de ferro hidratados com estrutura cristalina imperfeita a amorfa. Consiste, principalmente, em goethite ou lepidocrocite criptocristalinas. Alguns pedólogos preferem o termo ferrihidrite (Thompson e Oldfield, 1986).

### II.3.2 Outros minerais magnéticos

O ferro, material com estrutura ferromagnética típica, encontra-se ocasionalmente nalgumas amostras, mas a sua ocorrência restringe-se quase só aos meteoritos. O ferro tem magnetização de saturação e  $T_C$  elevada e é portador de uma intensa magnetização remanescente.

Minerais como a cassiterite e o zircão, têm sido referidos como portadores de magnetização mas é provável que isso se deva à existência de impurezas ferrimagnéticas (Piper, 1987). Os óxidos de ferro e manganês, pertencentes às séries da solução sólida da jacobsite (cujos membros finais são a hausmanite,  $Mn_3O_4$ , e a magnetite,  $Fe_3O_4$ ), são ferrimagnéticos, com  $T_C$  de 300 a 580 °C. A  $T_C$  decresce uniformemente com o aumento do teor em Mn e a magnetização de saturação atinge o valor máximo para a composição intermédia  $MnFe_2O_4$ . Os óxidos de ferro e manganês podem ocorrer em vénulas ou como minerais autigénicos em sedimentos marinhos ou de águas doces, em formas nodulares. Em anexo, apresenta-se uma tabela com um resumo dos principais minerais magnéticos e suas propriedades (Anexo 1).

### II.4 ESTRUTURAS MAGNÉTICAS

Todos os minerais respondem à aplicação de um campo magnético, uma vez que existe sempre uma reacção a nível atómico. Esta reacção pode assumir diferentes formas (figura II.11). Mesmo os materiais tidos convencionalmente como “não-magnéticos” respondem a um campo magnético, embora de um modo muito ténue. Qualquer destas respostas deriva do facto de a matéria ser constituída por átomos, ou seja, possuir estrutura electrónica. Os átomos, por sua vez, são constituídos por partículas elementares como os prótons, os electrões e os neutrões. Os prótons e os electrões são partículas com carga eléctrica, positiva e negativa, respectivamente. Os electrões, além de rodarem em torno do núcleo (movimento orbital), rodam em torno de si próprios (movimento de “spin”). O movimento orbital dos electrões gera uma corrente eléctrica que por sua vez induz a criação de um campo magnético. Analogamente, também o movimento de “spin” cria um momento magnético.

O comportamento magnético diferenciado dos materiais, sob aplicação de um campo magnético externo, resulta fundamentalmente da configuração electrónica própria de cada um e, mais concretamente, da existência ou não de electrões desemparelhados na orbital mais externa. Assim, no caso do ferro, verifica-se um forte momento magnético devido aos electrões desemparelhados na sua orbital 3d.

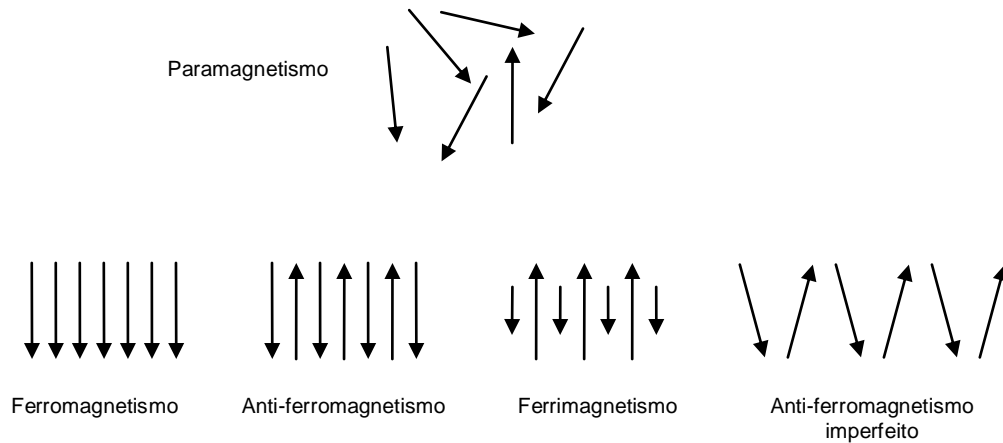


Fig. II.11 – Tipos de estruturas magnéticas em diferentes materiais, função do tipo de acoplamento dos momentos magnéticos dos electrões (adaptado de Thompson e Oldfield, 1986).

### Diamagnetismo

Esta é uma das propriedades magnéticas fundamentais, embora se manifeste de um modo muito menos intenso, quando comparada com as outras propriedades. O diamagnetismo resulta da interacção de um campo magnético com o movimento orbital dos electrões que produz uma magnetização negativa muito fraca. A magnetização induzida é oposta ao campo aplicado e desaparece assim que o campo é removido. Campos magnéticos elevados tendem a repelir materiais diamagnéticos. Os materiais que apresentam este tipo de comportamento são compostos por átomos sem momento magnético e apresentam camadas electrónicas completamente preenchidas e muito internas. Materiais como o quartzo, o feldspato, a calcite e a água são diamagnéticos.

### Paramagnetismo

No estado paramagnético, os momentos magnéticos atómicos estão dispostos aleatoriamente e o material tem um momento magnético total nulo. Se for aplicado um campo magnético, alguns momentos alinhar-se-ão e o material obterá um momento magnético fraco. O alinhamento dos momentos magnéticos produz uma magnetização induzida paralela à direcção do campo aplicado. Minerais ricos em Fe ou Mn, como a ilmenite, e os minerais de argila, enriquecidos em Fe, são paramagnéticos, isto é, podem ser magnetizados, desaparecendo a magnetização se o campo for removido. Quando é aplicado um campo magnético a materiais paramagnéticos, estes apresentam um comportamento oposto ao dos materiais diamagnéticos e tendem a ser atraídos para um campo magnético elevado. A olivina, a biotite e a piroxena são minerais paramagnéticos.



### **Ferromagnetismo**

Nos materiais ferromagnéticos como, por exemplo, o ferro, os momentos magnéticos estão alinhados, mesmo sem a influência de um campo magnético externo. Estes materiais apresentam, assim, uma magnetização espontânea, denominada magnetização remanescente. As propriedades magnéticas destes materiais dependem, no entanto, da temperatura. Assim, abaixo da  $T_C$ , estes materiais comportam uma forte magnetização remanescente. Mas, se a temperatura for superior à  $T_C$ , esta magnetização desaparece, pois a energia térmica faz vibrar a estrutura cristalina, provocando a oscilação rápida e aleatória dos momentos magnéticos, e estes materiais passam a ter comportamento paramagnético. Por exemplo, para o ferro a  $T_C$  é 770 °C. A magnetização dos materiais ferromagnéticos tem uma ordem de grandeza várias vezes superior à da dos materiais paramagnéticos ou diamagnéticos.

### **Ferrimagnetismo**

Aparentemente, o ferrimagnetismo é muito semelhante ao ferromagnetismo e é difícil distinguir entre estas duas propriedades, mesmo usando técnicas de medição adequadas. Os materiais ferromagnéticos exibem acoplamentos paralelos entre sub-camadas electrónicas e os materiais ferrimagnéticos e antiferromagnéticos acoplamentos anti-paralelos entre sub-camadas. Os materiais ferrimagnéticos, à semelhança dos ferromagnéticos, comportam uma magnetização remanescente abaixo da  $T_C$ , tornando-se paramagnéticos acima desta temperatura.

### **Antiferromagnetismo**

Neste tipo de estruturas, como referido anteriormente, os momentos magnéticos adjacentes são antiparalelos e com magnitude equivalente, anulam-se mutuamente e o momento magnético resultante é nulo. O antiferromagnetismo desaparece, por agitação térmica, acima da  $T_N$ . A ilmenite é um exemplo de um material antiferromagnético.

### **Antiferromagnetismo imperfeito**

Ocasionalmente, os *spins* magnéticos podem não estar alinhados em direcções perfeitamente antiparalelas, mas sim dispostos de modo a fazer um ângulo de alguns graus entre si. Esta disposição resulta num momento magnético fraco, denominando-se este tipo de materiais como antiferromagnéticos débeis ou antiferromagnéticos imperfeitos. A hematite é o exemplo de um material natural com estrutura antiferromagnética imperfeita.

As estruturas magnéticas e a relação com a susceptibilidade magnética estão sumariadas na tabela II.2.

Tabela II.2 – Estruturas magnéticas e susceptibilidade magnética (Dearing, 1999).

<b>Estrutura</b>	<b>Susceptibilidade (exemplos)</b>
<b>Ferromagnética</b>	Susceptibilidade positiva forte (ferro puro, níquel, crómio)
<b>Ferrimagnética</b>	Susceptibilidade positiva forte (óxidos e sulfuretos de ferro, como magnetite, maghemite, pirrotite, greigite)
<b>Antiferromagnética imperfeita</b>	Susceptibilidade positiva moderada (óxidos de ferro, como hematite, goethite)
<b>Paramagnética</b>	Susceptibilidade positiva fraca (minerais contendo ferro e sais, como biotite, olivina, sulfato de ferro)
<b>Diamagnética</b>	Susceptibilidade negativa fraca (água, matéria orgânica, plástico, quartzo, feldspato, carbonato de cálcio)

### Curva e parâmetros de histerese

A curva de histerese descreve a resposta dos materiais sob a influência de um campo magnético. Os materiais magnéticos, quando sujeitos a um campo magnético de intensidade crescente, reagem e adquirem uma magnetização cuja variação é proporcional ao campo aplicado (figura II.12). Se o campo for removido, o processo de desmagnetização inicia-se mas não com o mesmo ritmo com que se deu a magnetização. Este tipo de comportamento designa-se por histerético e a curva de desmagnetização apresenta um desfasamento em relação à curva de magnetização. Quando um material ferromagnético, inicialmente desmagnetizado, é colocado sob influência de um campo magnético, a magnetização é adquirida tal como se evidencia na figura II.12. Sob influência de um campo de fraca intensidade, a magnetização é reversível, contudo, se o campo for removido, a magnetização desaparece.

A magnetização da amostra vai aumentando à medida que a intensidade do campo aplicado aumenta, primeiro lentamente, depois rapidamente e de novo lentamente até atingir a saturação, assemelhando-se a curva obtida a um S. A magnetização de saturação,  $M_s$ , é a magnetização mais elevada que pode obter-se laboratorialmente, medida sob o campo aplicado. A magnetização medida, após removido o campo, denomina-se magnetização remanescente de saturação,  $M_r$ . A  $M_r$  é menor que a  $M_s$  porque se verifica uma perda parcial do alinhamento dos momentos magnéticos, que ocorre quando o campo é removido.

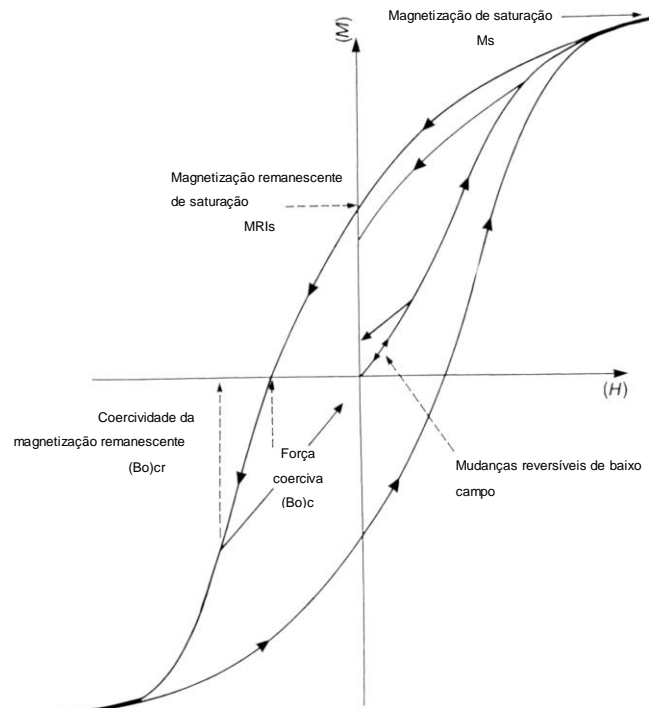


Fig. II.12 - Curva de histerese para uma amostra natural contendo uma mistura de minerais paramagnéticos e ferrimagnéticos (adaptado de Thompson e Oldfield, 1986 e Maher *et al.*, 1999).

No caso de ser aplicado um campo com direcção oposta verifica-se que a magnetização decresce até zero e o valor do campo correspondente denomina-se força coerciva ou campo coercivo,  $(B_0)_c$  ou  $(B)_c$ . O campo correspondente, que anula a magnetização remanescente, denomina-se coercividade da magnetização remanescente  $(B_{cr})$ . Este parâmetro permite distinguir os minerais magnéticos mais comuns. De um modo geral, os minerais antiferromagnéticos imperfeitos têm, geralmente, coercividades mais elevadas que as dos minerais ferrimagnéticos (Dekkers, 1997). Os minerais com a estrutura do corindo, como a hematite, apresentam valores de cerca de 0,2 T para a coercividade e os minerais com a estrutura da espinela, como a magnetite, apresentam valores abaixo de 0,05 T para este parâmetro (Thompson *et al.*, 1980).

Aumentando o campo, na direcção negativa, ocorre novo processo de saturação e repete-se o ciclo de magnetização-desmagnetização, em função do campo aplicado. Se o campo magnético suceder de um modo cíclico, sem ser atingida a saturação, teremos uma curva de histerese de menores dimensões.

A partir do ciclo de histerese é possível também determinar a magnetização remanescente isotérmica (MRI). Este parâmetro pode ser definido como a magnetização que permanece, após retirado o campo. Se o campo tiver atingido a intensidade de 100 mT, a magnetização que permanece após a retirada deste campo, é a  $MRI_{100\text{ mT}}$ .

### Domínios magnéticos

Para explicar a razão pela qual os materiais existem naturalmente no estado desmagnetizado, Weiss (1907, cit. em Thompson e Oldfield, 1986) sugeriu a existência de zonas dentro da estrutura cristalina que teriam magnetização diferente, de tal forma que a soma de todas as magnetizações fosse igual a zero. Estas zonas, ou domínios, estariam assim magnetizadas segundo diferentes direcções, anulando-se mutuamente (figura II.13).

A dimensão dos domínios depende do tamanho do grão e da própria estrutura cristalina: para a magnetite é da ordem dos  $0,1 \mu\text{m}$  e para a hematite de  $10 - 100 \mu\text{m}$ . A existência dos domínios tem a ver com o equilíbrio entre energia térmica e magnética. Entre dois domínios adjacentes existe uma zona de transição, designada por parede de Bloch, cuja espessura é de ca.  $0,01$  a  $0,1 \mu\text{m}$  (Piper, 1987).

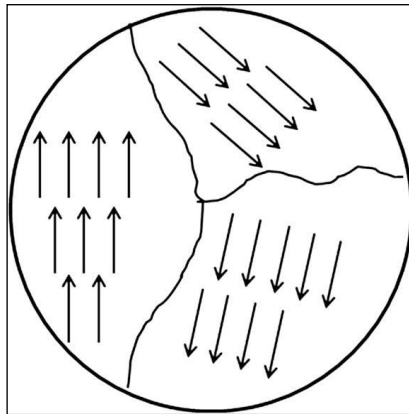


Fig. II.13 – Disposição dos domínios magnéticos num cristal (Teja e Koh, 2008).

Ao aplicar-se um campo magnético a um dado material, verifica-se a movimentação das paredes sendo este o processo responsável pela aquisição de magnetização induzida (Dunlop, 1995). As paredes movem-se, por rotação, favorecendo o crescimento dos domínios, de modo a que a sua magnetização fique paralela ao campo aplicado (figura II.14).

Certas partículas são tão pequenas que a sua dimensão só permite a formação de um único domínio, designando-se domínio-simples (DS). Se a dimensão permite a formação de dois ou mais domínios, então designam-se por multi-domínio (MD). Os grãos de menores dimensões apresentam uma susceptibilidade muito significativa, pelo que é costume designá-los por superparamagnéticos (SP). Embora não apresentem nenhuma magnetização à temperatura ambiente, adquirem um momento magnético mais intenso que o comportamento paramagnético quando são expostos à presença de um campo magnético.

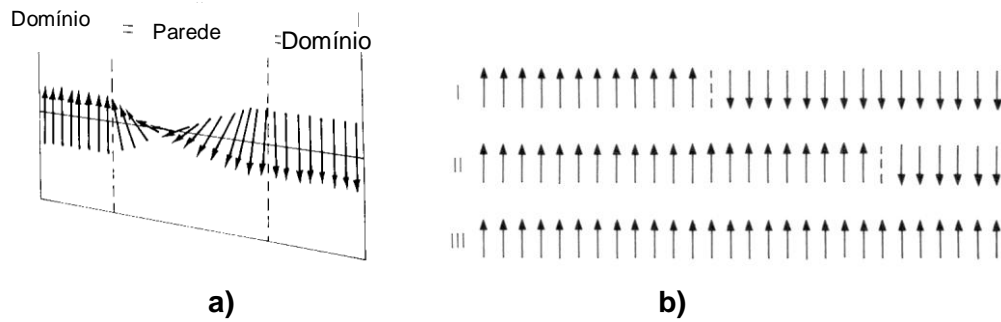


Fig. II.14 – a) rotação dos momentos magnéticos ao longo das paredes de Bloch; b) sequência de movimentos quando é aplicado um campo magnético (Thompson e Oldfield, 1986).

O tamanho de um grão, abaixo do qual ele é considerado monodomínio, denomina-se tamanho crítico e depende da forma do grão e da magnetização de saturação. Os materiais magnéticos com baixa magnetização de saturação têm pouca tendência para formar vários domínios porque a energia magnetoestática é baixa. De acordo com Buttler (1992), a hematite é monodomínio mesmo para diâmetros superiores a 15  $\mu\text{m}$  (por isso a maior parte da hematite nas rochas é monodomínio) e, no caso da magnetite, com magnetização de saturação mais elevada, apenas grãos muito finos ( $< 0,025 \mu\text{m}$ ) são monodomínios. Na tabela II.3 apresentam-se os valores dos tamanhos críticos, de acordo com Piper (1987).

A diferença entre grãos grandes monodomínio e grãos pequenos multidomínio é difícil de estabelecer. Existe uma gama representada por grãos de tamanhos de transição entre domínio simples e multidomínio, têm poucas paredes de Bloch e comportam-se magneticamente como domínios simples, designando-se pseudo-monodomínio ou pseudo-domínio simples (PDS).

Tabela II.3 - Valores dos tamanhos críticos para a transição de domínios para alguns minerais (Piper, 1987).

Mineral	Domínios simples ( $\mu\text{m}$ )	Multidomínios ( $\mu\text{m}$ )
<b>Magnetite</b> $\text{Fe}_3\text{O}_4$	0,025 - 0,030	0,05 - 0,08
<b>Maghemite</b> $\text{Fe}_2\text{O}_3$	?	0,06
<b>Titanomagnetite</b> (1 - x) $\text{Fe}_3\text{O}_4$ x $\text{FeTiO}_4$ (x = 0,55 - 0,60)	0,08	0,20 - 0,60
<b>Hematite</b> $\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,025 - 0,030	10,00 - 15,00
<b>Pirrotite</b> $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$	?	1,60 - 3,00

---

## II.5 GRANDEZAS E UNIDADES

### II.5.1 Magnetização

A magnetização ( $M$ ) é definida como o momento magnético por unidade de volume e é medida em ampéres por metro ( $\text{Am}^{-1}$ ). Pode ser natural ou induzida laboratorialmente.

#### II.5.1.1 Magnetização remanescente natural

A magnetização remanescente natural (MRN) é a magnetização que as rochas apresentam, antes de serem sujeitas a qualquer tratamento laboratorial. Esta magnetização tem uma componente primária, ou magnetização primária, adquirida durante ou imediatamente após a formação da rocha, que nos permite obter dados sobre a direcção e intensidade do campo magnético terrestre seu contemporâneo. Assim, a separação desta componente constitui o principal objectivo dos estudos no domínio do paleomagnetismo.

Posteriormente à formação da rocha, poderão ser adquiridas componentes adicionais, ou magnetizações secundárias, resultantes de perturbações como por exemplo uma inversão de polaridade do campo magnético terrestre. Assim, a magnetização das rochas, em cada momento, representa-se pelo vector-soma de duas componentes:

$$M = M_r + M_i,$$

em que  $M_r$  é a magnetização remanescente natural que permanece, mesmo na ausência de um campo aplicado, e  $M_i$  é a magnetização induzida, que desaparece uma vez removido o campo que a induziu (Butler, 1992; McElhiny e McFadden, 2000). A magnetização induzida é um processo reversível e como tal não constitui um bom registo de campos magnéticos anteriores. A relação entre  $M_r$  e  $M_i$  é dada pela relação:

$$Q = M_r/M_i,$$

em que  $Q$  é o factor de Koenigsberger. De acordo com Piper (1987), as rochas que apresentam valores elevados de  $Q$  ( $Q > 1$ ) constituem bons registos do campo paleomagnético, dado serem magneticamente estáveis. Se  $Q < 1$ , consideram-se maus registos.

A magnetização remanescente primária (MRP) pode ser adquirida como resultado da actuação de processos naturais termodinâmicos, químicos e/ou mecânicos, pelo que é costume designar-se este tipo de magnetização em função do processo que lhe deu origem. Assim, considera-se a Magnetização Remanescente Térmica (MRT), típica das rochas ígneas e a Magnetização Remanescente Química (MRQ) e a Magnetização Remanescente Detrítica (MRD) típicas das rochas sedimentares. Segue-se uma breve descrição de cada um destes tipos de magnetização.

### II.5.1.2 Magnetização remanescente térmica

A MRT é a magnetização típica das rochas ígneas. Por exemplo, uma lava adquire uma MRT enquanto os minerais magnéticos que fazem parte da sua composição arrefecem, desde uma temperatura elevada até temperaturas inferiores às de bloqueio dos minerais magnéticos. Abaixo da  $T_C$ , a energia magnetostática sobrepõe-se à energia térmica, reduzindo, deste modo, a dispersão aleatória dos *spins* dos electrões e induzindo o seu alinhamento. Desenvolve-se, assim, uma magnetização espontânea paralela (ou, muito raramente, antiparalela) ao campo geomagnético local.

### II.5.1.3 Magnetização remanescente química

Este tipo de magnetização é adquirido quando os minerais magnéticos se formam por alterações químicas, a temperaturas abaixo da  $T_C$  por alteração de um mineral magnético pré-existente, por exemplo, durante o crescimento dos grãos de hematite resultantes da desidratação da goethite (Butler, 1992) ou por precipitação a partir de uma solução rica em ferro. A MRQ encontra-se geralmente nas rochas sedimentares e, nalguns casos, a magnetização remanescente característica destas rochas é exclusivamente de origem química. Um dos principais processos de aquisição de MRQ, nas rochas sedimentares, tem a ver com o crescimento dos minerais magnéticos embora existam outros processos capazes de produzir esta magnetização, como a alteração química pós-deposicional.

A MRQ tem menor intensidade que a MRT porque a magnetização de saturação e a energia de anisotropia são mais baixas para temperaturas inferiores à  $T_C$  (Thompson e Oldfield, 1986). No entanto, a estabilidade dos dois tipos de magnetização é bastante similar.

Uma rocha ígnea pode adquirir uma MRQ durante o arrefecimento (modificações a altas temperaturas) ou depois do arrefecimento (modificações a baixas temperaturas). A MRQ poderá apresentar a mesma direcção da MRP, se a direcção do campo não variar significativamente durante o arrefecimento. A principal diferença entre os processos de aquisição de MRQ e MRT é que a magnetização é adquirida durante o aumento de volume, no primeiro caso, e durante o decréscimo da temperatura, no segundo caso (Piper, 1987).

---

#### II.5.1.4 Magnetização remanescente detrítica

As rochas sedimentares magnetizam-se de modo distinto das rochas ígneas. Estas, adquirem a magnetização quando arrefecem abaixo da  $T_C$ . Nas rochas sedimentares, os grãos que as constituem, por terem sido erodidos de rochas pré-existentes, já comportam uma magnetização (MRT ou MRQ). Quando se depositam, alinham-se preferencialmente de acordo com o campo geomagnético. Se não se verificarem fenómenos que possam induzir perturbações neste alinhamento (bioturbação, por exemplo) os sedimentos constituirão um registo fidedigno das condições ambientais contemporâneas da deposição.

A MRD é, assim, adquirida durante a deposição, como resultado do processo de alinhamento das partículas magnéticas sob a acção do campo geomagnético. Durante a deposição, as partículas são influenciadas por quatro tipos de forças: forças gravíticas, hidráulicas, térmicas e magnéticas. A influência destas forças é função, sobretudo, do tamanho do grão. Assim, para diâmetros inferiores a ca. 20  $\mu\text{m}$ , a força magnética é dominante. Estes grãos orientam-se no fluido por períodos da ordem dos segundos, à medida que o grão roda para alinhar a sua magnetização com a do campo geomagnético; no entanto, para partículas de menores dimensões (<1  $\mu\text{m}$ ), a agitação térmica (vibração Browniana) tende a tornar aleatório este alinhamento. Em teoria, existem grãos com dimensão intermédia para os quais a força magnética predomina, de modo a que se verifique o seu alinhamento com o campo geomagnético, o que se pode confirmar através de experiências laboratoriais.

Se após a deposição das partículas, e antes da consolidação, se verificar a sua rotação, então a magnetização adquirida por este processo designa-se magnetização remanescente pós-deposicional (MRpD). Esta rotação das partículas pode ser devida à remobilização dos grãos magnéticos algum tempo após a sua deposição, por exemplo, por processos de bioturbação nos sedimentos superficiais. O conteúdo em água e a porosidade, dos sedimentos, podem facilitar a rotação das partículas.

A MRD é difícil de estudar devido à diversidade de factores intervenientes como, por exemplo, o tamanho e a forma das partículas sedimentares, a topografia do fundo da bacia de sedimentação, a intensidade de magnetização dos minerais magnéticos e o conteúdo em água dos sedimentos. No entanto, apesar da diversidade dos ambientes naturais, a MRD tem sido estudada laboratorialmente devido à relativa facilidade de simulação das condições naturais.



## **I.5.2 Magnetizações impostas laboratorialmente**

Dos tipos de magnetização impostas laboratorialmente fazem parte a magnetização remanescente isotérmica (MRI) e a magnetização remanescente anisterética (MRA).

### **I.5.2.1 Magnetização remanescente isotérmica**

Este tipo de magnetização resulta da exposição da amostra a um campo magnético, a uma temperatura constante; esta temperatura corresponde normalmente à temperatura ambiente. A magnitude da magnetização depende da intensidade do campo aplicado. Esta dependência pode ser demonstrada laboratorialmente sujeitando uma amostra a campos de intensidade crescente e medindo a magnetização, após cada aplicação. O valor máximo da magnetização que se pode obter denomina-se magnetização isotérmica remanescente de saturação ( $MRI_s$ ). O campo para o qual esta magnetização é obtida, depende da composição e do tamanho dos grãos magnéticos.

### **I.5.2.2 Magnetização remanescente anisterética**

Este tipo de magnetização é considerado uma propriedade magnética-chave e obtém-se através da utilização de campos alternos de intensidade decrescente. A amostra fica sujeita à acção simultânea de um campo contínuo e de um campo alterno, sobrepondo-se este último à acção do primeiro. Ao diminuir a intensidade do campo alterno e mantendo o campo contínuo, a amostra adquire uma magnetização, denominada MRA. É importante na identificação da mineralogia e granulometria de amostras naturais. Em comparação com as partículas MD, as partículas DS apresentam valores de MRA elevados, o que permite utilizar esta propriedade como indicador deste tipo de partículas.

## **II.5.3 Susceptibilidade magnética**

A susceptibilidade magnética, parâmetro que assume particular importância no domínio do magnetismo ambiental, pode ser definida como uma medida de quanto um objecto se magnetiza na presença de um campo magnético, ou seja, da sua “magnetizabilidade”. Permite-nos obter dados sobre a facilidade com que um dado material se magnetiza e, assim, ter uma ideia sobre a concentração de minerais magnéticos presentes na amostra. Pode ser determinada em rochas, poeiras, solos e sedimentos em amostras de 0,1 a 100 g.

A susceptibilidade magnética pode ser considerada em função da massa do corpo magnetizado ou, em alternativa, expressa em função do seu volume (Hunt *et al.*, 1995).

A susceptibilidade de volume,  $K$  não tem unidades e é dada pela relação:

$$M = K H$$

A susceptibilidade específica de massa,  $\chi$ , é expressa em  $m^3kg^{-1}$  e é definida por:

$$\chi = K / \rho,$$

em que  $\rho$  é a densidade do material.

Todos os materiais têm susceptibilidade magnética, que pode ser positiva (paramagnética) ou negativa (diamagnética). Nos materiais ferromagnéticos (s.l.), cujo comportamento magnético é descrito pela curva de histerese (figura II.12), o declive inicial da curva corresponde à susceptibilidade inicial ou susceptibilidade "low field" ( $K_0$  ou  $K_{lf}$ ). Os valores da susceptibilidade magnética para os minerais mais comuns são apresentados na tabela II.4.

A susceptibilidade varia com a frequência do campo aplicado. Este parâmetro é definido por Hunt *et al.* (1995) como

$$K_{fd} = (K_{470\text{ Hz}} - K_{4700\text{ Hz}}) / K_{470\text{ Hz}} \times 100,$$

em que:

$K_{fd}$  - susceptibilidade dependente da frequência ("frequency dependence of susceptibility"),

$K_{470\text{ Hz}}$  - susceptibilidade da amostra medida a 470 Hz,

$K_{4700\text{ Hz}}$  - susceptibilidade da amostra medida a 4700 Hz.

O parâmetro  $K_{fd}$  é sensível à presença de grãos superparamagnéticos (SP). De acordo com Dearing (1999), os valores de  $K_{fd} < 2,0\%$  indicam que praticamente não há grãos SP; entre 2,0 e 10,0 % indicam mistura de grãos SP e grãos não-SP mais grosseiros; acima de 10,0 % indicam que, praticamente, todos os grãos são SP.

A susceptibilidade varia ainda em função da direcção, o que tem a ver com a maior ou menor facilidade com que uma substância se magnetiza, considerando os diferentes eixos da estrutura cristalina. A anisotropia da susceptibilidade magnética pode ser utilizada, por exemplo, para determinação de paleodirecções dos ventos em depósitos de loess (Lagroix e Banerjee, 2002). Os tipos e parâmetros da anisotropia da susceptibilidade magnética estão descritos detalhadamente em Sant'Ovaia (1993).

Tabela II.4 – Susceptibilidade de alguns minerais comuns (adaptado de Hunt *et al.*, 1995).

	$\kappa$ ( $10^{-6}$ SI)	$\chi$ ( $10^{-8}$ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )
<b>Minerais sem Fe</b>		
<b>Calcite</b>	-8,0 a -39,0	-0,3 a -1,4
<b>Quartzo</b>	-13,0 a -17,0	-0,5 a -0,6
<b>Feldspato</b>	-13,0 a -17,0	-0,49 a -0,67
<b>Halite</b>	-10,0 a -16,0	-0,48 a -0,75
<b>Gesso</b>	-13,0 a -29,0	-0,5 a -1,3
<b>Caulinite</b>	-50,0	-2
<b>Minerais com Fe</b>		
<b>Ilite</b>	410	15
<b>Biotite</b>	1 500 a 2 900	52 a 98
<b>Óxidos de ferro</b>		
<b>Goetite</b>	1 100 a 12 000	26-280
<b>Hematite</b>	500 a 40 000	10 a 760
<b>Maghemite</b>	2 000 000 a 2 500 000	40 000 a 50 000
<b>Magnetite</b>	1 000 000 a 5 700 000	20 000 a 110 000
<b>Ilmenite</b>	2 200 a 3 800 000	46 a 80 000
<b>Sulfuretos de ferro</b>		
<b>Pirite</b>	35 a 5000	1 a 100
<b>Pirrotite</b>	460 a 1 400 000	10 a 30 000

Fundamentalmente, no magnetismo ambiental, são necessárias três unidades: uma para a magnetização, outra para o campo magnético e outra para a susceptibilidade (Maher *et al.*, 1999). Na tabela II.4, estão sumariadas estas grandezas, bem como as unidades vulgarmente utilizadas. Em anexo, apresenta-se uma tabela complementar, que inclui os factores de conversão (Anexo 2).

Tabela II.4 - Grandezas e unidades usadas em magnetismo ambiental (adaptado de Maher *et al.*, 1999).

Grandeza		Unidades
Campo magnético, H		T
Magnetização, M		Am <sup>-1</sup>
Susceptibilidade magnética	κ	adimensional
	χ	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>

## II. 6 EQUIPAMENTOS LABORATORIAIS

Os equipamentos utilizados em estudos de magnetismo ambiental pertencem basicamente a três categorias: susceptibilímetros, magnetizadores e magnetómetros.

Estes equipamentos permitem, respectivamente, quantificar a facilidade com que os materiais se magnetizam, magnetizar as amostras para posteriores medições e, por último, medir as magnetizações naturais ou induzidas laboratorialmente. Constituem o que Thompson e Oldfield (1986) designam por “environmental magnetic kit”.

### II. 6.1 Susceptibilímetros

Também designados por balanças ou pontes de susceptibilidade, estes equipamentos medem a susceptibilidade magnética dos materiais, em laboratório ou no campo (figura II.15).

Nos susceptibilímetros, um circuito electromagnético detecta as variações na inductância quando uma amostra é colocada no interior de um solenoide. As pontes de susceptibilidade que operam em duas frequências são particularmente úteis em estudos ambientais com amostras de solos. Para medição da variação da susceptibilidade magnética com a temperatura, utilizam-se balanças de susceptibilidade acopladas a um forno (figura II.16).

### II. 6.2 Magnetizadores

A base de funcionamento deste tipo de aparelhos consiste numa bobine capaz de gerar um campo pulsado. Para magnetizar amostras, podem utilizar-se igualmente electromagnetos que são um pouco mais lentos que as bobines. (Maher *et al.* 1999). Campos directos, uniformes, de intensidade até 1 mT, podem facilmente ser produzidos numa bobine com a forma de um solenóide. O campo no interior do solenóide é igual a  $\mu_0 Ni$ ,

em que  $N$  é o número de voltas por metro e  $i$  a intensidade da corrente em ampéres. O campo é constante no interior do solenóide (Thompson e Oldfield, 1986) (figura II.17).

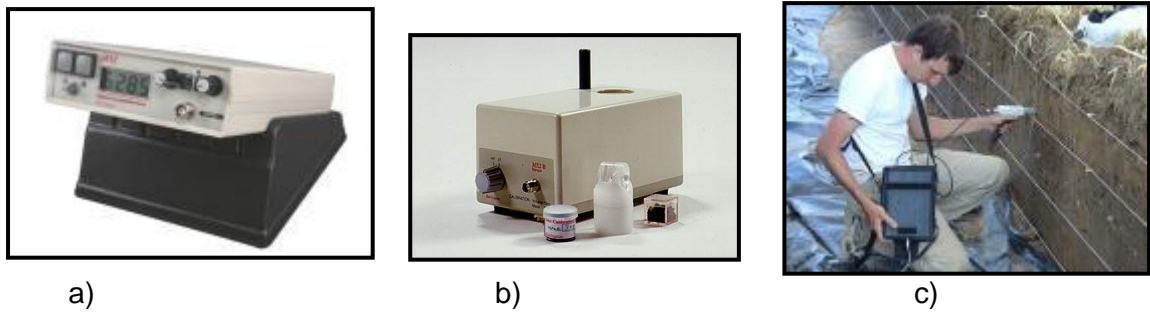


Fig. II.15 – Susceptibilímetros: a) medidor; b) sensor; c) susceptibilímetro portátil (<http://www.bartington.com/products/>).



Fig. II.16 – Balança de susceptibilidade com forno (<http://paleomag.geology.ucdavis.edu/instruments.html>).



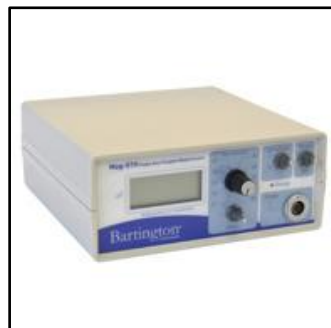
Figura II.17 – Magnetizador Molspin.

### II. 6.3 Magnetómetros

Os magnetómetros detectam o campo magnético no espaço envolvente da amostra, permitindo medir a sua intensidade e direcção. Devem ser suficientemente sensíveis para medir momentos magnéticos que podem variar num factor da ordem do milhão, pois sedimentos, solos e poeiras podem conter minerais magnéticos em concentrações muito variadas. Os magnetómetros do tipo "fluxgate" (figura II.18) utilizados em muitos laboratórios de paleomagnetismo, constituem uma escolha acertada para trabalhos no domínio do magnetismo ambiental. São fiáveis e fáceis de utilizar. Os magnetómetros "fluxgate" de um eixo (figura II.19 a)) medem a intensidade do campo magnético numa direcção específica; os magnetómetros "fluxgate" tri-axiais (figura II.19 b)), mais versáteis, são compostos por três sensores dispostos ortogonalmente entre si permitindo medir a intensidade do campo magnético nas direcções x, y e z. Assim pode-se determinar a magnitude e direcção totais do campo magnético.



Fig. II.17 - Magnetómetro Molspin Spinner.



a)



b)

Fig. II.18 - a) Magnetómetro de eixo único b) Magnetómetro tri-axial (<http://www.bartington.com/>).

## **Capítulo III**

# **IMPORTÂNCIA DOS MINERAIS MAGNÉTICOS NO ESTUDO DE SOLOS E SUA RELAÇÃO COM ELEMENTOS TÓXICOS**

### III.1 CIRCULAÇÃO DOS MINERAIS MAGNÉTICOS NA LITOSFERA, ATMOSFERA E HIDROSFERA

A litosfera é a principal fonte de minerais magnéticos, não só nas formas primárias, directamente a partir dos materiais que constituem o substrato rochoso, mas também de outros materiais contendo ferro, paramagnéticos ou fracamente magnéticos. Estes podem ser transformados em formas ferrimagnéticas no decurso de processos inerentes à formação dos solos ou a episódios de fogos florestais, entre outros (Le Borgne, 1960). O movimento dos minerais magnéticos entre a atmosfera, hidrosfera e litosfera está esquematizado na figura III.1.

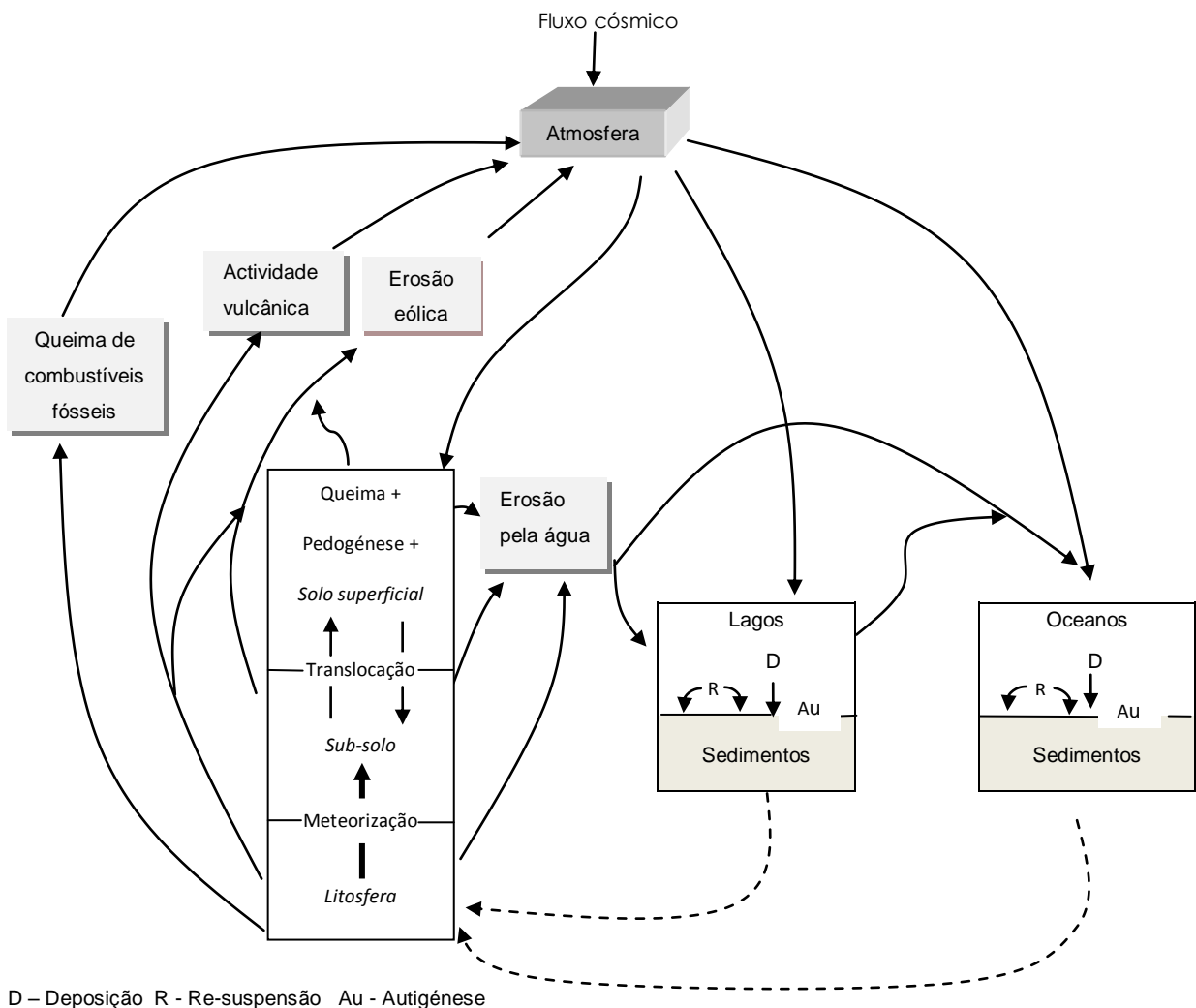


Fig. III.1 – Modelo simplificado do movimento dos minerais magnéticos entre a atmosfera, litosfera e hidrosfera (adaptado de Thompson *et al.*, 1980).

Estas transformações, em que há formação de minerais ferrimagnéticos, resultam num aumento do sinal magnético da camada superficial. Os minerais formados deste modo foram identificados como sendo maghemite impura ou magnetite não-estequiométrica (Thompson *et al.*, 1980).



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 efectuados em perfis verticais, em que são projectados os valores de vários parâmetros magnéticos em função da profundidade. A contribuição da deposição a partir da atmosfera pode ser calculada em termos de quantidade de magnetite, permitindo obter, assim, um registo da história da poluição para uma dada área (e.g. Horng *et al.*, 2008).

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 e quantificar o “fluxo” de sedimentos. É possível igualmente datar estes sedimentos através de medições da declinação magnética. As variações das declinações paleomagnéticas ficam gravadas nos sedimentos como uma assinatura do campo geomagnético na altura em que foram depositados.

As variações na susceptibilidade magnética, uma vez que estão relacionadas com as concentrações em minerais magnéticos, fornecem uma base para estabelecer correlações entre logs de sondagens e permitem interpretações dos processos sedimentológicos associados. Os minerais pesados, entre os quais se inclui a magnetite, são transportados e depositados de acordo com as suas propriedades hidrodinâmicas. Thompson *et al.* (1980) apresentam um estudo efectuado no Loch Lomond, Escócia, onde observaram que a fracção de silte grosseiro continha baixa concentração de magnetite, apresentando por isso valores baixos para a susceptibilidade magnética. Segundo os autores, as variações na granulometria dos sedimentos resultaram de alterações ambientais na bacia de drenagem – por exemplo, variações na taxa de erosão do solo.

### **III.2 IMPORTÂNCIA DOS ÓXIDOS DE FERRO MAGNÉTICOS NOS SOLOS**

Os principais minerais com propriedades magnéticas incluem-se no grupo dos óxidos de ferro (ver Secção II.1- Cap.II). Os óxidos de ferro são constituintes essenciais do solo e de extrema importância, pois são muito sensíveis às variações nas condições ambientais. Ocorrem naturalmente nos solos e têm um papel determinante nos processos pedogenéticos. Em particular, os óxidos de ferro magnéticos reflectem estes processos e actuam de modo a produzir uma diferenciação vertical das propriedades magnéticas do solo. A composição dos óxidos de ferro, o tamanho e a morfologia das partículas, bem como a sua concentração, são condicionados pelos processos de formação do solo. Estes componentes importantes dos solos podem assumir uma larga gama de “assinaturas magnéticas ambientais” (Thompson e Oldfield, 1986; Verosub e Roberts, 1995; Evans e

Heller, 2003). Os óxidos de ferro, em conjunto com outros tipos de compostos de ferro, reflectem os processos de formação do solo bem como as condições ambientais (tabela III.1).

Tabela III.1 – Óxidos de ferro nos solos (adaptado de Maher, 1986).

Mineral	Fórmula	Condições
Hematite	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	Solos oxidados, secos, em áreas de temperatura elevada.
Magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Ocorrência restrita; frequentemente de origem detrítica, antrópica, biogénica ou resultante do aquecimento do solo.
Goethite	$\alpha\text{FeOOH}$	Solos húmidos, em áreas bem drenadas de clima temperado.
Maghemite	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	Abundante em solos de climas tropicais a sub-tropicais.
Lepidrococite	$\gamma\text{FeOOH}$	Solos com drenagem incipiente.
Ferrihidrite	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Solos pouco drenados ou podzolizados.

Os óxidos de ferro ocorrem nos solos na forma de partículas muito finas isoladas, na forma de agregados ou concreções, como material de cimentação ou como material de revestimento. Por exemplo, a cor vermelha de certos arenitos é-lhes conferida pela hematite, muito fina, que reveste os grãos de sílica, como acontece, por exemplo, nas unidades gresosas que fazem parte do *Grupo de Silves*.

Embora o ferro não seja o componente em maior proporção nos solos (os óxidos de ferro constituem cerca de 2 – 3 % do conteúdo mineral dos solos, Jordanova *et al.*, 2010), assume particular importância nos processos responsáveis pelo desenvolvimento do perfil do solo e pelas suas características intrínsecas. O ferro tem a capacidade de assumir vários estados de valência, pode ligar-se a outros componentes do solo de vários modos e formar diversos tipos de compostos. É extremamente sensível às condições ambientais, reflectindo as condições de secura e humidade que possam ocorrer, e assumindo formas oxidadas ou reduzidas em função dessas condições. As várias formas em que pode ocorrer nos solos repercutem-se nas suas propriedades físicas como sejam a cor, textura e estrutura. Particularmente, a hematite e a goethite têm sido objecto de estudo por vários autores, pois são constituintes importantes de solos e sedimentos e podem absorver quantidades significativas de fosfatos, afectando a qualidade e a fertilidade dos solos (Barros *et al.*, 1988, cit. em Liu *et al.*, 2007).

Presente na estrutura dos minerais primários do solo na forma reduzida  $Fe^{2+}$ , o ferro é libertado por alteração (hidrólise) num meio em que predominam as condições de oxidação (apenas em condições específicas de redução tal não acontece) e tenderá a assumir formas oxidadas  $Fe^{3+}$ . A matéria orgânica contribui para manter o ferro na forma reduzida, solúvel, e assim os hidróxidos de ferro podem migrar ao longo do perfil, protegidos pela matéria orgânica resultando numa diferenciação em camadas (horizontes). Esta diferenciação traduz-se numa variação das propriedades magnéticas do solo ao longo do perfil, que pode ser facilmente detectada por medição da susceptibilidade magnética, *in situ*, com recurso a susceptibilímetros de campo. Em laboratório, essa variação pode igualmente ser analisada, através da medição da susceptibilidade magnética e da magnetização, em amostras colhidas em vários níveis de profundidade, em balanças de susceptibilidade e magnetómetros. Os métodos magnéticos podem, assim, ser utilizados para estudar os processos de formação dos solos e as propriedades dos óxidos de ferro pedogenéticos.

### III.3 MINERAIS MAGNÉTICOS NOS SOLOS: CONTRIBUIÇÃO LITOGÉNICA VERSUS CONTRIBUIÇÃO ANTROPOGÉNICA

Os estudos que envolvem a medição das propriedades magnéticas dos solos, numa vertente ambiental, têm um problema de base a resolver: distinguir entre o que é natural, ou sinal de fundo (o “background”) e o sinal que resulta das actividades antrópicas. A definição daquilo que constitui o “background” é uma questão importante dada a actual preocupação com o ambiente, a par do crescente número de investigações sobre poluição em solos, sedimentos, água e ar. O “background” refere-se a uma propriedade, aplicada a um determinado local ou a medições feitas nesse local, que seja exclusivamente derivada de processos naturais e não afectada por processos não naturais (de origem antrópica). O termo “background natural” é utilizado no sentido de reforçar a ideia de que não há contribuição antropogénica.

A distinção entre aquilo que é “natural” e o que não é “natural” pode ser feita com recurso a uma base de dados suficientemente alargada e utilizando análises estatísticas mais ou menos complexas (*e.g.* Matschullat *et al.*, 2000) que exigem alguns conhecimentos nesta área e uma cuidadosa manipulação dos dados, de modo a não se obterem conclusões imprecisas. A detecção de valores anómalos é uma das tarefas cruciais quando se lida com bases de “dados ambientais”. Recentemente, têm sido propostas algumas formas no sentido de identificar os valores de fundo e os valores considerados anómalos (Matschullat *et al.*, 2000; Reimann e Caritat, 2005), para identificar o “background” geoquímico. Existe uma relevância prática na definição da fronteira entre concentrações de um elemento ou componente que ocorra naturalmente num dado meio, quando comparados com as concentrações do mesmo elemento ou componente, presente como resultado de

actividades antrópicas. Quando se utilizam as propriedades magnéticas no âmbito de estudos sobre poluição de solos, continua a existir o problema de identificar qual a contribuição do sinal magnético do “background” nas medições efectuadas. Nos solos, a identificação de contaminações antrópicas pode fazer-se através da comparação de amostras do solo superficial (0 - 20 cm) com amostras do sub-solo (Hanesh *et al.*, 2007). Contudo nem sempre esta técnica produz resultados fiáveis uma vez que os processos pedogenéticos podem “mascarar” indícios de contaminação. O sinal magnético do “background” depende, entre outros, do tipo de solos (Hanesh e Scholger, 2005). O clima, o material parental, a topografia, a água, a fauna, a flora e as actividades humanas são factores que influenciam a pedogénese e, como tal, podem afectar a susceptibilidade magnética dos solos (tabela III.2).

Tabela III.2 – Factores que influenciam as propriedades magnéticas dos solos (adaptado de Hanesh e Sholger, 2005).

<b>Factor</b>	<b>Tipo de influência</b>
<b>Clima</b>	Os factores climáticos que mais influenciam a susceptibilidade são a temperatura e a precipitação. A relação entre clima e susceptibilidade pode ser utilizada, por exemplo, para estimar a intensidade das paleoprecipitações.
<b>Material parental</b>	O material parental é importante para o sinal magnético dos solos e, em alguns casos, é a principal influência.
<b>Topografia</b>	A susceptibilidade do solo varia consoante a posição do perfil do solo ao longo da encosta. A textura e o tipo de drenagem são os factores responsáveis por esta variação.
<b>Água</b>	O regime hídrico é muito importante para as propriedades magnéticas do solo. Em climas áridos, dificilmente se forma magnetite de origem pedogénica. Em solos alagados (gleysolos), os minerais magnéticos sofrem dissolução. A água também pode deslocar a argila (por exemplo num luvisolo) e a matéria orgânica e óxidos de ferro ao longo do perfil (por ex. num podzol).
<b>Fauna e flora</b>	Os animais podem deslocar os materiais ao longo do perfil e as plantas, através das raízes, criam canais que facilitam o transporte de soluções.
<b>Erosão</b>	A erosão pode contribuir para a perda de material magnético do solo.
<b>Actividades antrópicas</b>	A actividade industrial pode contribuir para o aumento do sinal magnético dos solos e as práticas agrícolas podem contribuir para o aumento, através da adição de materiais ao solo, ou para a sua diminuição, por remoção do horizonte superficial.
<b>Tempo</b>	É um factor pedogenético muito importante. Por exemplo, em solos bem drenados e evoluídos, a susceptibilidade magnética tende a aumentar com o tempo, embora nem sempre a uma taxa constante.

Fialová *et al.* (2006) aplicaram os métodos magnéticos com a finalidade de “separar” a contribuição litogénica da contribuição antropogénica, em locais com substratos geológicos diferentes e com condições ambientais diferentes, ou seja, situados em zonas industrializadas ou longe de fontes de poluição. Magiera *et al.* (2006) determinaram a distribuição vertical da susceptibilidade magnética em de perfis de solos, para distinguirem a contribuição litogénica da contribuição antropogénica. O estudo de perfis verticais da susceptibilidade magnética, em profundidade, permite, em determinadas situações, distinguir quando o aumento do sinal magnético nos solos está relacionado com actividades antrópicas ou com factores pedogenéticos (figura III.2). Quando a contribuição litogénica é predominante, o aumento verifica-se em profundidade. Quando a contribuição antropogénica prevalece sobre a contribuição litogénica, o comportamento típico da variação da susceptibilidade com a profundidade, revela um aumento nos 20 cm superficiais ao que se segue um decréscimo acentuado.

Por exemplo, os perfis verticais da susceptibilidade magnética exibidos na figura III.2 mostram que na área de Přebram (República Checa, Boémia central), a contribuição litogénica controla o aumento da susceptibilidade magnética em profundidade (Fialová *et al.*, 2006). Por outro lado, o perfil de Ostrava (República Checa, norte da Moravia) evidencia uma contribuição antropogénica preferencial, ao exibir valores mais elevados para a susceptibilidade magnética nos 10 cm superficiais do solo.

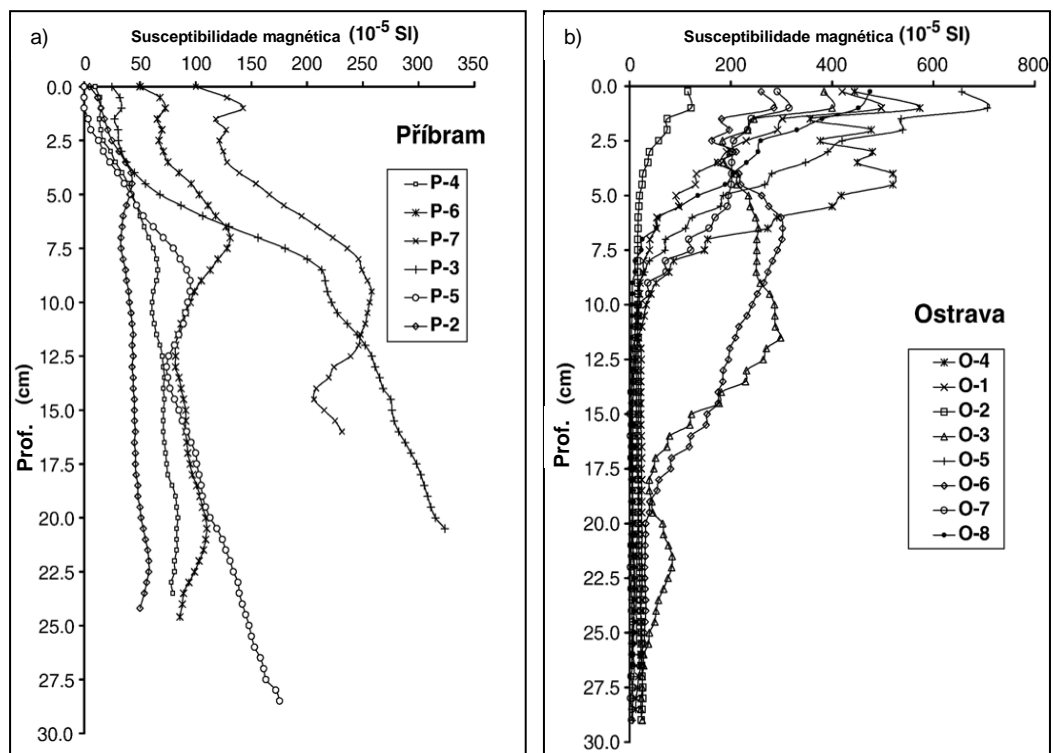


Fig. III.2 – Susceptibilidade magnética de dois perfis verticais de solos em duas áreas distintas a) Přebram, zona pouco poluída e b) Ostrava, uma das áreas mais poluídas da República Checa (Fialová *et al.*,2006).

A observação da fracção magnética, separada manualmente a partir de amostras de solos superficiais da região de Ostrava, corrobora estes dados ao revelar a presença de esférulas magnéticas, com o aspecto típico de partículas de origem antrópica, derivadas da queima de combustíveis fósseis (figura III.3). Na parte inferior dos perfis, não existem este tipo de partículas que se distinguem das partículas naturais pela sua morfologia e dimensão: apresentam, frequentemente, dimensões relativamente grandes e forma esférica, podendo exibir ainda, o aspecto superficial de “casca de laranja” (e.g. Flanders, 1994; Flanders, 1999; Maier e Scholger, 2004).

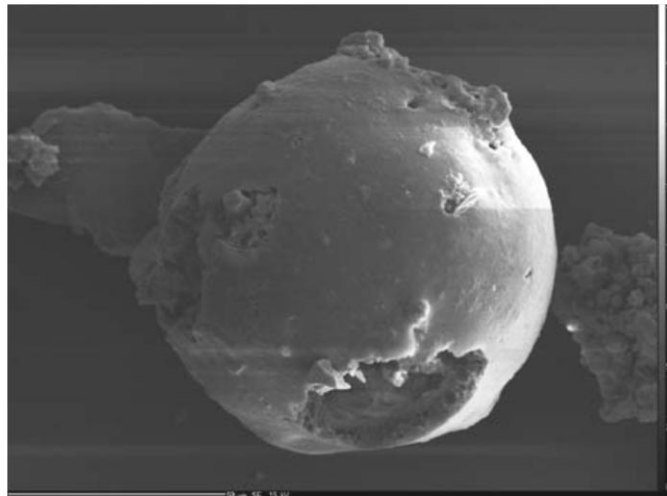


Fig. III.3 – Microfotografia de uma esférula rica em Fe, com cerca de 80 µm de diâmetro, encontrada na camada superficial dos solos de Ostrava (Fialová *et al.*, 2006).

A contribuição antropogénica de partículas magnéticas está relacionada com a queima de combustíveis fósseis e consequente produção de cinzas volantes que se depositam, a maior ou menor distância da fonte, contribuindo para o aumento do sinal magnético dos solos.

A medição das propriedades magnéticas nas várias fracções granulométricas do solo, conjugada com a observação de perfis verticais da susceptibilidade magnética, pode fornecer dados importantes sobre a origem do aumento do sinal magnético verificado nesses solos. A figura III.4 ilustra a variação da susceptibilidade magnética ( $\chi$ ) com a profundidade num solo pardo arenoso (“brown sand soil”) (Maher, 1986). Neste solo verifica-se um aumento do sinal magnético nas camadas superficiais; valores elevados da  $\chi$ , MRIs e MRA caracterizam esta camada relativamente a um sub-solo “magneticamente” pobre. Por outro lado, esta camada apresenta valores baixos da  $K_{fd}$  e relação  $MRA/\chi$ , e valores elevados para a relação  $MRIs/MRA$ .

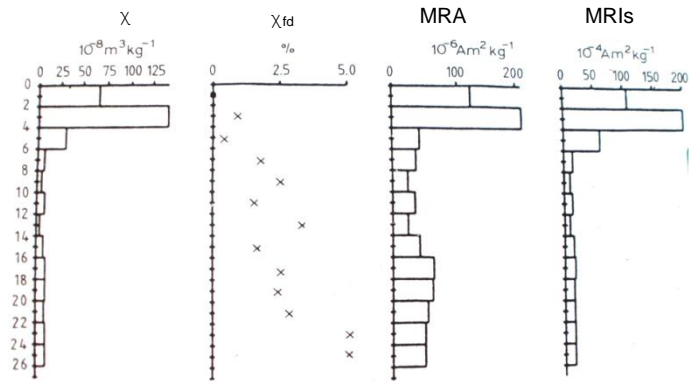


Fig. III.4 – Perfil de solo onde é visível o aumento do sinal magnético na parte superior (Maher, 1986).

Na zona inferior do perfil, estes valores diminuem uniformemente. Em contraste com a maior parte do perfil, os grãos superparamagnéticos estão ausentes da camada superficial. A baixa relação  $MRA/\chi$  pode reflectir a escassez de grãos DS em relação aos quais a MRA é particularmente sensível. Quando analisadas as propriedades magnéticas das diferentes fracções granulométricas destes solos, verifica-se que os valores mais altos estão associados com a fracção de silte. Isto sugere que o aumento da susceptibilidade magnética não se pode ser atribuída à formação pedogénica de magnetite, mas sim à deposição de partículas magnéticas poluentes, provenientes de actividades antrópicas e transportadas pela atmosfera (Maher, 1986). A contribuição antrópica, neste caso, é clara. Na tabela III.3 relaciona-se a origem das partículas magnéticas com a sua tipologia em termos de domínios magnéticos.

Tabela III.3 - Origem da magnetite/maghemite e greigite e relação com os domínios magnéticos (adaptado de Dearing, 1999).

	MD	PDS	DS	SP
<b>Origem primária</b>				
Magnetite/titanomagnetite	X	X	(X)	(X)
<b>Origem secundária</b>				
Combustíveis fósseis	X	X	(X)	(X)
Pedogénese	--	(X)	X	X
Bactérias magnetotáceis	--	(X)	X	(X)
Bactérias redutoras de ferro	--	--	--	X
Fogos	--	--	(X)	X
Greigite autigénica/biogénica	--	--	X	X

MD - multidomínio; PDS - pseudo domínio simples; DS - domínio simples; SP – superparamagnéticas; X – evidente; (X) - alguma evidência, pouco provável.



### III.3.1 Factores responsáveis pelo aumento das propriedades magnéticas dos solos

A contribuição antrópica não é o único factor responsável pelo aumento do sinal magnético nas camadas superficiais do solo. Existem outros factores que podem ser responsáveis por este aumento e que não estão relacionados com os níveis de poluição. A história da área deve ser conhecida no sentido de saber, entre outros, se ocorreram incêndios florestais (Le Borgne, 1955) ou qual o uso dado aos solos, se por exemplo, o solo foi utilizado para a agricultura e, em caso afirmativo, que práticas foram utilizadas. Nas duas situações podem ocorrer processos que induzem a formação de minerais ferromagnéticos *s.l.* Os óxidos de ferro formados na sequência de um incêndio podem persistir no solo por períodos que excedem os  $10^3$  anos (Rummery *et al.*, 1979) e, de acordo com Oldfield e Crowther (2007), é possível diferenciá-los dos óxidos de ferro formados no decurso dos processos pedogenéticos. As práticas agrícolas que envolvam a adição de matéria orgânica podem promover também a formação de minerais ferrimagnéticos. A matéria orgânica potencia reacções de fermentação que, por sua vez, induzem a redução do óxido férrico  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Este, posteriormente pode ser re-oxidado e formar-se  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (tabela III.4).

As alterações climáticas, com alternância entre períodos frios e húmidos e períodos secos e quentes, também podem estar na origem do aumento do sinal magnético, desde que esta alternância seja suficientemente rápida (Le Borgne, 1955). Do mesmo modo, as reacções inerentes ao processo da pedogénese, que envolvem a oxidação/redução de compostos de ferro, promovem a transformação de minerais antiferromagnéticos em ferrimagnéticos (Tite e Linington, 1975). O estudo do solo deve ser feito cuidadosamente, o que inclui, por exemplo, a observação de possíveis processos como gleização. Em solos pouco drenados, as temperaturas elevadas podem induzir a formação directa de maghemite, sem a formação de magnetite, enquanto fase intermédia, através da desidratação da lepidocrocite (Scheffer, 1959, cit. em Maher, 1986). Na tabela III.4 apresenta-se um resumo dos processos responsáveis pelo aumento do sinal magnético nas camadas superficiais do solo.

### III.4 ELEMENTOS TÓXICOS NOS SOLOS E SUA RELAÇÃO COM MINERAIS MAGNÉTICOS

Os elementos tóxicos constituem um grupo de elementos relativamente abundantes na crosta terrestre e são potencialmente perigosos para os seres vivos. Correspondem aos elementos com peso atómico mais elevado, de onde deriva a designação comum de “elementos pesados” tal como podemos encontrar, por exemplo, em Fergusson (1990). De acordo com o autor, estes elementos situam-se no bloco P da tabela periódica (figura III.5).



Tabela III.4 – Processos responsáveis pelo aumento da susceptibilidade magnética nos solos (Maher, 1998).

Mecanismo	Observações
<p style="text-align: center;"><b>Fermentação</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Óxidos de ferro pouco cristalinos</b></p> <p style="text-align: center;">Redução/oxidação  <math>\xrightarrow{\hspace{2cm}}</math> <math>\text{Fe}_3\text{O}_4 / \gamma\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p>	<p>Provavelmente é o processo mais significativo, mediado pela produção de <math>\text{Fe}^{2+}</math>, pelas bactérias reductoras de <math>\text{Fe}^{3+}</math>. São produzidos grãos muito finos de magnetite, susceptíveis de serem oxidados para maghemite.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Contribuição biogénica</b></p> <p style="text-align: center;"><b><math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math> de origem bacteriana, nas bactérias magnetotácteis</b></p>	<p>Os magnetossomas bacterianos ocorrem em muitos solos, mas a sua contribuição é pequena, em comparação com o processo de fermentação.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Fogos</b></p> <p style="text-align: center;">redução                  oxidação</p> <p><math>\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \xrightarrow{\hspace{1cm}} \text{Fe}_3\text{O}_4 \xrightarrow{\hspace{1cm}} \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3</math></p> <p><math>\alpha\text{-FeOOH} \xrightarrow{\hspace{1cm}} \text{Fe}_3\text{O}_4 \xrightarrow{\hspace{1cm}} \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3</math></p>	<p>Efeito pontual; o grau de aumento varia com o conteúdo em ferro, em matéria orgânica, com a temperatura atingida na queima e com a porosidade do solo.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Desidratação da lepidocrocite</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\gamma\text{-FeOOH} \xrightarrow{\hspace{1cm}} \text{Fe}_3\text{O}_4</math></p>	<p>Ocorre unicamente a altas temperaturas (&gt;200 °C), isto é, na sequência de fogos.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Deposição atmosférica de esférolas magnéticas</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Esférolas de <math>\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3</math> e <math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>, de origem industrial</b></p>	<p>Caracterizam-se pela morfologia esférica e pela dissociação da fracção argilosa dos solos.</p>

Este grupo, porém, não engloba todos os elementos vulgarmente designados por “metais pesados”, do qual fazem parte os metais considerados tóxicos. Estes são nocivos para a saúde, são bio-acumuláveis e os organismos não conseguem eliminá-los. O termo “metal pesado” é frequentemente utilizado como sinónimo de “metal tóxico”.



Metais como o Pb, o Hg e o Cd não desempenham qualquer tipo de função no organismo pelo que a sua acumulação pode provocar doenças graves. Por exemplo, o Hg e o Pb foram amplamente utilizados como cosméticos, para dar cor à pele (no caso do Hg, sob a forma de cinábrio) e ao cabelo (no caso do Pb) (Fergusson, 1990). Os metais pesados também tiveram, e ainda têm, utilização medicinal, embora actualmente se reconheça a sua toxicidade.

A presença de metais pesados nos solos pode ter origem natural, quando herdados do material originário, ou antrópica, que é a principal razão do aumento crescente da concentração de metais pesados em solos agrícolas. Os produtos utilizados na agricultura, como fertilizantes, correctivos, insecticidas, fungicidas e herbicidas, podem contê-los. Por exemplo, o Cu é um dos principais constituintes da Calda Bordalesa e o Zn e Mn fazem parte da composição dos fertilizantes. Os fertilizantes fosfatados podem conter Cd, Hg e As (Morel, 1990).

Quando solo, ar e água são contaminados por metais pesados, produzidos no decurso de actividades antrópicas, acabam por ser incorporados na cadeia alimentar podendo afectar a saúde e o bem-estar dos seres vivos. O teor total dos elementos no solo, incluindo os metais pesados, dificilmente fornece uma indicação válida sobre a sua disponibilidade para as plantas (Domingues *et al.*, 1989). A presença de metais pesados no solo só constituirá um factor de risco se: 1) a concentração desses elementos for elevada, ou seja, superior aos valores acima dos quais poderão ter consequências nocivas na saúde e bem-estar dos seres vivos, e 2) os valores do pH sejam tais que favoreçam a sua mobilidade e, conseqüentemente, a sua bio-disponibilidade. O pH é um dos factores mais importantes no controlo da taxa de absorção de elementos tóxicos pelas plantas (Morel, 1990).

Os valores-limite dos teores de metais pesados admissíveis nos solos são normalmente estabelecidos por legislação. No caso nacional, à data ainda não foi publicada legislação com essa finalidade, existindo no entanto documentos legais que podem servir como guia e que estabelecem os valores-limite para a concentração de metais pesados nos solos receptores de lamas e nas lamas para utilização na agricultura (Dec.-Lei nº 276/2009 de 2 de Outubro e Portaria nº 26/2006 de 23 de Março) (Anexo 3). Na tabela III.5 são apresentados esses valores para os solos.

Reimann e Caritat (1998) apresentam os valores médios de fundo do Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn para os solos mundiais e para solos agrícolas ingleses (fracção < 2 mm) (tabela III.6).

Tabela III.5 – Valores-limite de concentração de metais pesados nos solos (mg/kg de matéria seca)  
(Portaria nº 26/2006 de 23 de Março).

Parâmetro	Valores-limite em solos com		
	pH ≤ 6,0	6,0 < pH ≤ 7,0	pH > 7,0
<b>Cádmio</b>	1	3	4
<b>Cobre</b>	50	100	200
<b>Níquel</b>	30	75	110
<b>Chumbo</b>	50	300	450
<b>Zinco</b>	150	300	450
<b>Mercúrio</b>	1	1,5	2
<b>Crómio</b>	50	200	300

A relação entre metais pesados e minerais magnéticos estabelece-se a partir do momento em que, por exemplo, numa dada área existam unidades industriais que envolvam a queima de combustíveis fósseis, processo que liberta para atmosfera quantidades apreciáveis de cinzas e gases como resultado da oxidação da pirite, marcassite e siderite. A magnetite e a hematite são os óxidos de ferro mais frequentes associados a cinzas volantes produzidas em centrais termoeléctricas (Locke e Bertine, 1986).

As cinzas volantes, além da hematite e sobretudo da magnetite, que lhes conferem as propriedades magnéticas, contêm metais pesados, nomeadamente Cu, Cd, Zn, Mn, Ni, Mo, Pb, Co, Cr e V (Magiera *et al.*, 1998; Strzyszczyk e Magiera, 1998) e podem ainda conter As (Slager, 1993, cit. em Petrovský e Ellwood, 1999). Os metais pesados podem associar-se às partículas magnéticas de dois modos distintos: adsorvidos à superfície ou incorporados na estrutura cúbica da espinela (Taylor *et al.*, 1987; Kapička *et al.*, 1999). O Pb é adsorvido especialmente pelos hidróxidos de ferro (Forstner, 1977 cit. em Brilhante *et al.*, 1989).

Além das centrais termoeléctricas, o tráfego automóvel constitui outra fonte importante de partículas poluentes que afectam com maior intensidade os solos na proximidade das vias rodoviárias. O Pb, utilizado até há poucos anos como aditivo da gasolina, é um exemplo típico, mas outros elementos tóxicos, como por exemplo o Cd, o Cu, o Zn e o Ni resultam também da circulação automóvel. Estes últimos provêm directamente das viaturas (carroçaria, sistemas de exaustão, pneus, sistemas de travagem e sistemas eléctricos, entre outros) e, indirectamente, da abrasão dos materiais utilizados na pavimentação das estradas (Lygren *et al.*, 1984). Johnston e Harrison (1984) estudaram as taxas de deposição de Pb, Cd e Cu na proximidade de uma auto-estrada inglesa, e verificaram que estes materiais, provenientes do tráfego rodoviário, se depositam preferencialmente numa faixa de cerca de 15 metros para cada um dos lados da estrada.

Tabela III.6 – Concentrações de metais pesados em solos (mgkg<sup>-1</sup>) (adaptado de Reinman e Caritat, 1998).

<b>Cobalto</b> - Essencial. Entra na composição da vitamina B12. Tóxico para os humanos em doses superiores a 25 mg/dia. As poeiras de Co são cancerígenas. <i>Fontes:</i> minas de Fe, Ni, Ag, Pb e Cu, queima de carvão, fertilizantes.			
Mundo	Média 10,0*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 - 15 cm Inglaterra	9,8	0,2	322,0
<b>Crômio</b> – na forma iônica, Cr <sup>3+</sup> , é considerado relativamente perigoso, e Cr <sup>6+</sup> é muito tóxico; alguns compostos de Cr <sup>6+</sup> são cancerígenos. <i>Fontes:</i> indústria química, metalurgias, queima de combustíveis fósseis, incineração de lixos, fertilizantes.			
Mundo	Média 80,0*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 - 15 cm Inglaterra	39,3	0,2	838,0
<b>Cobre</b> - Essencial. Tóxico em doses elevadas. <i>Fontes:</i> minas e fundições de Cu, indústria de plásticos, bactericidas, fungicidas e insecticidas, circulação automóvel.			
Mundo	Média 25,0*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 - 15 cm Inglaterra	18,1	1,2	1508,0
<b>Cádmio</b> – Essencial para alguns animais em concentrações muito baixas. Tóxico em doses elevadas. <i>Fonte:</i> queima de carvão, fundições (Zn e Cu), siderurgias, fertilizantes, circulação automóvel, incineração de lixos.			
Mundo	Média 0,30*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 – 15 cm Inglaterra	0,71	<0,20	40,90
<b>Níquel</b> - Essencial para alguns organismos. Os compostos de Ni <sup>2+</sup> são relativamente não-tóxicos. Alguns outros compostos são extremamente tóxicos e/ou cancerígenos. É conhecido como responsável por alergias. <i>Fontes:</i> fundições de Cu e Ni, indústria química, fabrico de aço, fertilizantes, circulação automóvel, incineração de lixos.			
Mundo	Média 20,0*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 - 15 cm Inglaterra	22,6	0,8	440,0
<b>Chumbo</b> - Considerado não-essencial. Tóxico. <i>Fontes:</i> circulação automóvel, queima de carvão, incineração de lixos, fabrico de aço, tintas.			
Mundo	Média 17,0*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 - 15 cm Inglaterra	40,0	3,0	16338,0
<b>Zinco</b> - Essencial para todos os organismos. Toxicidade baixa; a sua deficiência é mais prejudicial. Não é considerado cancerígeno, mas a taxa de crescimento de tumores é afectada pela ingestão de Zn. <i>Fontes:</i> fundições de Zn, combustão, circulação automóvel,			
Mundo	Média 70,0*	Min. -	Máx. -
Solos agrícolas – 0 - 15 cm Inglaterra	82,0	5,0	3648,0

\* média estimada

### III.5 PARÂMETROS MAGNÉTICOS E RELAÇÕES FREQUENTEMENTE UTILIZADOS EM ESTUDOS DE SOLOS

A investigação sobre as propriedades magnéticas, através da medição de vários parâmetros (e.g. susceptibilidade, magnetização anisterética, variação da susceptibilidade com a frequência do campo aplicado e magnetização de saturação) pode fornecer dados sobre o processo de formação do solo em causa, permitir distinguir entre diferentes tipos de solos e até individualizar horizontes. Num estudo efectuado em vários tipos de solos, Maher (1986) refere que a dissolução de minerais ferrimagnéticos prevalece em relação à formação deste tipo de minerais em solos cujo processo pedogenético principal é a podzolização. Os horizontes eluviais, característicos deste tipo de solos não contêm praticamente minerais magnéticos e as variações na forma como os compostos de ferro precipitam nos horizontes iluviais subjacentes reflectem as diferentes características pedológicas destes horizontes. Por outro lado, em solos onde ocorrem processos de gleização, a dissolução da magnetite parece estar relacionada com granulometrias específicas, verificando-se preferencialmente em grãos superparamagnéticos ou de domínio simples (ultrafinos a finos). Na tabela III.7 listam-se os parâmetros magnéticos básicos que podem fornecer informação sobre a mineralogia magnética, a granulomeria e a concentração dos principais óxidos de ferro magnéticos.

#### **Susceptibilidade magnética ( $\chi$ ,K)**

A susceptibilidade magnética (Cap.II - secção II.4.2) é um dos parâmetros mais utilizado em estudos de magnetismo ambiental e tem sido utilizada em praticamente todos os campos de pesquisa ambiental como, por exemplo, climatologia, pedologia, hidrologia, limnologia, geomorfologia, estratigrafia, oceanografia e sedimentologia.

A medição da susceptibilidade magnética permite-nos obter muita informação acerca dos materiais, à semelhança de outras técnicas como a difracção de raio-X ou as análises químicas. Nomeadamente, permite-nos identificar os minerais contendo Fe, estimar a sua concentração (concentrações na ordem de 1 ppb são facilmente detectadas, Thompson *et al.*, 1980), classificar diferentes tipos de materiais e identificar os processos envolvidos na sua transformação e transporte (Dearing, 1999).

A medição da susceptibilidade magnética é um processo simples e rápido e não envolve a utilização de equipamentos complexos e dispendiosos. Pode ser feita em vários tipos de materiais (rochas, solos, sedimentos, partículas atmosféricas e materiais biológicos), é segura, rápida e não destrutiva e tem a vantagem de poder ser feita quer no campo quer em laboratório.

Tabela III.7 - Parâmetros magnéticos que dão indicações sobre a mineralogia, granulometria e concentração dos minerais magnéticos nos solos (adaptado de Jordanova *et al.*, 2010).

Parâmetro magnético	Significado em estudos sobre solos
<b>Susceptibilidade magnética de baixo-campo (<math>\chi_{lf}</math>)</b>	Reflete a concentração de óxidos de ferro fortemente magnéticos (magnetite, maghemite, greigite)
<b>Susceptibilidade magnética de alto – campo (<math>\chi_{hf}</math>)</b>	Indica a contribuição relativa de minerais paramagnéticos, diamagnéticos e anti-ferromagnéticos para a susceptibilidade de baixo-campo total
<b>Variação da susceptibilidade com a frequência do campo (<math>\chi_{fd\%}</math>)</b>	Indica a presença de grãos superparamagnéticos (SP).
<b>Magnetização Remanescente Isotérmica de Saturação (<math>MRI_s</math>)</b>	Indica a presença de grãos magnéticos portadores de magnetização remanescente estável.
<b>Magnetização Anisterética (MRA)</b>	Indica a presença de grãos de domínio-simples (DS) estáveis (para a magnetite $d \approx 0.5 \mu m$ )
<b>Quocientes S</b>	Dão informação sobre a contribuição das fases anti-ferromagnéticas para o valor total da MRI (e.g. presença de hematite e/ou goethite)
<b>Quociente L</b>	Dá indicações de variações da coercividade para as amostras com mineralogia magnética mista (por exemplo, magnetite e hematite).
<b><math>MRA/MRI_s</math></b>	Permite avaliar sobre a importância de partículas estáveis DS (a maior parte de origem pedogénica) relativamente a partículas de dimensões maiores (multi-domínio).
<b><math>MRA/\chi</math></b>	Reflete alterações no tamanho dos grãos magnéticos na situação de mineralogia uniforme
<b><math>\chi_{MRA}</math></b>	Tem tendência a aumentar quando os grãos DS são os principais portadores de magnetização
<b><math>MRI_s/\chi</math></b>	Dá indicações sobre a granulometria e composição das partículas
<b>“Hard” MRI e “Soft” MRI</b>	Dá indicações sobre a presença de minerais antiferromagnéticos e ferrimagnéticos.

A susceptibilidade magnética pode ser expressa por volume (adimensional) e por massa ( $m^3 kg^{-1}$ ). Quando expressa por massa, é possível fazer comparações entre medições referentes a diferentes amostras de um modo mais fidedigno. Na tabela III.8 apresentam-se os valores típicos da susceptibilidade para alguns materiais que, no caso da susceptibilidade por volume, devem servir só como valores-guia (Dearing, 1999).



Tabela III.8 – Valores da susceptibilidade para alguns materiais (Dearing, 1999).

Material	Massa (g)	Susceptibilidade por volume ( $\kappa$ ) ( $10^{-5}$ )	Susceptibilidade específica por massa ( $\chi$ ) ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )
Água	10,0	-0,9	-0,009
Amostra de calibração	12,0	150,0	1,25
Fita de cassete (de ferro)	1,0	1000,0	100,0
Lã de aço	2,5	4000,0	160,0

A medição da susceptibilidade magnética em solos superficiais tem sido aplicada com sucesso no mapeamento do grau de poluição antrópica na periferia de unidades industriais como metalurgias, cimenteiras, centrais térmicas e também nas imediações de vias rodoviárias (Knab *et al.*, 1998; Hoffmann *et al.*, 1999; Petrovský *et al.*, 2000; Goluchowska, 2001; Lourenço, 2003; Veneva *et al.*, 2004).

#### Susceptibilidade dependente do campo ( $\chi_{fd}$ )

A variação da susceptibilidade com a frequência do campo magnético aplicado,  $\chi_{fd}$ , ( $\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100$ ), permite avaliar a presença de grãos magnéticos ultra-finos (Dearing *et al.*, 1996). Este parâmetro, que envolve duas leituras da  $\chi$  obtidas por aplicação de dois campos magnéticos com diferentes frequências (0,47 e 4.70 kHz), depende da ocorrência de grãos superparamagnéticos, cujas propriedades se tornam muito dependentes do seu tamanho. Grãos de maiores dimensões já não são afectados por variações na frequência do campo. Consequentemente, este parâmetro pode ser utilizado para estimar a proporção de grãos magnéticos de granulometria muito fina (e.g. Rubio *et al.*, 2001) que ocorrem nos solos como resultado de processos pedogenéticos. Valores de  $\chi_{fd}$  elevados (>10 %) sugerem uma contribuição importante de partículas superparamagnéticas (e.g. Mohamed *et al.*, 2001). Na tabela III.9 relacionam-se os valores da  $\chi_{fd}$ , com a granulometria das partículas.

#### MRIs

A magnetização de saturação pode fornecer informação sobre a composição das partículas presentes na amostra. Minerais ferrimagnéticos como a magnetite e a maghemite saturam em campos na ordem dos 300 mT, enquanto minerais antiferromagnéticos como a hematite e a goethite saturam em campos na ordem dos 2,5 T. Em muitos laboratórios só se conseguem obter campos de 1 - 2 T, pelo que a saturação, ou não saturação, atingida em



campos nesta ordem de valores pode ser utilizada para distinguir entre minerais ferrimagnéticos e antiferromagnéticos.

Tabela III.9 – Interpretação dos valores da  $\chi_{fd}$ , (adaptado de Dearing, 1999).

$\chi_{fd}$	%	Amostra
<b>baixa</b>	< 2,0	Sem grãos SP ou com baixa percentagem (< 10%)
<b>média</b>	2,0 – 10,0	Com mistura de grãos SP e grãos de granulometria maior
<b>alta</b>	10,0 – 14,0	Constituída praticamente só por grãos SP (> 75%)
<b>muito elevada</b>	> 14,0	Valores muito raros, medições erradas

### Quociente MRIs/ $\chi$

A relação entre os dois parâmetros MRIs e  $\chi$  permite detectar alterações quer na granulometria quer no tipo de minerais magnéticos presentes num conjunto de amostras. Por exemplo, para a hematite este quociente tem valores na ordem dos 200  $\text{kAm}^{-1}$ , e para a magnetite, pode variar de 1,5 até  $\approx 50 \text{ kAm}^{-1}$ , à medida que diminui a granulometria. Amostras com concentração elevada de grãos superparamagnéticos exibem valores para este quociente abaixo dos 0,01  $\text{kAm}^{-1}$  (Thompson *et al.*, 1980). Quando a mineralogia magnética é homogénea, a razão MRIs/ $\chi$  indica alterações no tamanho do grão ou na contribuição de minerais paramagnéticos (ex. argilas) (Moreno *et al.*, 2003). De acordo com Maher (1986), esta relação pode diagnosticar quer a mineralogia (por exemplo, uma relação muito baixa - teoricamente igual a zero – indicaria a presença de grãos superparamagnéticos) ou, nos casos em que as amostras tenham tipos de minerais e concentrações semelhantes, a dimensão dos grãos magnéticos. Peters e Dekkers (2003) referem que a razão entre magnetização remanescente de saturação e a susceptibilidade é adequada para avaliar a mineralogia: para minerais de baixa coercividade, valores elevados são indicativos da presença de pirrotite; valores intermédios são indicativos de greigite e maghemite, e valores muito baixos sugerem a presença de (titano)magnetite.

### Quocientes S

Os quocientes S, comumente denominados S-ratios, representam o valor obtido para a magnetização de uma amostra, depois de saturada e exposta a um campo inverso, dividido pelo valor da magnetização de saturação (adquirida para um campo de 1 - 2 T). Por exemplo,  $S_{-300}$  é definido como  $S_{-300} = \text{MRI}_{-300 \text{ mT}} / \text{MRIs}$ .

Minerais ferrimagnéticos como a magnetite exibem valores  $\approx 1$  para este quociente. Quanto mais baixo for o  $S_{-300}$ , maior é o teor em minerais antiferromagnéticos, como a hematite.

Os quocientes  $S_{-300}$  e  $S_{-100}$  ( $S_{-100} = \text{MRI}_{-100 \text{ mT}}/\text{MRIs}$ ) são quocientes frequentemente determinados (e.g. Chaparro *et al.*, 2003, Moreno *et al.*, 2003) mas também é comum determinar-se os quocientes  $S_{-20}$  e  $S_{-200}$  (e.g. Jordanova *et al.*, 1997; Lecoanet *et al.*, 2003; Alagarsamy, 2009). Um mineral “soft” (por exemplo, magnetite) satura facilmente para campos muito baixos (e.g.  $\text{MRI}_{-20 \text{ mT}}/\text{MRIs} \approx 90\%$ ). Um mineral “hard” (e.g. hematite) só se magnetiza na presença de campos elevados (e.g.  $\text{MRI}_{-20 \text{ mT}}/\text{MRIs} < 5\%$  e  $\text{MRI}_{-300 \text{ mT}}/\text{MRIs} \approx 30\%$ ) (Maher, 2011).

### Hard MRI e Soft MRI

Os parâmetros “Hard” MRI (HMRI) e “Soft” MRI (SMRI), à semelhança dos quocientes  $S$ , são utilizados para estimar a concentração dos minerais ferrimagnéticos e antiferromagnéticos presentes na amostra e definem-se do seguinte modo:

- 1)  $\text{HMRI} = 0,5 \times (\text{MRIs} + \text{MRI}_{-300 \text{ mT}})$   
(e.g. Liu *et al.*, 2007; Horng *et al.*, 2008; Alagarsamy, 2009),
- 2)  $\text{HMRI} = \text{MRIs} - \text{MRI}_{300 \text{ mT}}$   
(Lu *et al.*, 2005),
- e
- 3)  $\text{SMRI} = 0,5 \times (\text{MRIs} + \text{MRI}_{-20 \text{ mT}})$   
(e.g. Xie *et al.*, 2001; Lecoanet *et al.*, 2003).

A HMRI baseia-se na quantidade de magnetização que permanece numa amostra previamente saturada, depois de exposta a um campo inverso de 300 mT. Para campos na ordem dos 300 mT, a maior parte dos minerais ferrimagnéticos “soft” (de baixa coercividade) já saturaram e qualquer aumento subsequente da MRI é devido à componente “hard”, ou seja, aos minerais antiferromagnéticos (de elevada coercividade). Este valor é, assim, aproximadamente proporcional à concentração de minerais antiferromagnéticos (e.g. hematite) presentes na amostra (Walden e Ballantyne, 2002; Liu *et al.*, 2007).

A SMRI baseia-se na quantidade de magnetização perdida por uma amostra saturada depois de exposta a um campo inverso de -20 mT. Para campos tão baixos, os minerais antiferromagnéticos, como a hematite e a goetite, já não contribuem para a MRI. Este valor é, pois, aproximadamente proporcional à concentração de minerais “soft”, minerais ferrimagnéticos como por exemplo a magnetite (Walden e Ballantyne, 2002).

### Quociente L

O quociente L é definido, de acordo com Liu *et al.* (2007), como:

$$L = \text{MRI}_{\text{AF@-300 mT}} / \text{MRI}_{\text{AF@-100 mT}},$$

em que  $\text{MRI}_{\text{AF@-300 mT}}$  e  $\text{MRI}_{\text{AF@-100 mT}}$  são as magnetizações remanescentes obtidas após a aplicação de campo alternos de 300 mT e 100 mT, respectivamente, a uma amostra magnetizada a 1 T. Estes parâmetros são facilmente determinados com a utilização de magnetômetros por campos alternos. O quociente L pode ser determinado com a utilização de termos equivalentes, dependendo dos instrumentos disponíveis e dos protocolos de medição. Assim,  $\text{MRI}_{\text{AF@-300 mT}}$  é equivalente a HIRM e  $\text{MRI}_{\text{AF@-100 mT}}$  é equivalente a  $0,5x$  ( $\text{MRIs} + \text{MRI}_{-100 \text{ mT}}$ ). Este quociente foi proposto por Liu *et al.* (2007) com a finalidade de clarificar a interpretação dos quocientes S e HMRI, sempre que a componente antiferromagnética apresente uma grande variação na coercividade. Segundo os autores, o pressuposto base da utilização destes parâmetros é o de que a hematite e a goethite saturam para campos superiores a 300 mT mas, em função do teor de alumínio que estes minerais possam conter, as suas coercividades são muito variadas e conseqüentemente, os valores da HMRI e quociente S também variam muito. Os quocientes L dão indicações sobre variações nas coercividades, o que provavelmente estará relacionado com fontes diferenciadas de hematite e goethite. O quociente L permite uma semi-quantificação das variações da coercividade permitindo determinar os casos em que os parâmetros HMRI e quociente S possam ser utilizados sem ambigüidades. Em Ao *et al.* (2010) o quociente L também é definido como  $\text{HMRI}^* / \text{MRI}_{1\text{T}, \text{AF@100mT}}$ , em que  $\text{HMRI}^*$  é definida como  $\text{MRI}_{1\text{T}} - \text{MRI}_{0,3\text{T}}$  e  $\text{MRI}_{1\text{T}, \text{AF@100 mT}}$  representa a magnetização residual depois da desmagnetização a 100 mT da magnetização adquirida a 1 T.

### Susceptibilidade da magnetização anisterética ( $\chi_{\text{MRA}}$ )

A  $\chi_{\text{MRA}}$  define-se como a relação entre a MRA e o campo dc aplicado (H):

$$\chi_{\text{MRA}} = \text{ARM}/\text{H}.$$

Este quociente é particularmente sensível à presença de grãos de pequena dimensão, grãos DS (0,03 - 0,07  $\mu\text{m}$ ) (Maher e Taylor, 1988), por outro lado a  $\chi$  é relativamente mais sensível à presença de grãos de dimensões maiores (MD). Os gráficos  $\chi_{\text{MRA}}/\chi$  permitem obter informação sobre a granulometria. Mudanças no declive do gráfico indicam variações na granulometria das partículas magnéticas e alterações ao longo de uma linha de declive constante indicam alterações na concentração das partículas magnéticas (Verosub e Roberts, 1995).

## **Capítulo IV**

# **CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

### IV.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A área de estudo, com cerca de 400 km<sup>2</sup>, localiza-se entre a cidade de Coimbra e a vila de Montemor-o-Velho, na zona central de Portugal continental (figura IV.1). Está coberta pelas folhas n.ºs 229, 230, 240 e 241 da Carta Militar 1/25 000 dos Serviços Cartográficos do Instituto Geográfico do Exército (figura IV.2).

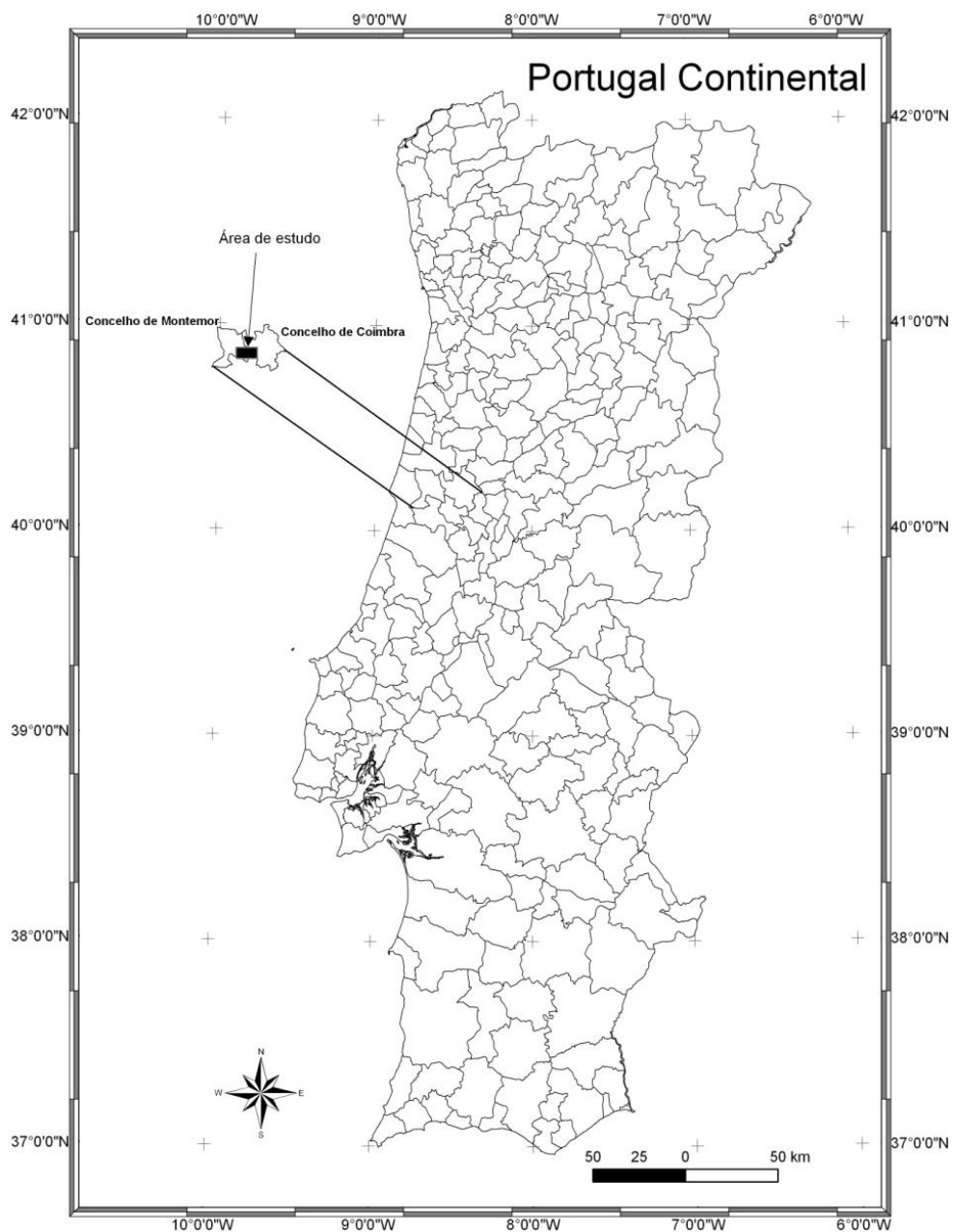


Fig. IV.1 – Localização da área de estudo.



A maior parte da área de estudo situa-se no concelho de Coimbra e uma pequena parte abrange o concelho de Montemor-o-Velho. O concelho de Coimbra tem uma área de cerca de 319 km<sup>2</sup> com uma população residente de 143 052 habitantes; o concelho de Montemor-o-Velho tem uma área de 235 km<sup>2</sup> e uma população residente de 26 214 habitantes (de acordo com os dados do Census 2011, disponibilizados no portal do I.N.E - Instituto Nacional de Estatística, em <http://censos.ine.pt/xportal/>).

A actividade económica da região centra-se sobretudo no sector dos Serviços, Saúde e Educação. Das empresas com sede na região destacam-se as ligadas à Construção e Indústria Transformadora, no que respeita ao sector secundário, as de Comércio por Grosso e a Retalho (estas as mais representativas) e Actividades Imobiliárias, no que respeita ao sector terciário (Santos, 2004).

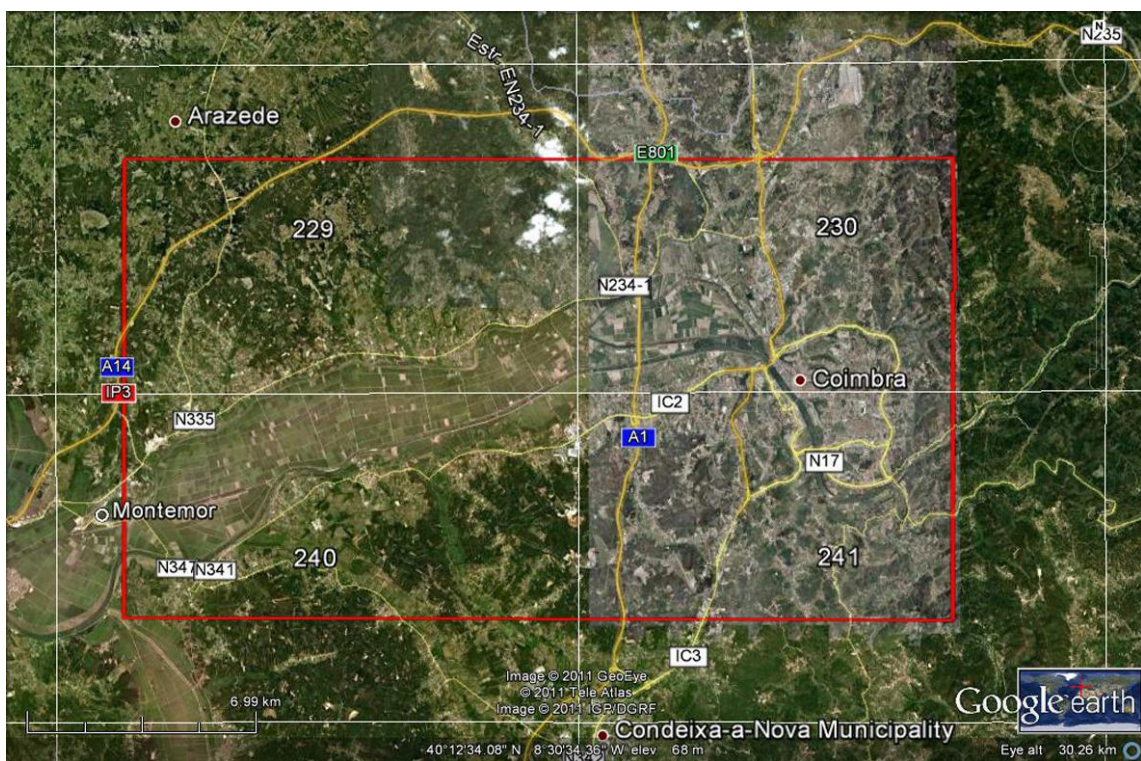


Fig. IV.2 – Enquadramento cartográfico à escala 1/25 000 — Limite da área de estudo  
(Fonte: Google Earth, acedido em 02/05/2011).

## IV.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

### IV.2.1 Geologia

Na área de estudo confinam duas unidades geologicamente bem distintas, o *Maciço Hespérico* e a *Orla Meso-Cenozóica Ocidental*. Esta situação é bem demarcada também pela variação acentuada do relevo. Para Oeste, até à linha de costa, desenvolvem-se

terrenos de relevo suave, representados por sedimentos mesozóicos e cenozóicos, com cerca de 5000 m de espessura e "materializadores de algo como  $225\pm 10$  Ma" (Soares e Gomes, 1997). Para Este, os terrenos pré-câmbrios e paleozóicos, anteriores talvez aos  $280\pm 10$  Ma, assumem-se em relevo acidentado (na ordem dos 500 m), de orientação aproximadamente N-S, constituindo o *Maciço Marginal de Coimbra*. Com efeito, a Nascente de Coimbra, ergue-se o Maciço com o mesmo nome, um complexo "horst" de direcção meridiana, cuja explicação morfológica assenta sobretudo na arquitectura da fracturação meridiana a submeridiana (NNE-SSW), paralela à *Falha de Coimbra* (Cunha e Soares, 1997).

#### IV.2.1.1 Cartografia geológica na área de estudo

A área está coberta parcialmente pelas folhas 19-A, 19-C e 19-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (figura IV.3). No quadrante NE, a norte do centro urbano de Coimbra, existe cartografia à escala 1/25 000 (Carta Geológica de Coimbra (Norte), Soares *et al.*, 1985).

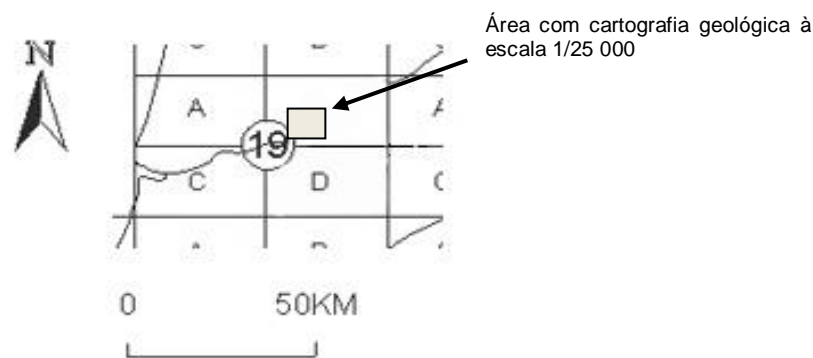


Fig. IV.3 – Enquadramento cartográfico 1/50 000 e 1/25 000 da área de estudo.

Apenas a cartografia geológica à escala 1/500 000 (figura IV.4) abrange a totalidade da área de estudo (Folha Norte da Carta Geológica de Portugal, na escala 1/500 000). Na figura IV.5 apresenta-se um mapa composto a partir da cartografia disponível à escala 1/50 000. Não existe continuidade entre as manchas geológicas de cartas adjacentes, no que diz respeito aos limites, bem como à simbologia utilizada nas cartas. Não é apresentada a legenda das cartas que nela figuram devido à sua extensão, podendo ser consultada em Barbosa *et al.* (1988) (carta 19-A), Rocha *et al.* (1981) (folha 19-C) e Soares *et al.* (2007) (folha 19-D). As denominações das unidades geológicas são igualmente distintas de carta para carta o que dificulta a descrição-síntese das unidades aflorantes. Deste modo, nesta descrição, simplificada porque fora do nosso propósito, utilizar-se-á a terminologia constante da Notícia Explicativa da folha 19-D da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000, respeitante à área de Coimbra-Lousã, da autoria de Soares *et al.* (2007) e, sempre que

possível, será feita a correspondência com as denominações que constam na Carta Geológica de Coimbra Norte, à escala 1/25 000 (Soares *et al.*, 1985), e nas folhas 19-C-Figueira da Foz (Rocha *et al.*, 1981) e 19-A-Cantanhede (Barbosa *et al.*, 1988) da Carta Geológica de Portugal 1/50 000. Em anexo, é apresentada uma tabela em que se correlacionam as unidades geológicas que afloram na área de estudo, e apenas estas, tal como são designadas nos diferentes documentos acima mencionados (Anexo 4).

A Carta Geológica de Coimbra Norte, à escala 1/25 000 (Soares *et al.*, 1985), constitui um precioso documento que nos elucida de um modo mais detalhado quanto à geologia da área de Coimbra Norte (cerca de 30 km<sup>2</sup>) (figura IV.6). A descrição pormenorizada das unidades consideradas, em termos das suas características litológicas e conteúdo paleontológico, pode ser consultada neste trabalho. Em Tavares (1999) pode igualmente ser consultada uma descrição detalhada sobre as litologias presentes (figura IV.7) e, ainda, uma resenha de vários trabalhos publicados sobre a zona em questão.

Na área em apreço e de este para oeste, temos como unidades mais antigas os metassedimentos ante-mesozóicos, constituídos por uma alternância de filitos negros ou cinzentos escuros e metagrauvaques ou metaquartzograuvaques de espessuras centimétricas a decimétricas. Esta sequência metassedimentar constitui a *Série Negra* que para leste, próximo do contacto com o *Grupo das Beiras*, se materializa por um conjunto de massas, diques e filões de rochas básicas, representado os termos hipabissais das sequências metavulcânicas do topo da *Série Negra* (Soares *et al.*, 2007).

O contacto entre estes dois conjuntos estabelece-se por falha que, nesta região, marca a transição da Zona Centro Ibérica para a Zona da Ossa Morena. Para este, contacta em discordância angular (Soares *et al.*, 1985), com o *Grupo de Silves* (*corresponde ao "Grés de Silves"* de Choffat, 1880) que se organiza pela articulação de formações de fácies essencialmente areno-conglomeráticas, na base, passando a termos carbonatados para o topo, com idades desde o Triásico Superior ao Jurássico Inferior. O Grupo de Silves é a unidade mais antiga da Orla Meso-Cenozóica e constitui uma faixa alongada que se prolonga, com orientação Norte-Sul, desde a linha de Macinhata do Vouga-Angeja, a norte de Aveiro, até Tomar (Santos, 2009) e cuja largura ultrapassa os 3 km na zona de Anadia, sendo apenas visível ao longo dos vales fluviais (Dinis, 2004). O perfil-tipo do *Grupo de Silves*, segundo a interpretação de vários autores, está descrito na tabela IV.1.







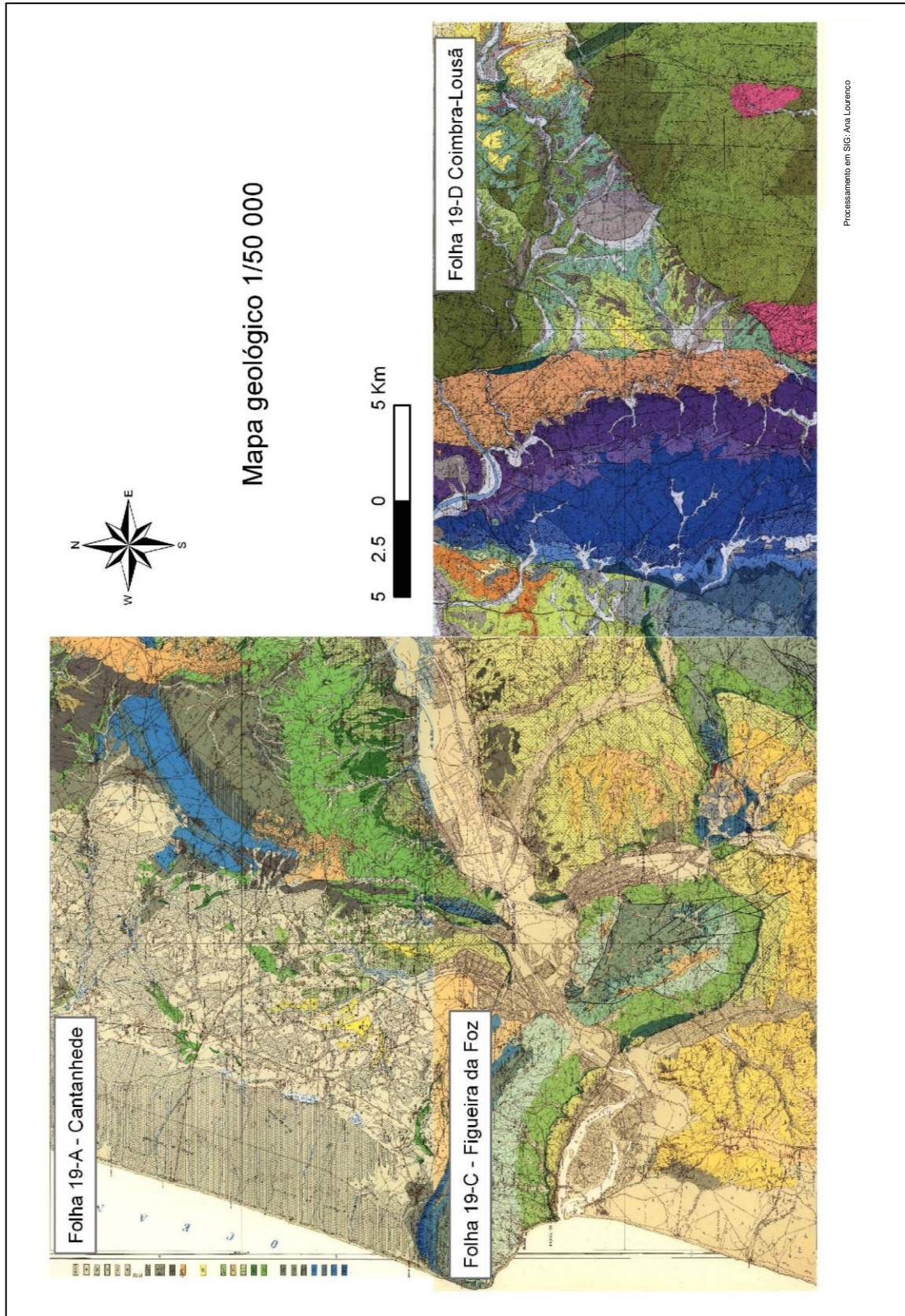


Fig. IV.5 – Cartografia geológica à escala 1/50 000 (Fonte: Carta Geológica de Portugal, folhas 19-A e 19-C, Serviços Geológicos de Portugal e folha 19-D, INETI).

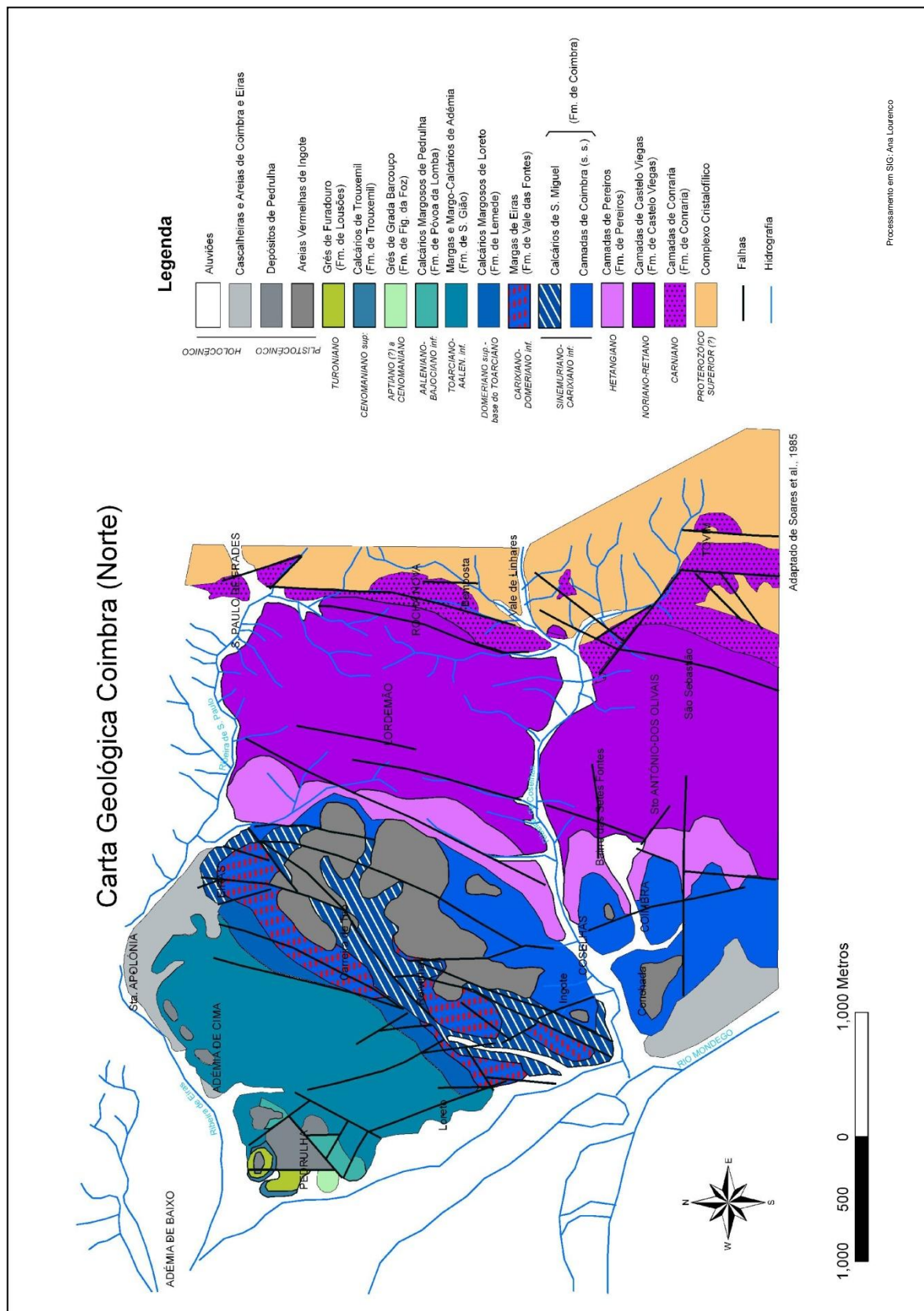


Fig. IV.6 – Carta Geológica à escala 1/25 000 da zona a norte de Coimbra (adaptado de Soares *et al.*, 1985).

Tabela IV.1 – Interpretações sobre a organização do Grupo de Silves (Soares *et al.*, 2007).

Choffat (1880-1894)	Carvalho (1951)	Palain (1976)	Soares <i>et al.</i> (1985)	Gomes (1996)	Rocha <i>et al.</i> (1996)	
Couches de Pereiros (115-135 m)	Camadas de Pereiros	C2	Camadas de Pereiros (50-60 m)	Formação de Pereiros	HETANGIANO	Margas e dolomias gresosas
		C1 (10 m)				Grés com <i>Clathropteris Meniscoides</i>
		B2 (5-4 m)				Dolomias gresosas com <i>Isocyprina e Promathildia</i>
Grès à nuances claires (100-150 m)	Camadas de Castelo Viegas (200m)	B B1 (210± 20 m)	Grés de Silves	Formação de Castelo Viegas	TRIÁSICO SUP. - MÉD.	Formação de Castelo Viegas (260±35m)
Grès à rouge brique (200-250 m)	Camadas de Conraria (420m)	A A2 (80 m) A1 (100-140 m)	(Grupo) Grés de Silves	Formação de Conraria		
					GRUPO DE SILVES	



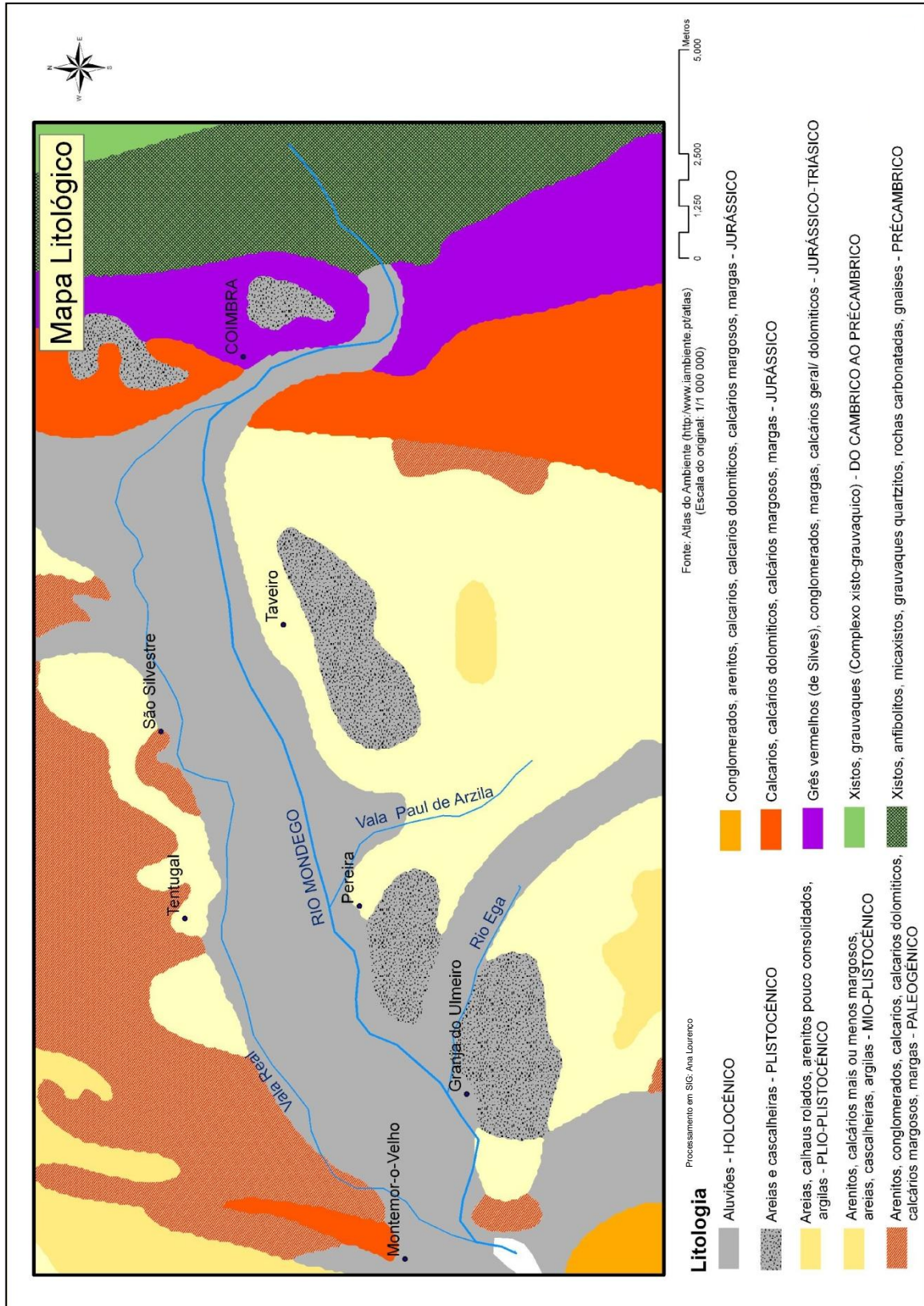


Fig. IV.7 – Unidades litológicas na área de estudo (Fonte: Carta Litológica à escala 1/1 000 000, Atlas do Ambiente, <http://www.iambiente.pt/atlas>).

A base do *Grupo de Silves* é constituída pela *Formação de Conraria* (= *Camadas de Conraria*, Soares *et al.*, 1985), unidade que assenta em discordância sobre as unidades pré-câmbricas e paleozóicas e que na zona de Coimbra atinge a espessura de  $120 \pm 5$  m. Na base é formada essencialmente por materiais areno-conglomeráticos, imaturos, de coloração vermelha (sub-unidade inferior), passando progressivamente a termos mais finos compostos por areno-pelitos a pelitos laminados, com cores vermelho violáceo e/ou cinzentas, que interstratificam com arenitos arcósicos finos e com termos de composição dolomítica (sub-unidade superior). A sua formação corresponde à organização de uma planície aluvial, com áreas de encharcamento salino e subsidência preferencial. À *Formação de Conraria* sobrepõe-se a *Formação de Castelo Viegas* (= *Camadas de Castelo Viegas*, Soares *et al.*, 1985) cuja base é composta por corpos arcósicos a sub-arcósicos, grosseiros, imaturos, de cor vermelha-acastanhada. Na Conraria, o topo desta sub-unidade é semelhante ao da sub-unidade superior da *Formação de Conraria*, com corpos areno-pelíticos e pelíticos laminados, cinzentos e/ou violáceos que interstratificam com bancadas de subarcosés e dolomitos. Na sub-unidade superior da *Formação de Castelo Viegas*, organizam-se corpos de arenitos de cor esbranquiçada ou amarelada, ricos em feldspato. Segue-lhe a *Formação de Pereiros* (= *Camadas de Pereiros*, Soares *et al.*, 1985) cujas camadas são “essencialmente gresosas e greso-margosas a greso-dolomíticas na base e mais margosas a calco-dolomítica para o topo” (Soares *et al.* 1985), consideram-se três sub-unidades: 1) Dolomias gresosas com *Isocyprina* e *Promathildia* – com interstratificação de pelitos, arenitos e dolomitos com cores cinzentas, amarelas e /ou amarelo-acastanhado; 2) Grés com *Clathroperis meniscoides* – arcosarenitos esbranquiçados a acastanhados, médios a muito grosseiros, imaturos; e 3) Margas e dolomias gresosas - pelitos areno-margosos, cinzentos e/ou violáceos, que interstratificam com grés dolomítico e/ou dolomia gresosa.

Em contacto com o Grupo de Silves e para oeste deste afloram, em faixa alongada e paralela à mancha do grupo anterior, um conjunto de formações essencialmente carbonatadas e dolomíticas de idades compreendidas entre o Sinemuriano e o Carixiano Inferior, com espessura na ordem dos 180 a 220 m e que recebem a denominação de *Grupo de Coimbra* (Soares *et al.*, 2007). Correspondem às *Camadas de Coimbra* em Soares *et al.*, 1985. Da base para o topo, compreendem as sub-unidades *Camadas de Coimbra s.s.* e *Camadas de S. Miguel*. As primeiras são essencialmente dolomíticas, ao passo que as segundas são predominantemente calcárias. Na base das *Camadas de Coimbra s.s.* observam-se bancadas espessas de dolomias amarelo-acastanhadas (que foram utilizadas na construção de vários monumentos da cidade, por exemplo, a Sé Velha e a Igreja de St.<sup>a</sup> Cruz). Para o topo, sucedem-lhes bancadas métricas de calcários dolo-margosos e/ou margosos, de cores claras, esbranquiçadas a acinzentadas. As *Camadas de S. Miguel*

correspondem a calcários e calcários dolomíticos amarelados com bancadas decimétricas, passando a termos mais margosos para o topo.

Ao Grupo de Coimbra segue-se um conjunto de unidades de calcários margosos e margas em bancadas com espessura variável que, da base para o topo, incluem a *Formação de Vale das Fontes*, *Formação de Lemedede* e *Formação de S. Gião*. A *Formação de Vale das Fontes* (= *Margas de Eiras*, Soares *et al.*, 1985), de idade atribuída ao Carixiano - Domeriano Inferior, é constituída essencialmente por margas, alternando com calcários margosos. Corresponde à unidade inferior das *Margas e Calcários Margosos de Eiras* em Soares *et al.*, 1985 e tem uma espessura de cerca de  $40 \pm 10$  m e um conteúdo fossilífero particularmente rico em amonóides. A *Formação de Lemedede* (= *Calcários Margosos do Loreto*, Soares *et al.*, 1985), Domeriano superior - base do Toarciano, é constituída essencialmente por calcários margosos e micríticos, cinzentos, interstratificando com margas amarelas para o topo, localmente ricos em amonites. Corresponde à unidade superior das *Margas e Calcários Margosos de Eiras* em Soares *et al.*, 1985.

À *Formação de Lemedede* segue-se a *Formação de S. Gião*. Datada do Toarciano-Aaleniano Inferior, é uma unidade essencialmente margo-calcária, sub-dividida em 5 membros, de acordo com o conteúdo fóssil (Duarte e Soares, 2002, cit. em Soares *et al.*, 2007). Assim, consideram-se os seguintes membros:

1) *Margo-calcários com fauna de Leptaena* – unidade com cerca de 7 m de espessura em que alternam bancadas decimétricas de margas com bancadas centimétricas de calcário margoso rico em braquiópodes, lamelibrânquios e belemnites.

2) *Calcários nodulosos em plaquetas* – alternância de calcários e margas, em que a base é mais margosa e de cor castanha (“margas chocolate” em Soares *et al.*, 1985), com vestígios de bioturbação e espessura na ordem dos 8 a 10 m.

3) *Margas e calcários margosos com Hildaítes e Hildoceras* - é o membro mais espesso da *Formação de S. Gião*, com cerca de 63 m e corresponde a uma alternância de bancadas métricas de margas e margas calcárias com bancadas centimétricas de calcários margosos e micríticos. A base é mais calcária e rica em braquiópodes e amonóides, a zona intermédia é mais margosa e pobre em macrofauna bentónica e nectónica; o topo é mais calcário e contem níveis ricos em Hildoceratídeos.

4) *Margas e calcários margosos com bioconstruções de espongiários*- com espessura a totalizar os 43 m, este membro, datado do Toarciano, corresponde a uma alternância de margas calcárias e calcários margosos caracterizada pela presença de bioconstruções de espongiários siliciosos e amonóides (abundantes na parte superior desta unidade).

5) *Margas e margas calcárias com braquiópodes* - este membro, do Toarciano superior, é constituído essencialmente por margas com pequenos braquiópodes e amonóides e espessura total à volta dos 22 m.

O Jurássico Médio inicia-se com a *Formação de Póvoa da Lomba*. Datada do Aaleniano médio a Bajociano inferior, esta unidade corresponde na base a calcários margosos interstraficados com calcários biosparríticos esbranquiçados e azulados. A espessura desta formação ronda os 40±5 m. De acordo com a terminologia utilizada em Soares *et al.*, 1985, às *Margas e Calcários Margosos de Eiras* sucedem-se as *Margas e Calcários Margosos de Pedrulha*, com duas sub-unidades *Margas e Margo-calcários de Adémia*, na base, e *Calcários Margosos de Pedrulha*, no topo, que são equivalentes às *Formações de S. Gião e Póvoa da Lomba*, respectivamente (Dinis, 2004). As *Margas e Calcários Margosos de Pedrulha* correspondem à unidade liásica com maior expressão na área de Coimbra (Soares *et al.*, 1985). É um corpo margoso dominante, cuja base é constituída pela sub-unidade *Margas e Margo-Calcários de Adémia*, do Toarciano, composta por margas acastanhadas e amareladas na base passando a margas azuladas com frequentes amonites, a que se sobrepõe uma sequência margosa com cerca de 3 m de espessura que recebe a denominação de “margas chocolate”. Segue-se-lhe uma sequência calcária, calcários em plaquetas na base e apinhoados no topo, e depois uma espessa série (200±20m) de margas e margo-calcários. A sub-unidade *Margas e Margo-Calcários de Adémia* é equivalente às *Margas Calcárias de S. Gião* de Barbosa *et al.* (1988).

O Cretácico está representado na área de estudo pelas seguintes formações: 1) *Formação de Figueira da Foz* - equivalente ao *Grés de Grada-Barcouço* (Soares *et al.*, 1985) e *Arenitos de Carrascal* (Rocha *et al.*, 1981; Barbosa *et al.*, 1988). Trata-se de um corpo espesso (10-120 m) arcossarenito a quartzarenito grosseiro a muito grosseiro, imaturo a submaturo de cor esbranquiçada a cinzento com manchas amareladas, avermelhadas ou violáceas. Pode verificar-se ainda a presença de corpos discretos de arenitos finos a médios e/ou lutitos maciços ou laminados. Admite-se como idade aproximada, para a base desta unidade, o Aptiano superior a Albiano inferior e, para o topo, o Cenomaniano superior. A sedimentação desta formação terminou com a implantação de uma sedimentação carbonatada marinha, materializada pela *Formação Carbonatada* de Soares (1966). 2) *Formação de Trouxemil* (= *Calcários de Trouxemil*, Soares *et al.*, 1985; *Calcários Apinhoados de Costa de Arnes*, Rocha *et al.*, 1981; = *Calcários de Tentúgal*, Barbosa *et al.*, 1988) - de idade atribuída ao Cenomaniano Superior, trata-se de uma formação com espessura variando entre 12 e 6,5 m, com composição essencialmente margo-lutítica e/ou areno-margosa de cor acinzentada, fossilífera e com “rogns” calco-arenosos acinzentados, em que os corpos calcários são relativamente raros. O topo de formação está truncado pela *Formação de Lousões*. As fácies apontam para a instalação progressiva de



uma planície litoral com linha de costa imediatamente a oriente e sedimentação nos andares litoral a sublitoral superior. 3) *Formação de Lousões* - de idade do Turoniano, esta formação é equivalente ao *Grés de Furadouro* em Soares *et al.* 1985, aos *Arenitos finos de Lousões* em Rocha *et al.*, 1981 e *Grés de Furadouro* em Barbosa *et al.*, 1988. Apresenta na base fácies arenosa micácea, cor amarela e/ou acinzentada com estruturas laminadas concordantes com a estratificação e oblíquas de baixo ângulo. Para o topo, aparecem quartzarenitos e/ou subarcosarenitos, grosseiros a muito grosseiros com estruturas oblíquas em ventre. Este tipo de fácies sugere episódios de sedimentação em meio de baixa energia, numa planície litoral extensa, com alimentação a partir de leques aluviais a oriente, que introduziram sedimentos mais grosseiros e de natureza arcósica na sequência de progradação e incisão resultantes do acentuar do movimento regressivo. Com idade atribuída ao Coniaciano-Santoniano. Segue-se a 4) *Formação de Rebolia – Alencarce* - assente em discordância sobre a *Formação de Lousões*, tem espessura na ordem dos 55 m±5 m e é composta por subarcosarenitos e quartzarenitos grosseiros, submaturos e imaturos com estratificações oblíquas e em ventre. Observam-se frequentes corpos lutíticos cinzentos e/ou amarelados com crostas ferruginosas. As fácies observadas pressupõem o desenvolvimento de uma planície aluvial com meandrização progressiva dos cursos de água. Esta formação é equivalente ao *Grés de Oiã* em Barbosa *et al.*, 1988. 5) *Formação de Taveiro* (= Arenitos e Argilas de Taveiro, Rocha *et al.*, 1981; Arenitos e argilas de Viso, Barbosa *et al.*, 1988) - assente em discordância com as unidades anteriores, e com idade do Campaniano-Maastrichtiano, a *Formação de Taveiro*, com espessura a rondar os 170±10 m, está bem representada na margem esquerda do rio Mondego, entre Coimbra e Alfarelos. Na base é composta por pelitos vermelhos, acastanhados ou rosados com interstratificações de arenitos esbranquiçados, grosseiros, e com estruturas entrecruzadas. Para o topo, aparecem níveis lenticulares de conglomerados, grosseiros, esbranquiçados e por vezes fossilíferos. As fácies presentes indiciam um ambiente de sedimentação em planície aluvial, extensa, com canais sinuosos e áreas sujeitas a alagamento, propícias à decantação de materiais mais finos.

O Paleogénico está representado na área pelas *Formação de Bom Sucesso* e *Formação de Antanhol*. A *Formação de Bom Sucesso*, com espessura na ordem dos 80±10 m e de natureza arcosarenítica a subarcosarenítica e cor esbranquiçada, apresenta estrutura interna oblíqua ou em ventre e intercalações conglomeráticas, maciças ou com estrutura oblíqua em ventre. Esta unidade traduz, do ponto de vista paleogeográfico, a organização de uma planície aluvial com canais entrançados de regimes contrastados. A *Formação de Antanhol*, com idade pliocénica e cerca de 10-12 m de espessura, apresenta na base fácies conglomeráticas, grosseiras e com calhaus redondos de quartzo e quartzito, a que seguem subarcosarenitos micáceos, com estrutura interna oblíqua. Para o topo

aparecem níveis argilosos, negros, com fragmentos carbonosos, encimados por níveis subarcosareníticos, grosseiros de cor amarelada e/ou acastanhada e estrutura interna oblíqua.

Aos depósitos meso-cenozóico anteriormente descritos, sobrepõem-se formações de idade quaternária depositadas em resultado das variações do nível eustático do Atlântico, resultantes por sua vez das alterações climáticas ocorridas no Plistocénico (Santos, 2009). Na área de estudo, no sector coberto pela carta 19-D, o Quaternário está representado por, da base para o topo, *Conglomerados de Espírito Santo*, *Areias Vermelhas de Ingote*, *Depósitos de Ceira*, *Depósitos de Salabardos*, *Conglomerados de Taveiro*, *Areias Vermelhas de Estádio* e aluviões. As unidades quaternárias correspondem a depósitos terrígenos, areno-conglomeráticos de dois tipos: submaturos ricos em calhaus redondos e estrutura interna evidente e imaturos, por vezes pelíticos ou areno-pelíticos e com calhaus dispersos. As *Areias Vermelhas de Ingote* estão descritas em pormenor em Soares *et al.* (1985). No sector da área de estudo coberto pela folha 19-C, as formações estão representadas pelas *Areias de Cantanhede* e *Cascalheiras de S. Martinho* (Rocha *et al.*, 1981).

#### IV.2.2 Geomorfologia

A geomorfologia da área de estudo está nitidamente marcada pelo confronto de duas importantes unidades morfoestruturais representadas a este pelo *Maciço Marginal de Coimbra*, bloco soerguido classificado como um “horts” de direcção meridiana, e a oeste pelos terrenos aplanados da Orla Meso-Cenozóica Ocidental.

Do confronto destas duas unidades resulta uma característica geomorfológica notável nesta área, materializada por uma diferença acentuada de relevo, perceptível na expressão cartográfica à escala 1/25 000 pelo brusco adensamento das curvas de nível a este da Falha de Coimbra. Segundo Soares *et al.* (2007) é no “confronto de duas realidades geomorfológicas, o Maciço Antigo (na porção ocidental do Maciço Hespérico) ante-Mesozóico e a Orla Meso Cenozóica-Occidental” que a “morfologia do espaço cartografado encontra justificação”. O autor refere ainda que a morfologia deste espaço é “essencialmente pliocénica e/ou plistocénica, progressivamente afeioada”. De acordo com Rebelo (1985) a fracturação, acompanhada de movimentações verticais de blocos, a par da diversidade litológica, são os principais factores que permitem explicar os “contrastes do relevo regional”.

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Mondego, cujos principais aspectos geomorfológicos são objecto de estudo em Santos (2009). Situa-se no sector do Baixo Mondego, o sector mais a jusante e um dos quatro em que o autor sistematizou o troço do rio Mondego, desde a nascente à foz. Neste sector, o rio corre sobre os terrenos

detríticos e carbonatados da Orla Mesocenozóica, em planície aluvial extensa, com vale bastante amplo, em contraste acentuado com vale encaixado, na zona da confluência com o rio Ceira, instalado nos terrenos xistentos e quartzíticos do Grupo das Beiras.

Tavares (1999) identifica as principais formas de relevo a partir de critérios estruturais e líticos que estão organizadas em quatro conjuntos 1) formas estruturais, 2) formas fluviais, 3) formas de vertente e superfícies de aplanamento e 4) formas associadas à morfogénese recente. No primeiro conjunto evidenciam-se as escarpas de falha, as cornijas de relevo monoclinal e as depressões com motivação estrutural. As escarpas de falha estão associadas a: a) fracturação NE-SW- visíveis por exemplo na margem esquerda do Mondego a montante da Portela e no vale do Ceira entre Bouça e Cabouco; b) fracturação NW-SE visível nas escarpas a sul de Almalaguês no Vale do Inferno; e c) fracturação WNW-ESE a ENE-WSW assinalada por escarpas em Marco dos Pereiros-Castelo Viegas, Alta de Coimbra e S. Facundo. Entre as depressões com motivação estrutural contam-se a depressão do Calhabé, a depressão entre Rio de Galinhas e Outeiro de Bera, as depressões em Vila Nova e Vendas de Pousada, a depressão de Souselas-Zouparria do Monte-S. Martinho do Pinheiro, a depressão a ocidente de Larçã –Paço - Póvoa do Loureiro e a “Depressão de Antuzede” (Soares, 1966).

As formas fluviais estão associadas predominantemente à dinâmica fluvial dos rios Mondego, Ceira, Corvo e Fornos e materializam-se, por exemplo, nos depósitos aluvionares, de que os Campos do Boulão são a expressão mais conhecida. Tavares (1999) destaca ainda os vales de secção em V, associados a formações metassedimentares, conglomeráticas e arenosas e os vales de secção em U, associados predominantemente a unidades calcárias e margosas. As unidades arenosas, pelíticas e calcárias apresentam formas em berço, aberto, que a jusante evolui para fundos planos

Nas formas de vertente salientam-se as associadas a vertentes rectilíneas, a vertentes côncavas e a vertentes convexas. No primeiro grupo o autor apresenta como exemplo os vales encaixados das unidades metassedimentares dos rios Mondego e Ceira, a vertente ocidental da Serra de S. Domingos e a Serra de Brasfemes. As formas côncavas são visíveis por exemplo em Casal do Lobo, Cova do Ouro, Monte de Bera e na vertente ocidental do Ingote, sendo as mais expressivas observadas em Barroca (Cernache), Quinta do Carmo (Antuzede), e nas vertentes do Alto da Serra. Quanto às vertentes com arqueação vertical convexa, o autor dá com exemplos, entre outros, as vertentes noroeste das serras de Brasfemes e Alhastro.

A zona de Coimbra compreende diversas superfícies de aplanamento que Tavares (1999) organiza em seis classes, de acordo com a variação hipsométrica e enquadrando os pressupostos de autores como Daveau *et al.* (1985/86), Rebelo (1985), Soares *et al.* (1989),

Cunha (1990), Santos (1996), Cunha e Soares (1997) e Cunha *et al.* (1996). As classes são as seguintes:

1) >320 m - está representada no Maciço Marginal na superfície do marco da Escusa-Carvalho (cota 424 m), na superfície do marco do Sobreiro e no Luzouro - Fontinheira (490 m)

2) 270 - 320 m - estão nesta classe as superfícies de aplanamento visíveis, por exemplo, em Venda da Serra, Coiçã, Portela das Flores, Casal do Lobo, Cova do Ouro, Dianteiro, Carapinheira e na parte sul do concelho em Almaroz, Monte de Bera e Outeiro do Couto.

3) 180 - 220 m - entre outras, as superfícies em Alamalaguês, Anaguéis, Casa Telhada, Outeiro Negro, Assafarge, Tovim e Rocha Nova

4) 140 - 180 m - Aeródromo de Cernache, Espírito Santo das Touregas, Banhos Secos, Peneireiro, Pereiros, Logo de Deus e S<sup>to</sup>. António dos Olivais são alguns dos locais onde está representada esta classe

5) 90 - 120 m - a esta classe correspondem superfícies com grande expressão cartográfica, associadas frequentemente a depósitos torrenciais e químicos, e são visíveis em locais como a Alta de Coimbra, Montes Claros, Eira Pedrinha, Casconha, marco de Taveiro, Santa Clara, Pinhal de Marrocos, Trouxemil, Ingote, Marmeleira, Brasfemes e Cioga do Monte entre outros

6) < 90 m - abaixo desta cota encontram-se platitudes relacionadas com depósitos arenosos conglomeráticos associados aos rios Mondego, Ceira e Corvo e ainda com níveis inferiores ( $\pm 70$  m) dos Tufos e travertinos

No quarto conjunto de formas que o autor considerou, “formas associadas à morfogénese recente e actuais”, assinalam-se as formas cársicas como os lapiás e as dolinas, na Guarda Inglesa, na Palheira, em Santa Clara, no cemitério da Conchada e no Monte Formoso, por exemplo. Destacam-se ainda as grutas e exurgências em Geria, Olho Marinho, Vila Nova, Cernache, Rio de Galinhas e Outeiro de Bera. Canhões fluvio-cársicos são visíveis a jusante de Casa Telhada e junto a Abrunheira. Formas em reculée são visíveis em Casa Telhada, Loureiro e Telhadela. No enquadramento geomorfológico da área não podemos deixar de referir ainda os trabalhos de Rebelo (1981), Daveau *et al.* (1985/1986), Soares *et al.* (1989), Cunha (1990), Cunha *et al.* (1996). Na figura IV.8 é apresentado um mapa com o esboço geomorfológico da área da cidade de Coimbra.

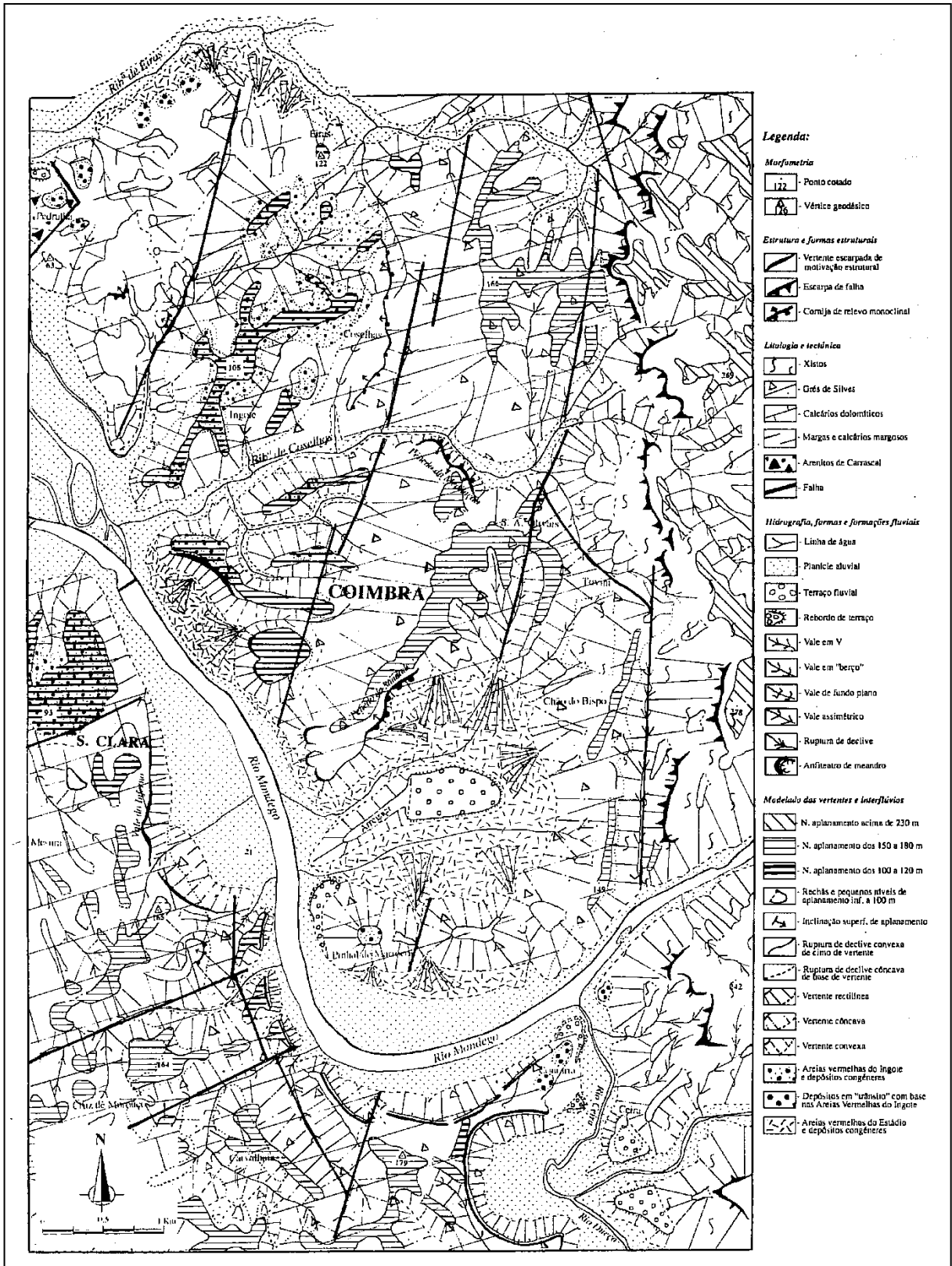


Fig. IV.8 – Esboço geomorfológico da área de Coimbra (Cunha *et al.*, 1996).



### IV.3 ENQUADRAMENTO CLIMÁTICO

O “Clima” de uma dada região ou local é o conjunto das condições meteorológicas predominantes nessa região ou local durante um determinado intervalo de tempo. É uma das principais condicionantes da evolução da paisagem bem como de toda a actividade humana. O clima da região de Coimbra caracteriza-se por um regime nitidamente mediterrâneo, influenciado pelo Atlântico (Silva, 1998), com Verões quentes e secos e Invernos suaves e chuvosos. Para descrever o clima de uma dada região, consideram-se os seguintes elementos climáticos simples: temperatura, precipitação, insolação, nebulosidade e vento (e.g. Silva, 1998). As séries de dados relativos a estes elementos reportam-se a um período de 30 anos. Este é período mínimo de tempo considerado necessário para definir o clima numa dada região pela Organização Meteorológica Mundial. As séries de 30 anos começam no primeiro ano de cada década (1901 - 1930, ..., 1931 - 1960, 1941 - 1970, ..., 1961 - 1990, 1971 - 2000). Os apuramentos estatísticos referentes a estes intervalos são geralmente designados por **Normais Climatológicas**.

A caracterização do clima foi feita com recurso aos dados do período 1971 - 2000, obtidos nas estações meteorológicas do Instituto Geofísico da Universidade (IGUC) e de Bencanta. A estação do IGUC situa-se a uma latitude de 40°12' N, a uma longitude de 8°25' W e a uma altitude de 140 m, no centro urbano de Coimbra. A estação de Bencanta situa-se a uma latitude de 40°13' N, a uma longitude de 8°27' W e a uma altitude de 35 m, na periferia oeste da cidade.

#### **Temperatura**

A temperatura do ar é um dos elementos climatológicos mais importantes e o primeiro que se utiliza para descrever o clima. Depende da latitude, da altitude, da época do ano e condiciona todos os processos biológicos e actividades humanas (Comissão Nacional do Ambiente, 1985). A temperatura média do mês é calculada pela média aritmética das temperaturas médias diárias dos dias desse mês. A temperatura média anual é a média das doze temperaturas médias mensais desse ano.

Da análise dos dados verifica-se que o valor médio da temperatura anual para o período considerado (1971/2000) é de 15,1 °C para o IGUC e de 15,4 °C para Bencanta, sendo Julho o mês mais quente, com uma média de 20,8 °C para o IGUC e 21,4 °C para Bencanta. O mês mais frio é o de Janeiro, com um valor médio de 9,5°C no IGUC e de 9.6 °C em Bencanta.

A evolução anual dos valores médios mensais da temperatura para o período de 1971 - 2000 pode ser observada no gráfico da figura IV.9. A variação da média mensal das temperaturas mínimas e máximas diárias está representada no gráfico da figura IV.10.

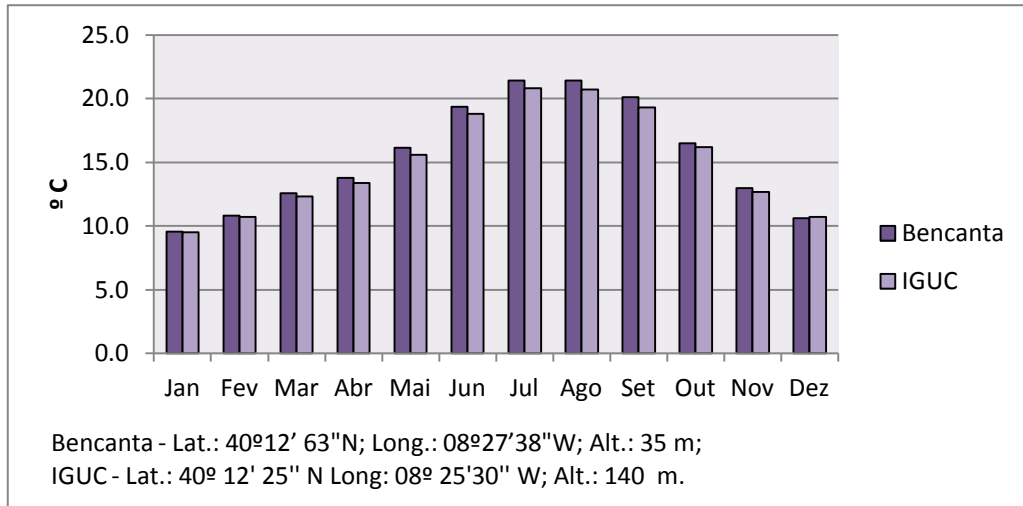


Fig. IV.9 – Variação da temperatura média mensal (1971/2000).

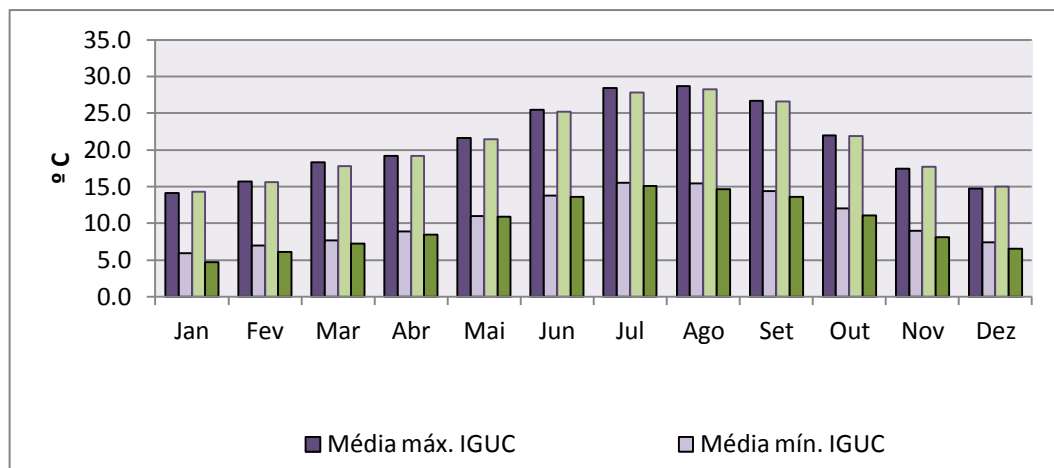


Fig. IV.10 – Variação média mensal das temperaturas mínimas e máximas (1971/2000).

### Precipitação

Chama-se precipitação à queda de água, no estado sólido ou líquido, proveniente da atmosfera. É o elemento climático mais importante a seguir à temperatura. Os tipos de precipitação mais significativos são: no estado líquido, o chuveiro e a chuva e, no estado sólido, a neve, o granizo e a saraiva (Comissão Nacional do Ambiente, 1985). A quantidade de precipitação que cai num determinado local, num dado período de tempo (dia, mês, ano, etc.) corresponde ao total de água que caiu nesse local expressa em milímetros, sendo 1 milímetro correspondente a 1 litro de água por metro quadrado. A quantidade de precipitação diária corresponde à precipitação caída nas 24 horas precedentes. A precipitação mensal corresponde à soma das precipitações diárias e a precipitação anual, corresponde à soma das precipitações mensais. A análise da distribuição da precipitação no tempo é importante para o estudo da erosão dos solos, ou para o cálculo da probabilidade de ocorrência de cheias. A precipitação média anual (figura IV.11) registada foi de 956,6 mm

no IGUC, e 906,4 mm em Bencanta. Os meses de Julho e Agosto são os meses menos chuvosos e Dezembro foi o mês com maior precipitação observada (139,8 mm no IUGC e 129,1 mm em Bencanta).

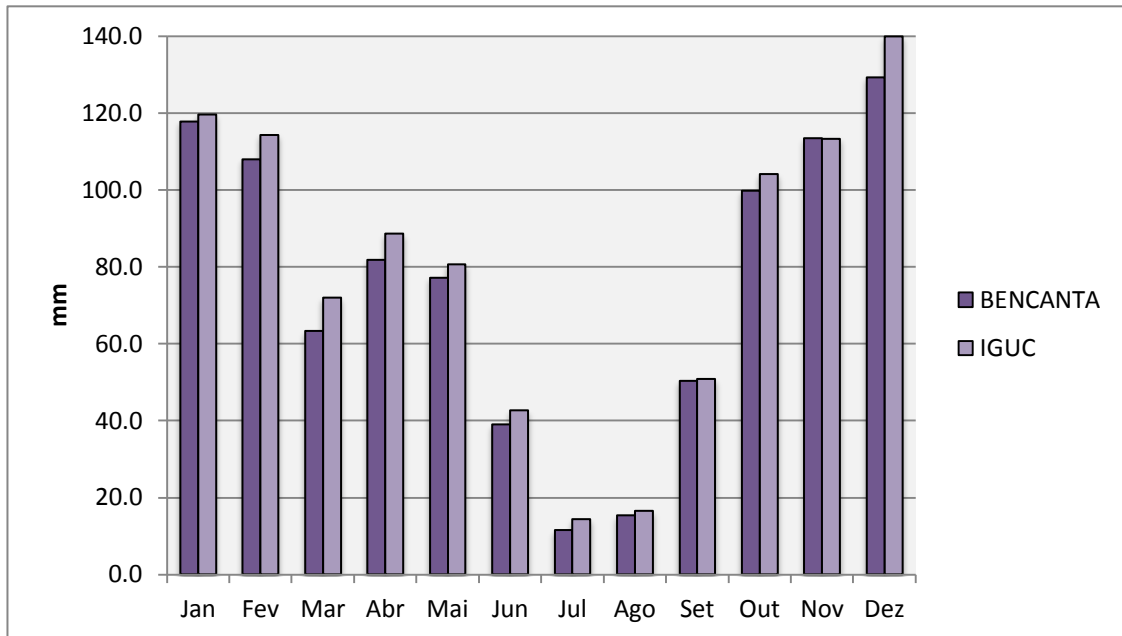


Fig. IV.11 – Variação da precipitação média mensal (1971/2000).

O gráfico termopluiométrico (diagrama de Gausson), apresentado na figura IV.12, aponta para a existência de um período seco anual entre os meses de Junho e Setembro, que corresponde a uma diminuição na precipitação e a um aumento da temperatura do ar.

### Humidade

A humidade corresponde á quantidade de vapor de água que existe num certo volume de ar, num dado momento. A humidade absoluta corresponde à massa de vapor de água existente num metro cúbico de ar (ex: 2 g/m<sup>3</sup>). A humidade relativa é a relação entre a quantidade de vapor de água que o ar contém (humidade absoluta) e a quantidade máxima de vapor que esse ar pode conter (ponto de saturação) (Comissão Nacional do Ambiente, 1985).

O padrão anual da humidade relativa registado na estação meteorológica do Instituto geofísico foi praticamente invariável, tendo-se registado um valor médio anual de 77% e verifica-se que os valores mais elevados ocorrem nos meses de Dezembro e Janeiro. A evolução anual dos valores médios mensais da humidade relativa pode ser observada na figura IV.13.



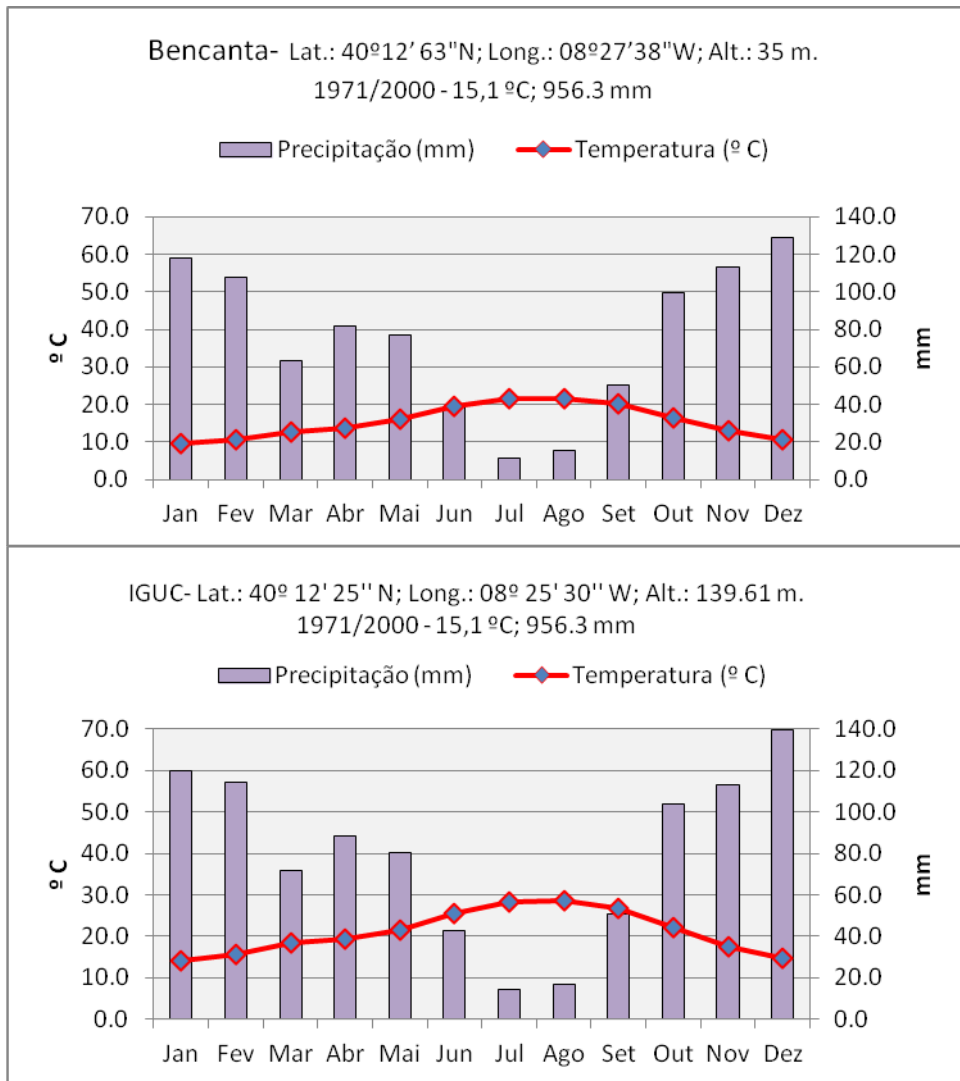


Fig. IV.12 – Gráficos termopluiométricos para as estações do IUGC e de Bencanta.

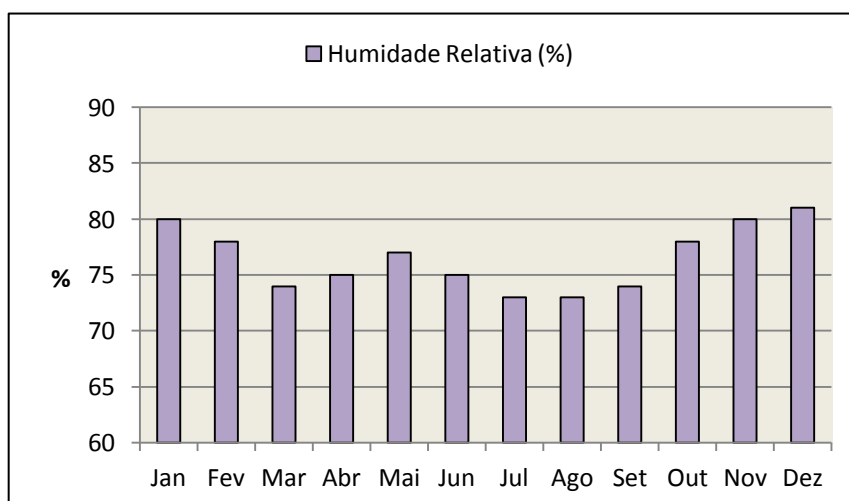


Fig. IV.13 – Variação da humidade relativa média mensal (IUGC-1971/2000).

## Vento

O vento resulta das diferenças de temperatura do ar e constitui um das formas de transferência de energia no sistema climático. Corresponde ao movimento horizontal do ar atmosférico (Comissão Nacional do Ambiente, 1985). A caracterização do vento foi realizada a partir de dois parâmetros, a velocidade e a direcção do vento, apenas para a estação do Instituto Geofísico, no período de medição (1971/2000) (figura IV.14). Verifica-se que as maiores velocidades são atingidas nos meses de Inverno. A direcção predominante dos ventos é de NW, direcção esta que se verifica quase ao longo de todo o ano, ou seja, nos meses de Março, Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro.

Em Outubro, as direcções predominantes médias são NW/SE e nos meses de Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) são SE. No mês de Novembro, o vento sopra predominantemente de Sul (valor médio para o período 1971/2000).

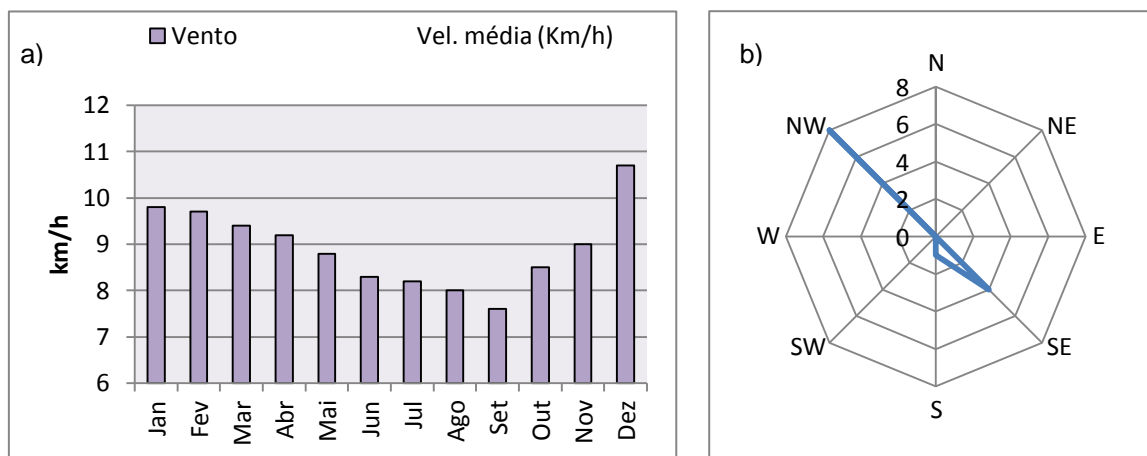


Fig. IV.14 – a) valores médios mensais da velocidade do vento e b) direcções predominantes (1971/2000).

## Insolação

A insolação refere-se ao número de horas de sol descoberto acima do horizonte. Os meses de Julho e Agosto registam o maior número de horas de Sol por dia (9,6 e 9,4 h respectivamente), seguindo-se-lhes o mês de Junho, com 8,6 h. Dezembro é o mês com menor número de horas diárias de Sol (4,1 h). A variação média mensal do número de horas de Sol diárias está representada no gráfico da figura IV.15.

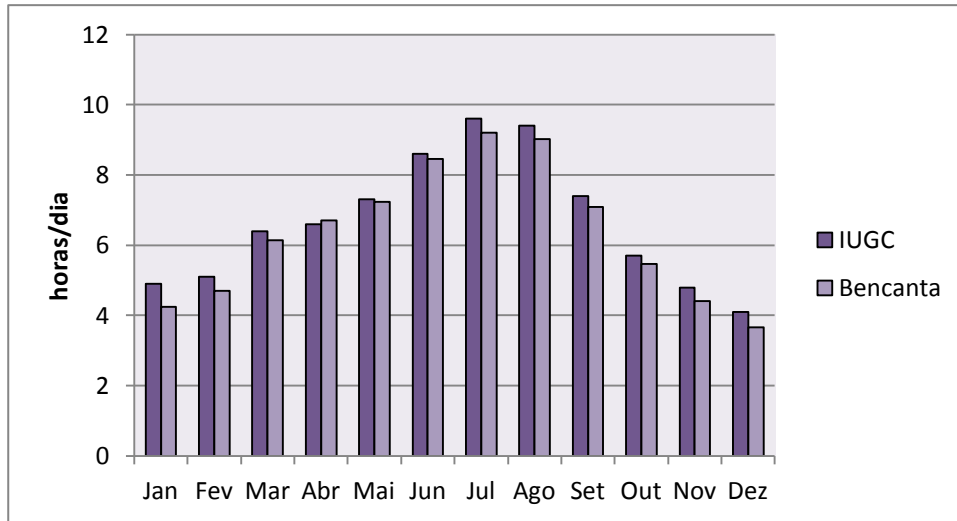


Fig. IV.15 – Variação da insolação média mensal (1971/2000).

### Nebulosidade

Os valores da nebulosidade expressam-se de 0 a 10, correspondendo cada unidade a um décimo do céu coberto de nuvens. Assim, o valor 0 representa céu limpo e o valor 10 corresponde a céu encoberto, sem qualquer porção azul visível. Para o período considerado (1971/2000), e tendo em conta os dados do IUGC, Julho e Agosto são os meses do ano que exibem melhores registos de céu azul, enquanto os meses de Fevereiro, Abril, Maio, Outubro, Novembro e Dezembro registam o valor máximo para a nebulosidade (6) (figura IV.16).

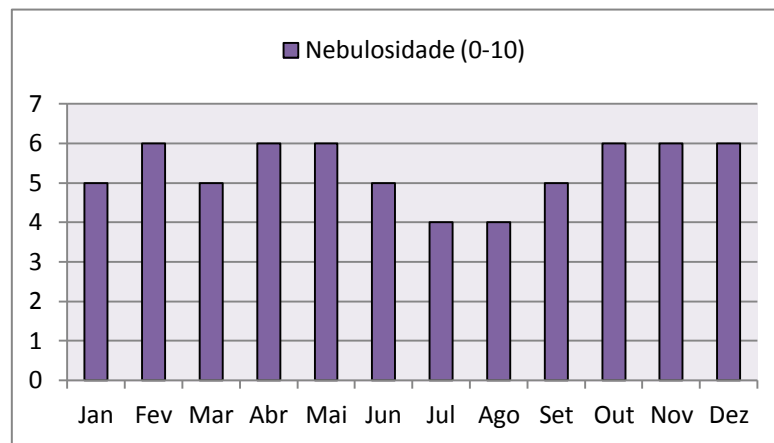


Fig. IV.16 - Variação da nebulosidade média mensal (IUGC-1971/2000).

## Balanço hidrológico

O balanço hidrológico para a área em estudo foi calculado recorrendo-se ao método de Thornthwaite – Mather (Lencastre e Franco, 2003), tendo-se usado como capacidade de água utilizável do solo um valor uniforme de 100 milímetros, para o IUGC e para a estação de Bencanta utilizou-se como capacidade o valor de 200 mm, dado situar-se numa zona de solos de aluvião, com uma capacidade de campo superior. Os dados de base utilizados no balanço são os valores médios mensais da temperatura do ar e precipitação no período de 1971-2000 (Tabela IV.2).

A evapotranspiração potencial foi calculada com base no método Thornthwaite (Thornthwaite e Mather, 1957), que se baseia apenas na temperatura média mensal e na latitude (duração teórica da insolação), de acordo com a fórmula

$$E_p = 16 (10 t/I)^a \alpha,$$

em que:

**E<sub>p</sub>** é a evapotranspiração potencial,

**T** é a temperatura média diária mensal,

**a** é uma função do índice térmico anual,

**I** soma dos índices térmicos mensais,

**α** é um termo correctivo que depende da latitude do local.

Tabela IV.2 – Valores médios da temperatura e precipitação (1971/2000).

Meses	Precipitação (mm)		Temperatura (°C)	
	IGUC	Bencanta	IGUC	Bencanta
<b>Jan</b>	119,6	117,8	9,5	9,6
<b>Fev</b>	114,2	108,0	10,7	10,8
<b>Mar</b>	71,9	63,3	12,3	12,6
<b>Abr</b>	88,6	81,8	13,4	13,8
<b>Mai</b>	80,6	77,2	15,6	16,2
<b>Jun</b>	42,6	39,0	18,8	19,4
<b>Jul</b>	14,4	11,6	20,8	21,4
<b>Ago</b>	16,5	15,3	20,7	21,4
<b>Set</b>	50,8	50,4	19,3	20,1
<b>Out</b>	104	99,7	16,2	16,5
<b>Nov</b>	113,3	113,4	12,7	13,0
<b>Dez</b>	139,8	129,1	10,7	10,6
<b>Ano</b>	Total: 956,3	Total: 906,4	Média: 15,1	Total: 15,4

Na tabela IV.3 resume-se o cálculo para a evapotranspiração, de acordo com o método acima descrito. As tabelas IV.4 e IV.5 traduzem o cálculo e o resultado do balanço hidrológico, segundo o método de Thornthwaite - Mather, para as duas estações meteorológicas consideradas.

Tabela IV.3 – Cálculo da evapotranspiração potencial.

<b>IGUC</b>						
	T °C	i	a	Ep não corrigida	$\alpha$	Ep corrigida
<b>Jan</b>	9,5	2,64	1,56	27,31	0,84	22,94
<b>Fev</b>	10,7	3,16	1,56	32,86	0,83	27,28
<b>Mar</b>	12,3	3,91	1,56	40,81	1,03	42,04
<b>Abr</b>	13,4	4,45	1,56	46,63	1,11	51,76
<b>Mai</b>	15,6	5,60	1,56	59,06	1,24	73,24
<b>Jun</b>	18,8	7,43	1,56	78,94	1,25	98,68
<b>Jul</b>	20,8	8,66	1,56	92,38	1,27	117,33
<b>Ago</b>	20,7	8,59	1,56	91,69	1,18	108,20
<b>Set</b>	19,3	7,73	1,56	82,23	1,04	85,52
<b>Out</b>	16,2	5,93	1,56	62,63	0,96	60,13
<b>Nov</b>	12,7	4,10	1,56	42,90	0,83	35,60
<b>Dez</b>	10,7	3,16	1,56	32,86	0,81	26,62
<b>Bencanta</b>						
	T °C	i	a	Ep não corrigida	$\alpha$	Ep corrigida
<b>Jan</b>	9,6	2,68	1,56	27,69	0,84	23,26
<b>Fev</b>	10,8	3,21	1,56	33,31	0,83	27,65
<b>Mar</b>	12,6	4,05	1,56	42,35	1,03	43,63
<b>Abr</b>	13,8	4,65	1,56	48,76	1,11	54,12
<b>Mai</b>	16,2	5,91	1,56	62,39	1,24	77,37
<b>Jun</b>	19,4	7,76	1,56	82,56	1,25	103,21
<b>Jul</b>	21,4	9,06	1,56	96,84	1,27	122,99
<b>Ago</b>	21,4	9,04	1,56	96,56	1,18	113,94
<b>Set</b>	20,1	8,22	1,56	87,66	1,04	91,17
<b>Out</b>	16,5	6,09	1,56	64,34	0,96	61,77
<b>Nov</b>	13,0	4,23	1,56	44,29	0,83	36,76
<b>Dez</b>	10,6	3,13	1,56	32,53	0,81	26,35

No cálculo do balanço hidrológico, além da evapotranspiração potencial, são considerados os seguintes parâmetros:

1) Evapotranspiração real (Er): quantidade de água que o solo realmente cede por unidade de área ( $l\ m^{-2}$ ). Pode estimar-se com base nos seguintes conceitos:

- nos meses em que a precipitação (P) é maior do que a evapotranspiração potencial ( $P \geq E_p$ ) considera-se que o solo está sempre bem abastecido e que  $E_r = E_p$ .
- nos meses em que  $P < E_p$ , a evapotranspiração real (sempre menor que  $E_p$ ) será a soma da quantidade de chuva desse mês (P) com a água perdida pelo solo, isto é,  $E_r = P + \Delta A_s$ ,

em que, a água perdida pelo solo nesse mês é a diferença da água no solo no mês anterior  $AS_{i-1}$  e nesse mês  $AS_i$ . Então:  $\Delta A_s = AS_i - AS_{i-1}$ .

2) Superávit ou excesso de água (S): excesso da quantidade da precipitação num dado intervalo de tempo, sobre a soma da evapotranspiração ( $E_p$ ) com a água armazenada no solo até à capacidade de campo (até saturar a água utilizável). Esta água é perdida por escoamento superficial ou então é percolada lateralmente (sub-superficialmente) ou recarrega os aquíferos (água profunda). Apenas existe quando  $P > E_p + C$ , em que C é a água utilizável.  $S = P - E_p - C$ .

3) Défice de água (D): corresponde à diferença entre a Evapotranspiração Real e a Evapotranspiração potencial.

4) Água utilizável (C): água que o solo retém contra a gravidade e que as plantas podem utilizar, isto é, a diferença entre a água retida a pF 2,5 e a água retida a pF 4,2 (nos poros entre 0,2 e 10  $\mu m$ , entre a capacidade de campo e o coeficiente de emurchecimento (pF é o “logaritmo da altura em centímetros da coluna de água que exerce pressão equivalente à força de retenção ou atracção do solo para a água” de acordo com Costa (1999) e é uma medida da força de sucção da água pelo solo).

5) Capacidade de campo: água retida pelo solo após o escoamento da água pela gravidade. Resulta do equilíbrio entre as forças de retenção da água no solo contra as forças da gravidade. O coeficiente de emurchecimento corresponde à água retida no solo, com tal força, que as plantas não conseguem utilizar.

6) Água no solo (AS) é a quantidade de água em mm existente no solo, calculada de acordo com a seguinte equação:  $AS = C e^{(L/C)}$ .

7) L é o valor da perda potencial de água desde o início da estação seca ( $L = \sum |P - E_p|$  nos meses em que  $P < E_p$ ).

Tabela IV.4 - Balanço hidrológico para uma capacidade de campo de 100 mm (IGUC).

Meses	T	P	Ep	P-Ep	L	As	ΔAs	Er	D	S
<b>Jan</b>	9,5	121	22,94	98,06	0	100	0	22,94	0,0	98,06
<b>Fev</b>	10,7	115	27,28	87,72	0	100	0	27,28	0	87,72
<b>Mar</b>	12,3	72	42,04	29,96	0	100	0	42,04	0	29,96
<b>Abr</b>	13,4	91	51,76	39,24	0	100	0	51,76	0	39,24
<b>Mai</b>	15,6	85	73,24	11,76	0	100	0,00	73,24	0	11,76
<b>Jun</b>	18,8	44	98,68	-54,68	-54,68	57,88	-42,12	86,12	12,56	0,00
<b>Jul</b>	20,8	15	117,3	-102,33	-157,01	20,80	-37,08	52,08	65,25	0,00
<b>Ago</b>	20,7	15	108,2	-93,20	-250,21	8,19	-12,61	27,61	80,59	0,00
<b>Set</b>	19,3	55	85,52	-30,52	-280,73	6,04	-2,15	57,15	28,37	0,00
<b>Out</b>	16,2	108	60,13	47,87	0	53,91	47,87	60,13	0,00	0,00
<b>Nov</b>	12,7	116	35,60	80,40	0	100	46,09	35,60	0,00	34,31
	10,7	139	26,62	112,38	0	100	0,00	26,62	0,00	112,38

T - temperatura; P – precipitação; Ep - evapotranspiração potencial; L - perda potencial de água; As – água no solo; ΔAs – variação da água no solo; Er - evapotranspiração real; D - déficit; S – superavite.

Tabela IV.5 - Balanço hidrológico para uma capacidade de campo de 200 mm (Bencanta).

Meses	T	P	Ep	P-Ep	L	As	ΔAs	Er	D	S
<b>Jan</b>	9,6	117,8	23,26	94,49	0	200	0	23,26	0,0	94,49
<b>Fev</b>	10,8	108,0	27,65	80,32	0	200	0	27,65	0	80,32
<b>Mar</b>	12,6	63,3	43,63	19,65	0	200	0	43,63	0	19,65
<b>Abr</b>	13,8	81,8	54,12	27,69	0	200	0	54,12	0	27,69
<b>Mai</b>	16,2	77,2	77,37	-0,19	-0,186	199,81	-0,19	77,37	0,01	0,00
<b>Jun</b>	19,4	39,0	103,21	-64,24	-64,43	144,92	-54,89	93,86	9,35	0,00
<b>Jul</b>	21,4	11,6	122,99	-111,40	-175,83	83,03	-61,89	73,48	49,51	0,00
<b>Ago</b>	21,4	15,3	113,94	-98,65	-274,49	50,70	-32,33	47,61	66,33	0,00
<b>Set</b>	20,1	50,4	91,17	-40,80	-315,29	41,34	-9,36	59,73	31,44	0,00
<b>Out</b>	16,5	99,7	61,77	37,92	0	79,26	37,92	61,77	0,00	0,00
<b>Nov</b>	13,0	113,4	36,76	76,60	0	200	120,74	36,76	0,00	-44,14
<b>Dez</b>	10,6	129,1	26,35	102,79	0	200	0,00	26,35	0,00	102,79

T - temperatura; P – precipitação; Ep - evapotranspiração potencial; L - perda potencial de água; As – água no solo; ΔAs – variação da água no solo; Er - evapotranspiração real; D - déficit; S – superavite.

Os parâmetros mais significativos obtidos no balanço hidrológico são apresentados nos gráficos da figura IV.17.

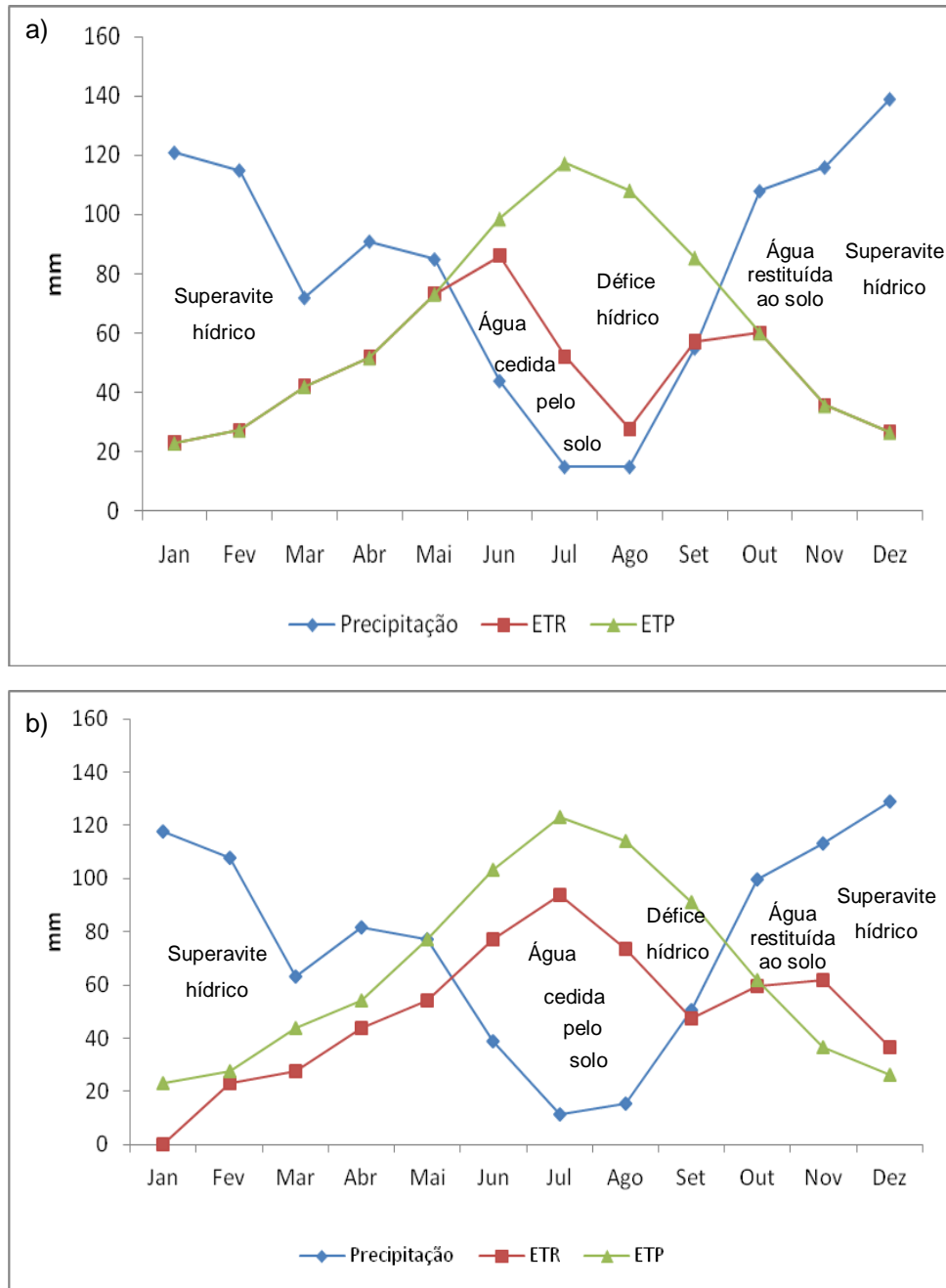


Fig. IV.17 – Representação gráfica do balanço hidrológico a) IUGC; b) Bencanta).

A leitura do gráfico permite-nos chegar às seguintes conclusões:

- um período de défice hídrico anual médio de Maio a Setembro;
- de Outubro a Abril ocorre um período de superavite hídrico anual médio;
- reposição da reserva de água no solo no início de Outubro, prolongando-se até Novembro;



### Classificação climática de Thornthwaite

O balanço hidrológico permite-nos, entre outras aplicações, estabelecer a classificação climática com base nos valores anuais médios do défice hídrico, do superavite hídrico e da evapotranspiração potencial. Segundo Thornthwaite (Thornthwaite e Mather, 1957), a descrição do clima de uma zona pode ser feita a partir de quatro parâmetros:

- 1) Índice de aridez :  $I_a = D/Ep$ ,
- 2) Índice de humidade:  $I_u = S/Ep$ ,
- 3) Índice hídrico:  $I_h = I_u - 0.6I_a$ ,
- 4) Eficácia térmica no Verão:  $C = Ep_m/Er_a$ ,

em que  $Ep_m$  é a evapotranspiração no trimestre mais quente (normalmente Junho, Julho e Agosto) e  $Ep_a$  é a evapotranspiração anual.

Na tabela IV.6 indicam-se os valores obtidos para cada um dos parâmetros (dados do IGUC) e a respectiva classificação climática de Thornthwaite.

Tabela IV.6 – Classificação climática.

Parâmetro	Valor	Símbolo	Descrição
$I_h$	40%	B <sub>2</sub>	Moderadamente húmido
$Ep$	749,3mm	B <sub>2</sub>	2º Mesotérmico
$I_a$	25%	S	Défice de água moderado no Verão
$C$	43%	a´	Nula ou pequena

De acordo com a classificação simbólica, a região em estudo apresenta um clima do tipo B<sub>2</sub> B<sub>2</sub> S a´, ou seja, o clima é moderadamente húmido, mesotérmico, com défice de água moderado no Verão e com nula ou pequena eficácia térmica no Verão.

#### IV.4 ENQUADRAMENTO PEDOLÓGICO

No mapa da figura IV.18 estão representadas as manchas das unidades pedológicas presentes na área de estudo, à escala 1:1 000 000, segundo o Atlas do Ambiente (Agência Portuguesa do Ambiente, 2007). É uma reprodução da Carta de Solos do Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, delineada por J. Carvalho Cardoso, M. Teixeira Bessa e M. Branco Marado. A taxonomia utilizada é a constante da World Reference Base for Soil Resources (2006) da F.A.O. (Food and Agricultural Organization) e adoptada pela International Union of Soils Sciences. Descrevem-se em seguida as características dos tipos

de solos, presentes na área, considerados neste mapa, de acordo com Fonseca e Marado (1991), F.A.O. (2006) e E. Sequeira (inf. oral).

### **CAMBISSOLOS**

Os Cambissolos são solos em que a diferenciação em horizontes ainda está num processo inicial mas que começa a evidenciar-se por mudanças na estrutura, na cor, no teor em argila e no teor em carbonatos. A denominação deriva do termo italiano *cambiare*. O material parental é médio a finamente texturado derivado de vários tipos de rochas. Os cambissolos caracterizam-se por fraca a moderada meteorização do material parental e pela ausência de quantidades apreciáveis de argila iluviada, matéria orgânica e compostos de Al e/ou Fe.

São solos que possuem um horizonte câmbico, não tendo outros horizontes de diagnóstico além de um horizonte A ócrico ou úmbrico ou um horizonte A mólico que assenta sobre um horizonte B câmbico, com uma saturação em bases (por  $\text{NH}_4 \text{ O Ac}$ ) inferior a 50%; não apresentam propriedades sálicas nem propriedades que são típicas dos vertissolos e andossolos, não tendo também propriedades gleicas dentro dos 50 cm superiores.

#### **Cambissolos húmicos**

Cambissolos que possuem um horizonte A húmbrico ou um horizonte A mólico assente sobre um horizonte B câmbico com uma saturação de bases (por  $\text{NH}_4 \text{ O Ac}$ ) inferior a 50%; não têm propriedades vérticas; sem propriedades ferrálicas no horizonte B câmbico; sem propriedades gleicas nos primeiros 100 cm e não tendo um horizonte permanentemente gelado até 200 cm de profundidade. Apresentam material calcário.

#### **Cambissolos cálcicos**

Cambissolos que possuem um horizonte A ócrico e uma saturação de bases (por  $\text{NH}_4 \text{ O Ac}$ ) superior a 50% pelo menos entre os 20 cm e 50 cm a partir da superfície; não têm propriedades vérticas nem propriedades ferrálicas no horizonte B câmbico e também não apresentam propriedades gleicas nos primeiros 100 cm, nem um horizonte permanentemente gelado dentro dos 200 cm superiores e apresentam material calcário.

#### **Cambissolos crómicos**

Cambissolos que possuem um horizonte A ócrico e uma saturação de bases (por  $\text{NH}_4 \text{ O Ac}$ ) de 50% ou mais pelo menos entre os 20 e 50 cm a partir da superfície, mas que não são calcários a essa profundidade e que possuem também um horizonte B câmbico com uma cor forte a vermelha 1/ \* mas que não têm propriedades ferrálicas no horizonte B.

\* 1/ O matiz do solo é de 7.5YR e o croma superior a 4, ou um matiz mais vermelho que 7.5YR.

**Cambissolos éútricos**

Cambissolos que possuem um horizonte A ócrico e uma saturação em bases de 50% ou mais pelo menos até 20 a 50 cm a partir da superfície, mas que não são calcários nessa zona; sem propriedades vérticas; possuem um horizonte B câmbico sem cores avermelhadas ou castanhas fortes; não possuem propriedades ferrálicas no horizonte B câmbico nem propriedades gleicas nos primeiros 100 cm; não apresentam horizonte permanentemente gelado dentro dos 200 cm superiores.

**FLUVIOSSOLOS**

Solos desenvolvidos em depósitos aluvionares. Do latim *fluvius*, rio. O material parental é constituído predominantemente por depósitos recentes fluviais, lacustres ou marinhos. Diferenciação em horizontes incipiente. Em condições naturais, muitos fluviolosos são inundados periodicamente. Os perfis evidenciam estratificação, pode haver diferenciação incipiente de horizontes, mas um horizonte superficial deve estar presente

São solos que mostram propriedades flúvicas e que não possuem outros horizontes de diagnóstico além de um horizonte ócrico, mólico, ou um horizonte A úmbrico, ou h hístico, ou um horizonte sulfídico nos primeiros 125 cm ou que tenham propriedades sálicas.

**Fluviolosos éútricos**

Fluviolosos que possuem uma saturação em bases (por  $\text{NH}_4 \text{ O Ac}$ ) de 50% ou mais pelo menos entre 20 a 50 cm a partir da superfície, mas que não são calcários à mesma profundidade e que não têm um horizonte sulfúrico nem material sulfídico dentro dos 125 cm superiores e ainda os que não possuem propriedades sálicas.

**Fluviolosos calcários**

Fluviolosos que apresentam material calcário, pelo menos nos primeiros 20 a 50 cm a partir da superfície e que não têm horizonte sulfúrico nem material sulfídico nos 125 cm superiores e também não têm propriedades sálicas.

**LEPTOSSOLOS**

Solos finos, típicos de regiões montanhosas. Do grego *leptos*, fino. Desenvolvem-se a partir de qualquer tipo de rocha, em todas as zonas climáticas, especialmente em áreas sujeitas a forte erosão (ex. relevo acentuado), com uma profundidade média não superior a 35 cm.

**Leptossolos éútricos**

Leptossolos que possuem um horizonte ócrico e uma saturação de bases (por  $\text{NH}_4 \text{ O Ac}$ ) de 50% ou mais em todo o perfil e que não têm rocha dura ou uma camada contínua cimentada dentro dos 10 cm superficiais, nem um horizonte permanentemente gelado dentro dos 200 cm superiores.

## **PODZOIS**

Solos com um típico horizonte cinza-claro, devido à perda de matéria orgânica e óxidos de ferro sobre um horizonte escuro, de acumulação de húmus e compostos de Fe. Desenvolvem-se sobre materiais provenientes da alteração de rochas siliciosas (ex. areias). Têm dois horizontes de diagnóstico - o albico, de cor cinza- clara ou branco, que é um horizonte eluvial (devido à perda de matéria orgânica e óxidos de Fe e Al, por eluviação) e um horizonte espódico, iluvial , por acumulação de matéria orgânica e óxidos de Fe e Al. Desenvolvem-se em Portugal em materiais siliciosos muito permeáveis, normalmente em areias e arenitos (podem desenvolver-se em moreias graníticas na Serra da Estrela e em materiais coluviados de quartzitos na Serra de Franco) (informação oral do Sr. Eng<sup>o</sup> Sequeira).

### **Podzois órticos**

Podzois que possuem um horizonte B espódico o qual em todos os seus sub-horizontes possui uma razão de ferro livre, em relação ao carbono, inferior a 6, mas que contém ferro livre em quantidade suficiente para tornar mais vermelho quando submetido ao calor de uma chama; possuem um horizonte E albico contínuo que tem uma espessura inferior a 2 cm, ou uma separação distinta dentro do horizonte B espódico, de um sub-horizonte que é visivelmente mais enriquecido com carbono orgânico, ou ambos; não têm propriedades gleicas dentro dos 100 cm superiores; não têm um horizonte permanentemente gelado dentro dos 200 cm superiores.

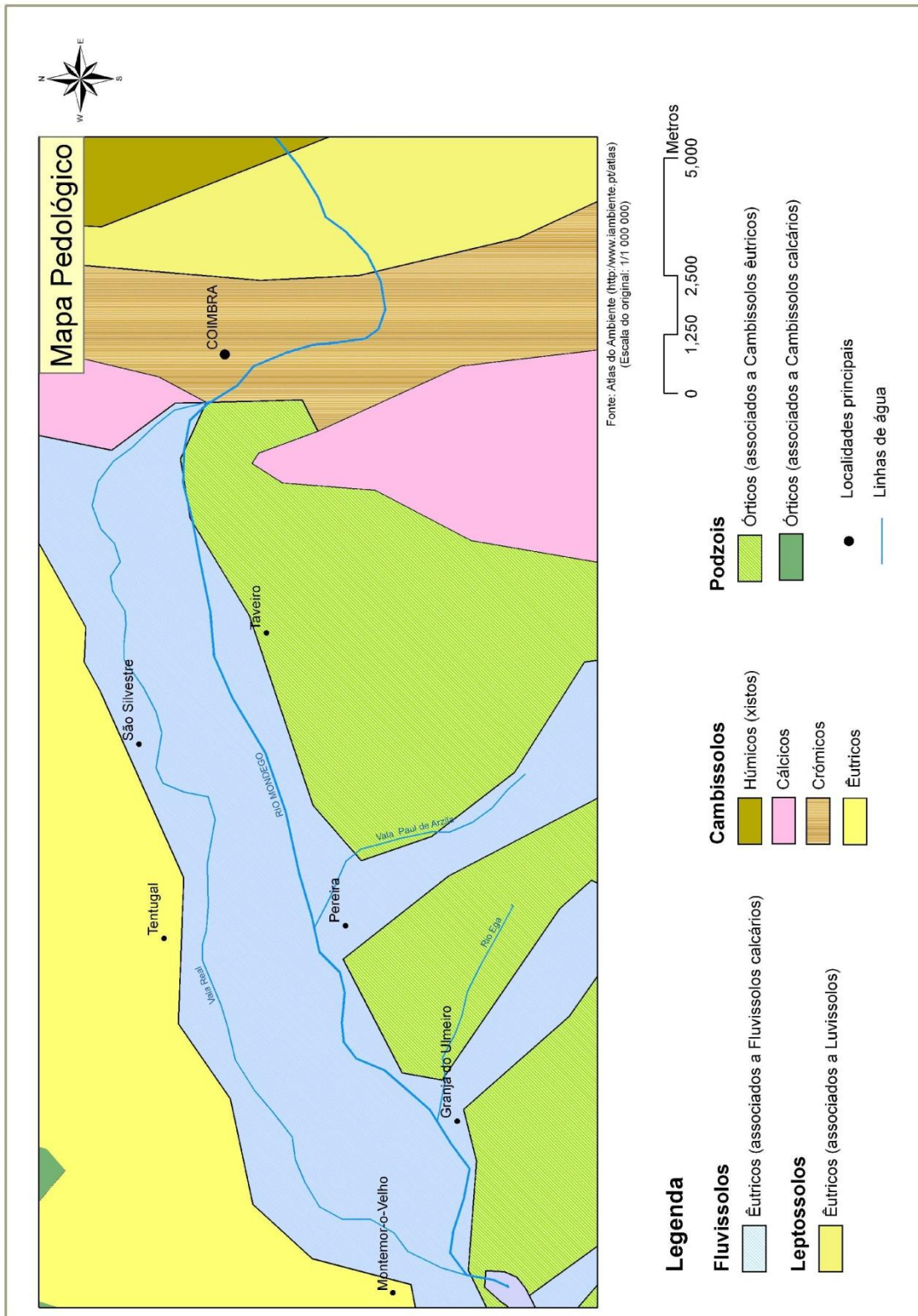


Fig. IV.18 – Principais unidades pedológicas (adaptado de Atlas do Ambiente, 2007, <http://www.iambiente.pt/atlas>)



# **Capítulo V**

## **METODOLOGIAS**

---

## V.1 TRABALHO DE CAMPO

### V.1.1 Colheita das amostras

A amostragem foi feita segundo uma malha quadrada de 1000 m x 1000 m e, também, em alguns outros locais seleccionados (figura V.1). Nalguns locais optou-se por utilizar uma malha mais densa (500 m x 500 m e 1 m x 1 m). A escolha da dimensão da malha teve como preocupação amostrar os diferentes tipos de solos e litologias presentes na área. Nos locais onde foram executados os perfis pedológicos, foram colhidas amostras em profundidade de modo a representar todos os horizontes presentes, incluindo o material parental e a rocha-mãe, sempre que possível.

As colheitas foram efectuadas em Junho de 2002 e entre Março de 2009 e Maio de 2011, após alguns dias de tempo seco. No total foram colhidas e estudadas 213 amostras.

Em cada ponto de amostragem foi colhido cerca de 1 kg a 1,5 kg de material, à superfície (0-20 cm de profundidade), num quadrado com cerca de 1 m x 1 m, sendo cada amostra composta por material retirado em quantidades semelhantes nos vértices e no centro do quadrado. Os fragmentos líticos de maiores dimensões foram retirados antes de colocar a amostra num saco de plástico. Sempre que necessário, procedeu-se à remoção da cobertura herbácea, de acordo com o recomendado em D'Emilio *et al.* (2007), antes de retirar a amostra. Os sacos utilizados na recolha, com dimensões de 22 cm x 42 cm, foram devidamente etiquetados, com marcador indelével, com informação relativa à identificação da amostra, local, data e nome do autor. Os utensílios utilizados na colheita (pá, sacho e enxada) foram sempre utilizados, inicialmente, no solo a ser amostrado e limpos com este material para evitar misturas entre cada colheita. Na amostragem dos perfis, as colheitas foram efectuadas de baixo para cima para evitar a contaminação e mistura das amostras de horizontes inferiores. Para melhor organização dos trabalhos de colheita de amostras, foram elaboradas fichas de campo (Anexo 5).

### V.1.2 Obtenção de coordenadas

As coordenadas foram obtidas com recurso a um aparelho GPS, modelo Garmin Etrex Vista, tendo sido registadas no Sistema UTM (Datum WGS84) e posteriormente convertidas para o Sistema Hayford-Gauss-Militar (Datum Lisboa). As coordenadas dos pontos de amostragem e dos locais seleccionados para a execução dos perfis pedológicos são apresentadas no Anexo 6.



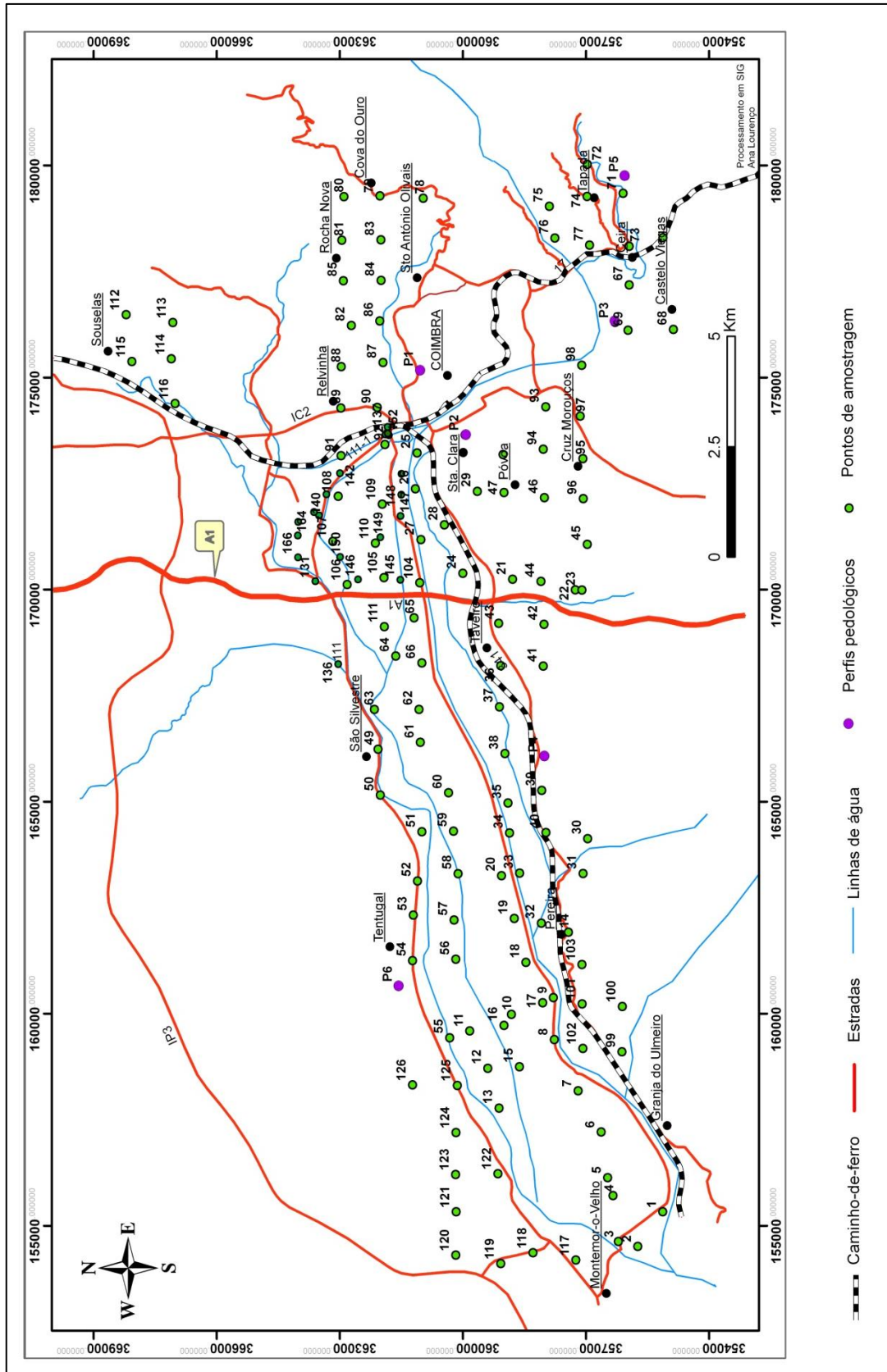


Fig. V.1 – Localização dos pontos de amostragem e perfis pedológicos.

### V.1.3 Execução e descrição morfológica dos perfis pedológicos

A escolha dos locais para abertura dos perfis necessários para a observação e análise dos solos, teve como pressuposto de base a amostragem dos diferentes tipos de solos existentes na área de estudo, com base na cartografia à escala 1/1 000 000 (disponível no portal da Agência do Ambiente, em <http://www.iambiente.pt/atlas>), relacionando-os com as diferentes litologias sobre as quais tiveram lugar os processos pedogenéticos. Procurou-se utilizar material que não contaminasse de alguma forma as amostras colhidas, tendo observado os cuidados já enunciados na secção IV.1. Foi colhida uma amostra em cada horizonte, de baixo para cima. Sempre que a abertura do perfil se fez por meio de abertura de uma cova, no final, esta foi preenchida com o material retirado, de modo a que o terreno retomasse a configuração inicial e fossem minimizados os impactos decorrentes da abertura do perfil.

#### Descrição morfológica

##### Cor

A cor foi determinada pelo sistema de Munsell (“Munsell Color Charts” da Munsell Color Company de Baltimore, USA) ou seja, através da comparação com os padrões de cor da Carta de Munsell (figura V.2). Esta é constituída por padrões rectangulares de cor fixados em cartolina, com orifícios circulares para facilitar as comparações (figura V.3).



Fig. V.2 – Determinação da cor com a Carta de Munsell.

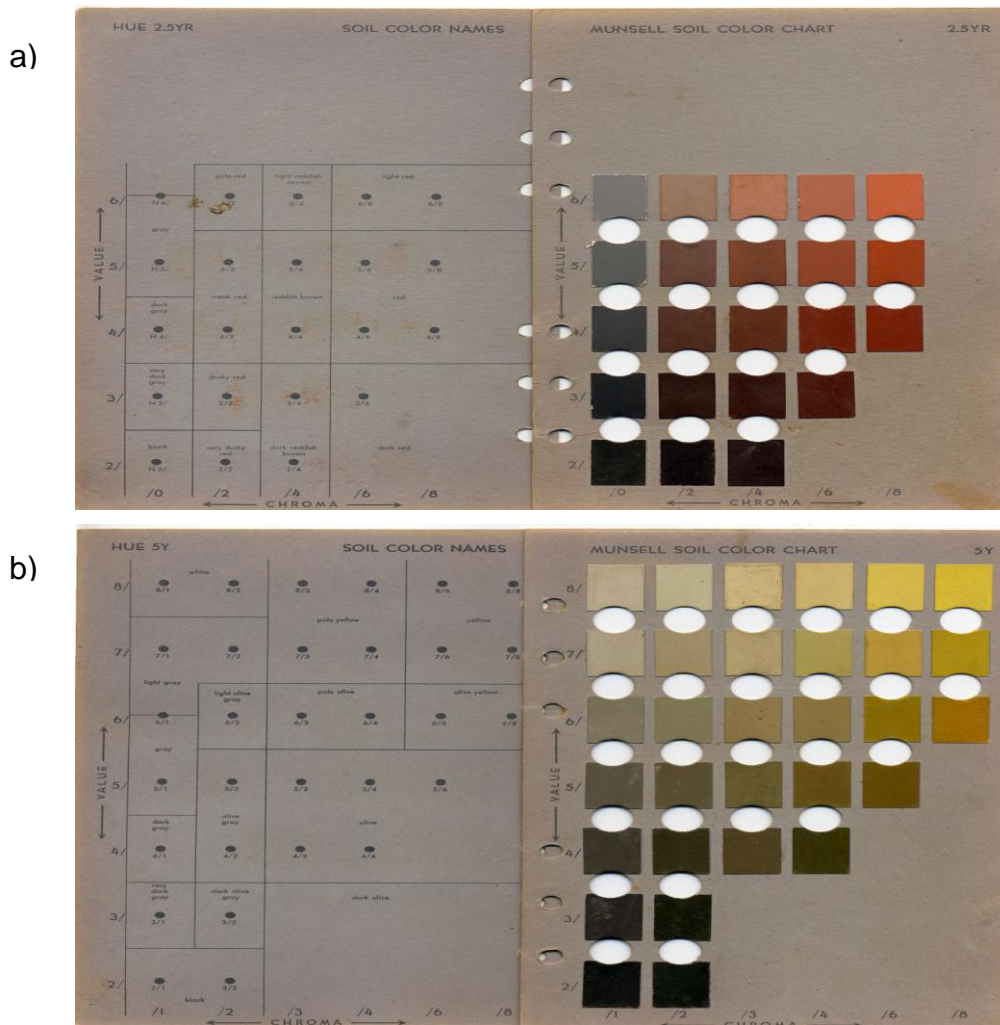


Fig. V.3 – Reprodução de duas folhas da Carta de Munsell: a) folha Hue 2,5YR e b) folha Hue 5Y.

Neste sistema, cada cor é definida por três variáveis: Matiz (“Hue”), Valor (“Value”) e Cromo (“Chroma”). O matiz refere-se à cor dominante, indicando se a cor é percebida como vermelho, azul, amarelo, verde ou uma cor intermédia. Existem 10 grupos de matizes (tabela V.1) e cada grupo é identificado por uma ou duas letras. Dentro de cada grupo, cada matiz é dividido em dez partes iguais que se identificam com os números de 1 a 10. Assim, cada Matiz é representado pela(s) letras(s) do grupo a que pertence precedida(s) pelo número da posição que ocupa no grupo (figura V.4). Por exemplo, o número 5 representa a posição central do grupo e o número 10 corresponde ao 0 do grupo seguinte. Assim, a cor 5YR indica um Matiz com 50 % de amarelo e 50 % de vermelho. O Valor refere-se ao grau de escuridão/luz, ou seja, permite distinguir uma cor clara de uma cor escura indicando, nas cores cromáticas, a equivalência com a escala de cinzentos neutros. Está organizado por colunas, desde o valor 0, preto, na parte inferior da folha, até ao valor 10, branco, no topo da folha.

Tabela V.1 – Simbologia para os matizes de Munsell.

Símbolo	Cor
R	vermelho (red)
YR	laranja (yellow-red)
Y	amarelo (yellow)
GY	verde-amarelo (green-yellow)
G	verde (green)
BG	azul-verde (blue-green)
B	azul (blue)
PB	violeta (purple-blue)
P	roxo (purple)
RP	vermelho-roxo (red-purple)

O Cromo, por vezes designado por saturação ou intensidade, indica o grau de pureza da cor espectral. Por outras palavras, indica o afastamento da percepção de cor em relação ao tom de cinzento do mesmo valor. Determinado Cromo corresponde à cor do respectivo Matiz adicionada de uma certa quantidade de cinzento desse mesmo valor. O Cromo está organizado em linhas desde o neutro, 0, à esquerda, até ao valor 8, à direita, para as cores “abertas” ou brilhantes.

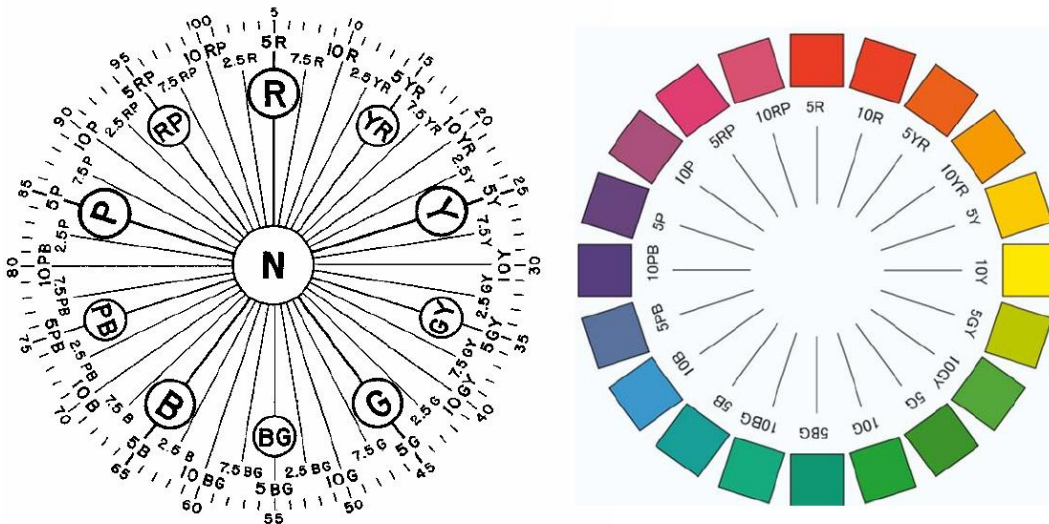


Fig.V.4 – Símbolos para representar o matiz e respectiva relação (à esquerda) (<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/>).

Para anotar uma determinada cor deve indicar-se, em primeiro lugar, o nome da cor, complementado com os respectivos parâmetros, Matiz, Valor e Cromo, entre parêntesis, por esta ordem, separando-se o Valor e o Cromo por uma barra oblíqua. Por exemplo, “Pardo avermelhado (5YR 5/3)”. Sempre que possível, deve anotar-se a cor no estado seco e no estado húmido. Para cada horizonte do perfil, se este for uniforme, deve anotar-se a cor dominante. Se existirem manchas de cor diferente, deve proceder-se igualmente à determinação da cor das manchas pelo mesmo processo.

### **Textura**

A textura foi determinada pelo método de campo. A textura refere-se à proporção relativa de partículas minerais do solo, agrupadas em classes de acordo com o seu diâmetro médio (granulometria). Adopta-se para o efeito a Escala de Atterberg, recomendada pela International Society of Soil Science (Tabela V.2). A textura permite-nos obter informação sobre as principais propriedades dos solos, nomeadamente, a relação ar/água, a plasticidade, a permeabilidade e a produtividade do solo, e é influenciada pelo grau de evolução do solo, pela natureza da rocha-mãe, pela topografia, pelo clima e pela estrutura.

Tabela V.2 - Escala de Atterberg (Costa, 1999).

<b>Designação dos lotes</b>	<b>Diâmetro das partículas (mm)</b>
<b>blocos</b>	> 200
<b>calhaus</b>	200 - 100
<b>pedras</b>	100 - 50
<b>pedras miúdas</b>	50 - 20
<b>cascalho</b>	20 - 5
<b>saibro</b>	5 - 2
<b>areia grossa</b>	2 - 0,2
<b>areia fina</b>	0,2 - 0,02
<b>limo (silte)</b>	0,02 - 0,002
<b>argila</b>	< 0,002

No campo, a textura pode determinar-se de um modo expedito, recorrendo ao manuseamento de pequenas porções de solo, e avaliada através de parâmetros como aspereza ou macieza do material seco, consistência no estado seco e no estado húmido (adesividade e plasticidade). A textura assim determinada designa-se por “textura de campo” e permite uma caracterização inicial que será corrigida pela análise laboratorial. Embora não se trate de uma avaliação rigorosa, permite, quando efectuada por pessoal devidamente treinado, identificar várias classes texturais, as quais, para fins práticos, são



agrupadas como ligeiras, médias e pesadas. Para determinar a textura de campo, devem observar-se os critérios que constam da tabela V.3.

Tabela V.3 – Determinação da textura de campo (Silva, 1980).

<b>Características observadas no estado seco</b>	<b>Características observadas no estado húmido</b>	<b>Textura</b>	
<b>Áspero, formado quase exclusivamente por areia</b>	Não pode moldar-se em filamento nem em bola coesiva; não é pegajoso	ARENOSA	LIGEIRA
<b>Áspero, formado principalmente por areia mas já com algum material fino</b>	Não susceptível de moldar-se em bola coesiva ou em filamento; contudo, suja e cora os dedos e não é pegajoso	ARENO-FRANCA	
<b>Com elementos ásperos (areias) e, em menor proporção, elementos macios</b>	Fendilha quando se tenta moldar em filamento que apenas se pode formar com muita dificuldade; não é pegajoso	FRANCO-ARENOSA	MÉDIA
<b>Áspero, embora já contendo mais material macio</b>	Susceptível de se amassar em bola coesiva mas apresentando coesão e aderência fraca: fendilha quando se tenta moldar em filamento, que se consegue formar apenas com muita dificuldade se; não é pegajoso	FRANCO-ARGILO-ARENOSA	
<b>Heterogéneo, com maior proporção de materiais macios do que ásperos. Pode apresentar agregados que se esboroam facilmente</b>	Pode moldar-se em filamento mas com certa dificuldade; fendilha quando se tenta curvar em argola; não é pegajoso	FRANCA	
<b>Caracteres intermédios entre a anterior e a seguinte</b>	Caracteres intermédios entre a anterior e a seguinte	FRANCO-ARGILOSA	PESADA
<b>Exclusivamente ou quase formado por materiais macios. Pode ter agregados que é difícil ou impossível esboroar entre os dedos</b>	Facilmente moldável em filamento alongado, que com facilidade se pode curvar em argola; pegajoso	ARGILOSA	
<b>Caracteres intermédios entre a anterior e a seguinte</b>	Caracteres intermédios entre a anterior e a seguinte	ARGILO-LIMOSA	
<b>Exclusivamente ou quase formado por materiais macios (sedosos)</b>	Facilmente moldável em filamento alongado, que com facilidade se pode curvar em argola; pouco pegajoso	LIMOSA	

## pH

O pH traduz a actividade hidrogeniónica de uma dada solução. É um indicador da acidez ou alcalinidade do solo, também designado por reacção do solo. O pH tem importância uma vez que afecta a solubilidade dos iões que, por sua vez, influenciam o crescimento das plantas e a actividade microbiana. Para muitos tipos de solos, um valor de pH na ordem dos 6,0 a 6,5 é o ideal porque coincide com o valor da solubilidade óptima para os nutrientes mais importantes para as plantas (Domingues *et al.*, 1989). Muitos dos micronutrientes essenciais ao crescimento das plantas, bem como a maior parte dos metais pesados, são solúveis para valores mais baixos do pH. Assim, o pH é um factor muito importante no controlo do movimento dos metais pesados no solo e potencial contaminação dos aquíferos. Para solos com pH neutro (7), o movimento de metais pesados como o Cd, Hg, Ni e Pb do solo para as águas subterrâneas é inibido. Neste tipo de solos, também a absorção daqueles elementos pelas plantas é limitado. Por outro lado, em condições em que o pH tem valores baixos (solos ácidos), há arrastamento das bases (Ca, K, Na, Mg) pelas águas de infiltração. Em solos alcalinos, não se verifica este tipo de processo, não havendo perda de bases. O material parental, o clima e a vegetação são os factores que mais influenciam o pH dos solos. A determinação do pH do solo (reacção) só é possível em solução, pelo que a sua obtenção exige que se junte uma porção de líquido e solo e se agite energicamente. O pH de cada horizonte foi determinado, no campo, através de um teste colorimétrico rápido, com utilização de um corante feito à base de ácido rosálico e verde de bromocresol e de uma escala de cor (figura V.5). Para tal, coloca-se cerca de meia colher de café de solo num recipiente inerte e juntam-se umas gotas do reagente. Agita-se, aguarda-se um pouco e compara-se a cor do líquido sobrenadante com a escala.

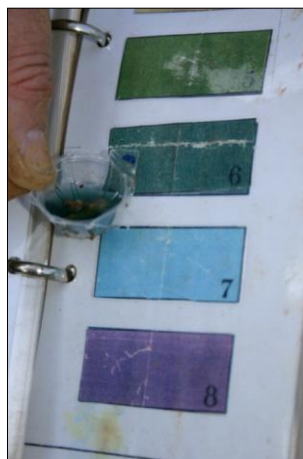


Fig. V.5 – Determinação do pH no campo.

A nomenclatura e simbologia, utilizadas na descrição dos perfis e respectivos horizontes, poderá ser consultada no anexo 7.



---

## V.2 TRABALHO LABORATORIAL

### V.2.1 Preparação das amostras para análise magnética

A preparação das amostras para determinação dos parâmetros magnéticos foi feita seguindo o protocolo previamente definido por diversos autores (e.g. Chaparro *et al.*, 2006; Maher, 1986). Assim, no Laboratório de Preparação de Amostras e de Separação de Minerais do Departamento de Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra, foram observados os seguintes procedimentos:

1 - as amostras foram limpas manualmente, de modo a retirar fragmentos líticos e de matéria orgânica de maiores dimensões que não foram totalmente retirados na fase de colheita;

2 - procedeu-se ao destorroamento das amostras, por redução dos agregados de maiores dimensões com um maço de borracha, sobre uma folha de papel limpa;

3 - depois de desagregadas, colocaram-se as amostras em tabuleiros de plástico, ou em cápsulas de porcelana, e levaram-se a secar em estufa a temperatura não superior a 40 °C. Durante o processo de secagem, algumas amostras foram retiradas temporariamente da estufa dada a necessidade de recorrer a nova desagregação, com a finalidade de acelerar o processo de secagem. A secagem realizou-se com o objectivo de padronizar o procedimento, diminuir o efeito do conteúdo da humidade na relação solução/solo e eliminar a necessidade de se determinar o conteúdo de humidade. As amostras de solo podem ser secas ao ar, na sombra, ou em estufas com circulação forçada de ar. A temperatura de secagem não deverá exceder 40 °C para evitar alterações mineralógicas (Maher, 1986) e porque mudanças significativas nas propriedades e físico-químicas do solo podem ocorrer a elevadas temperaturas, alterando os teores solúveis de metais (Khan e Soltanpour, 1978; Shuman, 1980).

4 - após a secagem, as amostras foram colocadas sobre uma folha de papel limpa e desagregadas mais finamente;

5 - fez-se em seguida a redução da amostra por quarteamento, de acordo com o processo esquematizado na figura IV.6, de modo a obter uma sub-amostra (cerca de 20-30 g) para posterior crivagem. Para efectuar este passo, utilizou-se material de plástico e/ou madeira. Antes de cada etapa do quarteamento as amostras foram homogeneizadas;

6 - procedeu-se à crivagem da sub-amostra resultante do quarteamento. A crivagem foi efectuada em peneiros de rede de nylon com malha de 2 mm sendo os finos recebidos num papel de superfície bem lisa, evitando que as partículas muito finas sofressem grande adesão ao papel. Sempre que se iniciava o procedimento para nova amostra, todo o material foi cuidadosamente limpo, para evitar contaminações. Nalguns casos, houve

necessidade de colocar a fracção < 2 mm em água desmineralizada, de modo a retirar os fragmentos de matéria orgânica em excesso. Sempre que se verificou esta situação, houve que proceder de novo à secagem da amostra, na estufa.

As amostras, depois da preparação acima descrita, foram acondicionadas em película transparente diamagnética e a sua massa determinada numa balança Sartorius 124S, com resolução de 0,1 mg (figura V.7).

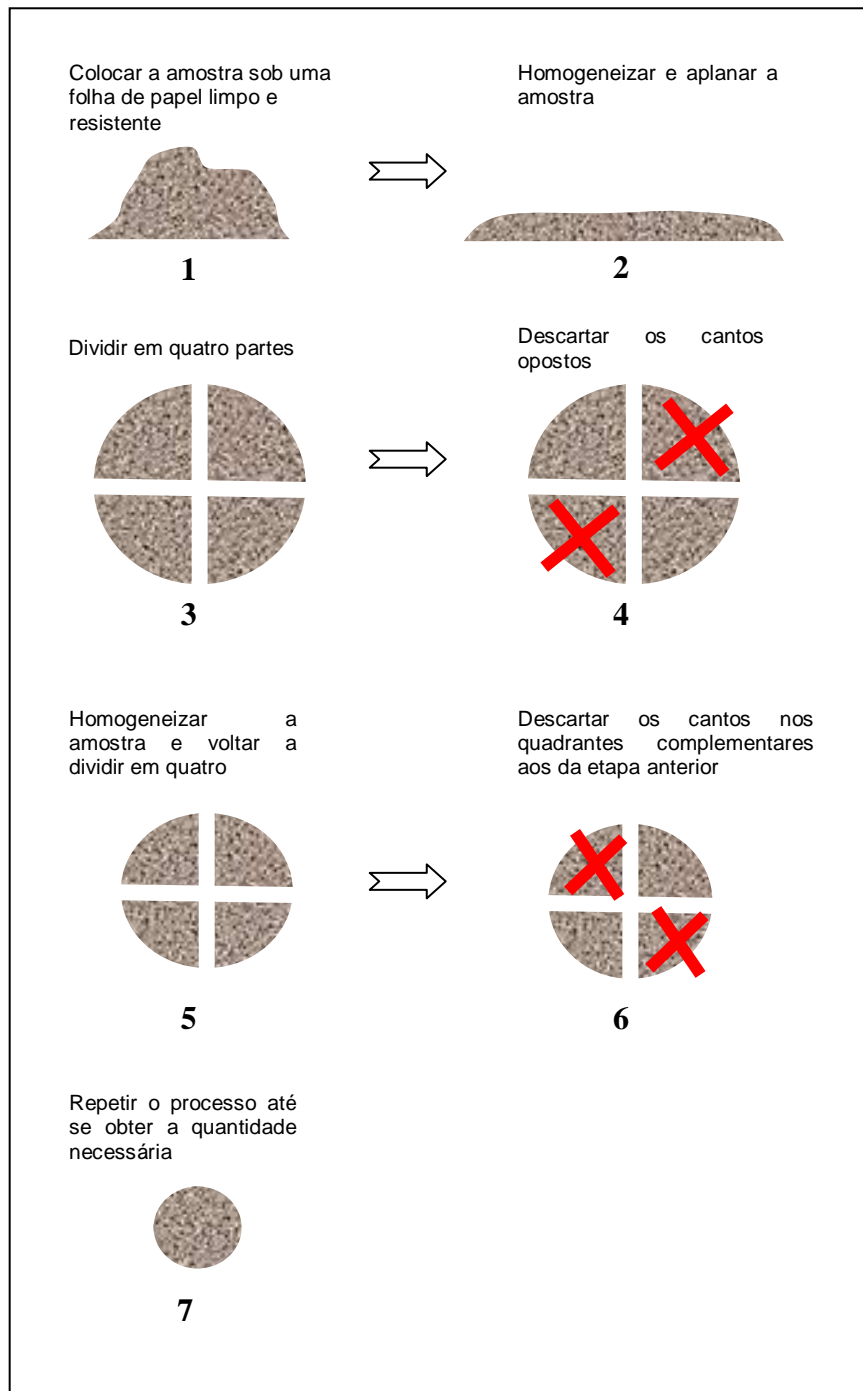


Fig. V.6 – Processo de quarteamento.



Fig. V.7 – Balança Sartorius.

### V.2.2 Preparação das amostras para análise química

As amostras seleccionadas para análise química foram sujeitas aos procedimentos elencados na secção anterior. Após a etapa 6, as amostras foram crivadas em peneiros de malha de nylon com abertura 180  $\mu\text{m}$  (mesh nº 80), de acordo com as especificações requeridas pelo laboratório em que foram feitas as análises químicas (AcmeLabs, Inc.). Antes da crivagem, o material foi moído num moinho de ágata (figura V.8 a)), durante  $\approx 20$  min. O material retido no peneiro foi, ainda, sujeito a nova moagem num outro moinho de ágata de menores dimensões (figura. V.8 b)). Esta operação foi repetida até que toda a amostra passasse no peneiro. Entre o tratamento de cada amostra, todo o material foi cuidadosamente limpo por lavagem com água destilada, procedendo-se à sua secagem na estufa. Os moinhos foram limpos com acetona, de acordo com as normas do Laboratório de Preparação de Amostras e de Separação de Minerais do Departamento de Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra. No material não passível de ser limpo com água ou com acetona, fez-se sempre a limpeza com ar comprimido.

## V. 3 ANÁLISES MAGNÉTICAS

A susceptibilidade magnética foi medida num susceptibilímetro AGICO Kappabridge, modelo KLY-4S (sensibilidade:  $3 \times 10^{-8}$  SI, campo aplicado: 300 A/m) (figura V.9), no Laboratório de Petrofísica, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, na Universidade do Porto. Para cada amostra foram feitas três leituras, das quais se obteve o valor médio.

Para determinar a magnetização remanescente natural e a magnetização remanescente isotérmica utilizaram-se um magnetómetro do tipo “fluxgate” Minispin (sensibilidade  $4,5 \times 10^{-5} \text{ Am}^{-1}$ ) (figura V.10) e um magnetizador (precisão 0,1 T) (figura V.11), ambos da marca Molspin, Ltd. Estas medições foram efectuadas no Departamento de Ciências da Terra, na Universidade de Coimbra.



Fig. V.8 – Moinhos de ágata a) moinho maior; b) moinho menor



Fig. V.9 - Susceptibilímetro AGICO Kappabridge.

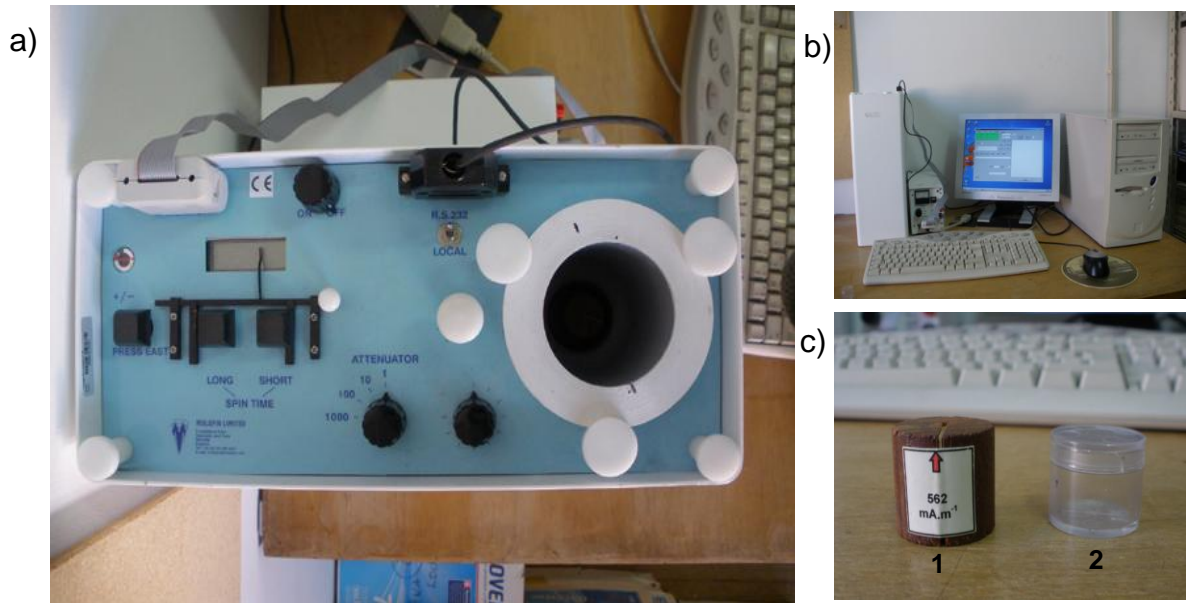


Fig. V.10 – a) Magnetómetro Molspin, b) magnetómetro acoplado ao computador; c) amostra de calibração (1) e porta-amostras (2).



Fig.V.11 – Magnetizador Molspin.

#### V.4 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas foram efectuadas no laboratório ACME (ACME- Analytical Laboratories, Ltd, Vancouver, Canada) por ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Através deste método determina-se a concentração dos elementos por contagem dos átomos presentes na solução, sendo mais preciso que o método ICP-ES (Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer), podendo detectar concentrações uma a duas vezes mais baixas em relação ao segundo método.

---

A metodologia utilizada foi a seguinte: foram aquecidos 0,25 g de amostra, numa mistura de  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$ -HF, e depois arrefecidos. O resíduo resultante foi dissolvido com HCl. Este método de digestão é parcial para a cromite, para a barite e para os óxidos de Al, Hf, Mn, Sn, Ta e Zr. Durante o aquecimento podem ser perdidos parcialmente, por volatilização, As, Sb e Au.

Os elementos determinados foram: Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Hf, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn e Zr.

## V.5 ANÁLISES MINERALÓGICAS

As análises mineralógicas foram efectuadas na fracção total (< 180  $\mu\text{m}$ ) e na fracção argilosa (<2  $\mu\text{m}$ ), por Difracção de Raios-X. Este método permite determinar qualitativamente os minerais presentes na amostra, através da interpretação dos difractogramas, e obter uma análise semiquantitativa, por comparação da intensidade dos picos dos vários minerais.

Estas análises foram efectuadas no Laboratório de Raio-X, na Universidade de Aveiro, de acordo com a metodologia descrita em Rocha (1993), utilizando difractómetros Philips PW1710 e X'Pert PW3040/60, ambos com monocromatizador de grafite e fenda de divergência automática e produção de radiação  $\text{Cu K}\alpha$ .

As amostras de solo, fracção total, foram analisadas em pó, não orientadas, no intervalo  $2^\circ$  a  $60^\circ$   $2\theta$ , a  $1^\circ$   $2\theta$  /min. A fracção <2  $\mu\text{m}$  foi separada por sedimentação de acordo com a Lei de Stokes, usando uma solução de 1% de hexametáfosfato de sódio para evitar a floculação. Foi analisada em agregados orientados, preparados à temperatura ambiente, tratados com glicerol e aquecidos a  $500^\circ\text{C}$ , no intervalo  $2^\circ$  a  $20^\circ$   $2\theta$ , a  $1^\circ$   $2\theta$  /min (Abrantes e Rocha, 2007; Martins *et al.*, 2007).

Para a análise semiquantitativa da fracção total, os conteúdos relativos de cada mineral identificado foram estimados tendo em conta a área dos picos-diagnóstico, calculada a meia altura (Rebelo *et al.*, 2010) e ponderada de acordo com os correspondentes poderes reflectores (tabela V.4), conforme critérios recomendados por Schultz (1964) e Thorez (1976 (cit. em Oliveira *et al.*, 2002)). A semi-quantificação dos minerais de argila baseou-se na área dos picos presentes nos três tipos de difractograma (Thorez, 1970 cit. em Lapa e Reis, 1977). Os minerais de argila identificados foram: illite (pico de 10 Å, amostra natural), caulinite (pico 7 Å, amostra natural, depois de subtraída a área da clorite) (Vidinha *et al.* 2007), clorite (pico de 7 Å e 14 Å, amostra  $500^\circ\text{C}$ ) e esmectite (17 Å, amostra glicerol). As áreas foram corrigidas de acordo com os poderes reflectores. A área da esmectite (17 Å) foi dividida por 4,0, a da illite (10 Å) por 0,5, a da clorite (7 Å)



(depois do aquecimento a 500 °C) por 0,75 e a área da caulinite (7 Å) por 1,0 (Oliveira *et al.*, 2002; Martins, *et al.*, 2007).

Tabela V.4 - Picos diagnóstico e factores de ponderação (adaptado de Martins *et al.*, 2007).

Mineral	Pico diagnóstico d (Å)	Área do pico dividida por
Quartzo	3,34	2,00
Filossilicatos	4,45	0,20
Feldspato potássico	3,24	1,00
Plagioclase	3,18	1,00
Calcite	3,03	1,00
Dolomite	2,88	1,00
Magnetite-maghemite	2,53	1,00
Hematite	2,68	1,30
Siderite	2,79	1,00
Plumbogumite	1,90	0,75
Jarosite	2,28	1,50

Os índices de cristalinidade dos minerais argilosos foram calculados considerando a medida da largura a meia altura dos picos-diagnóstico. Para determinar o índice de cristalinidade da caulinite, calculou-se a razão entre a largura, medida a meia-altura do pico de 7 Å, e a altura, depois da decomposição dos picos de 7 Å da caulinite e da clorite. O índice de cristalinidade da illite (índice de Kubler/Segonzac) foi calculado considerando a largura a meia-altura do pico de 10 Å (Oliveira *et al.*, 2002; Abrantes e Rocha, 2007).

## V.6 ANÁLISES CONVENCIONAIS DE SOLO

As análises convencionais de solo, para determinação dos parâmetros pedológicos, das amostras dos diferentes horizontes dos perfis de solos, foram efectuadas no Laboratório de Solos da Escola Superior Agrária de Coimbra de acordo com a metodologia descrita na tabela V.5.



Tabela V.5 – Metodologia correspondente aos parâmetros analíticos determinados nas amostras de solo e respectiva bibliografia.

Parâmetro	Método	Bibliografia
Textura de campo	Avaliação manual	L.Q.A.R.S., 1977
pH (H <sub>2</sub> O)	Electrometria 1:2,5	ISO 10390, 2005
Matéria orgânica	Oxidação a 550°C	LECO <sup>®</sup> , 1997
Condutividade eléctrica	Extracto solo:água (1:2)	Póvoas e Barral, 1992
Fósforo assimilável	Egner-Riehm	Balbino, 1968; L.Q.A.R.S., 1986
Potássio assimilável		

## V.7 ANÁLISES SEM/EDS

Para efectuar este tipo de análises, foram obtidos extractos magnéticos com o auxílio de um íman de mão, que foram depois dispersos em acetona, montados numa superfície aderente e revestidos a ouro. As análises de Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) foram efectuadas no Laboratório de Ensaio e Desgaste de Materiais do Instituto Pedro Nunes (Coimbra). Foi utilizado um microscópio electrónico de varrimento JEOL - JSM 5310 (figura V.12). As análises de Energia Dispersiva de raio-X (EDS) foram efectuadas no Laboratório do Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, num microscópio de varrimento Philips XL30 equipado com uma microsonda EDS de raio-X para análise química (figura V.13).



Fig. V.12 – Microscópio electrónico de varrimento.

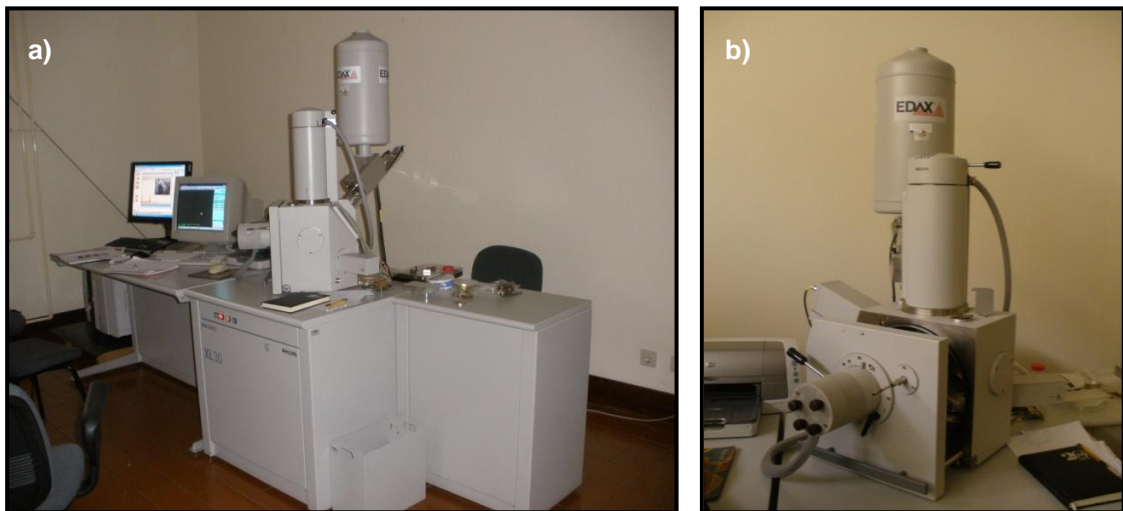


Fig. V.13 –Microscópio electrónico de varrimento (a) com sistema EDS acoplado (b).

## V.8 PRODUÇÃO DE CARTOGRAFIA, GRÁFICOS E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Para representação gráfica, exploração e análise da informação recorreu-se ao programa informático ArcGis (versão 9.3), desenvolvido pela E.S.R.I.- Environmental Systems Research Institute (2007). Esta ferramenta informática, designada usualmente por SIG (Sistema de Informação Geográfica), é um sistema de processamento de informação geográfica que abrange diferentes técnicas de tratamento e manipulação de dados geográficos e que permite aliar informação de carácter espacial (em formato “raster” ou vectorial) a uma base de dados constituída por tabelas de atributos. Assim, é possível representar, manipular e organizar a respectiva informação geográfica e produzir documentos diversos como mapas, perfis e gráficos. Esta aplicação é constituída por três

módulos ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox com funcionalidades diferentes. O ArcMap permite a construção de cartografia e análise de dados com ferramentas de edição simples e a construção, análise, edição e exportação de mapas. O ArcCatalog permite fazer a gestão de ficheiros (à semelhança do Windows Explorer) e ainda criar e editar metadados, representar o conteúdo dos dados espaciais e tabelas ou conectar-se a servidores de dados espaciais. No ArcToolbox é possível desempenhar tarefas tais como gestão de dados geográficos, construção de cartografia, análise avançada de dados e ligação a bases de dados externos de natureza variada. No ArcMap elaboraram-se os mapas que traduzem a variação espacial dos parâmetros magnéticos e, como método de interpolação dos dados, utilizou-se o método de IDW (Inverse Distance Weighted). Os cálculos estatísticos foram efectuados com recurso ao programa SPSS V.19, da IBM. Este é um programa de tratamento de dados e análise estatística que, embora vocacionado para as Ciências Sociais, é utilizado em várias áreas, devido ao seu fácil manuseamento (mesmo para utilizadores inexperientes) e inúmeras funcionalidades que oferece. Entre outras tarefas é possível criar e importar ficheiros de dados; ordenar, modificar e preparar os dados para análise; executar diversos testes estatísticos tais como testes de normalidade, comparações de médias, correlações e contagens de frequências e ainda vários tipos de análise de dados como, por exemplo, de componentes principais, factorial e de variância.

## **Capítulo VI**

# **INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## VI.1 ANÁLISES MAGNÉTICAS

As propriedades magnéticas das amostras de solo foram estudadas a partir da medição da susceptibilidade magnética ( $K$ ), da MRN e da MRI. Foram calculados o parâmetro HMRI e os coeficientes  $S$  e  $L$ . Foi determinada a massa das amostras para que todos os valores fossem normalizados em função desta variável. Nos subcapítulos VI.1.1 e VI.1.2 apresentam-se os resumos estatísticos para cada um dos parâmetros determinados, para o conjunto total de amostras. Os perfis de solos serão analisados em pormenor, no subcapítulo VI.6. Em anexo, são apresentados os resultados das medições magnéticas (Anexo 8).

### VI.1.1 Susceptibilidade magnética

A  $\chi$  apresenta uma variação de 0,038 a  $12,487 \times 10^{-6} \text{ kg}^3\text{m}^{-1}$ , semelhante à encontrada por Hanesch e Sholger (2002) ( $0,040$  a  $11,470 \times 10^{-6} \text{ kg}^3\text{m}^{-1}$ , para a região da Styria) e Lu *et al.* (2007) ( $0,310$  a  $11,280 \times 10^{-6} \text{ kg}^3\text{m}^{-1}$ ), com um valor médio de  $1,197 \times 10^{-6} \text{ kg}^3\text{m}^{-1}$ . A  $K$  apresenta um valor médio de  $554,508 \times 10^{-6} \text{ SI}$ , com um mínimo de  $14,033 \times 10^{-6} \text{ SI}$  e um máximo de  $3659,167 \times 10^{-6} \text{ SI}$  (tabela VI.1).

Tabela VI.1 – Resumo estatístico das medições da susceptibilidade magnética, para  $n=213$ .

Parâmetro	$\chi$ ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	$\kappa$ ( $10^{-6} \text{ SI}$ )
<b>m</b>	0,038	14,033
<b>M</b>	12,487	3659,167
<b>Md</b>	1,197	554,508
<b>DP</b>	2,036	937,751
<b>CV</b>	1,700	1,690
<b>P10</b>	0,094	54,147
<b>P25</b>	0,175	83,967
<b>P50</b>	0,405	190,533
<b>P75</b>	0,737	349,267
<b>P95</b>	6,285	3109,407

M - mínimo; M - máximo; Md - média; DP- desvio-padrão;  
CV - coeficiente de variação; P10 - P95 - percentis

Os valores mais elevados para a  $\chi$  observaram-se para a amostra 93 ( $12,487 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ), colhida num local relativamente elevado ( $\approx 150 \text{ m}$ ), afastada de estradas e/ou outras fontes

de poluição (figura VI.1), e para as amostras 77 e 137 ( $7,347 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  e  $7,101 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ , respectivamente). A amostra 137 foi colhida próximo da estação dos caminhos-de-ferro, Coimbra-B (figura VI.2) e a amostra 77 nas imediações da Estrada Nacional nº 17 e da linha de caminho-de-ferro (figura VI.3). Esta estrada é uma das principais entradas da cidade, havendo neste troço, formação de filas de trânsito nas horas de ponta. Em relação a estas duas amostras, a influência do tráfego rodoviário e ferroviário permite justificar os valores observados para a  $\chi$ .

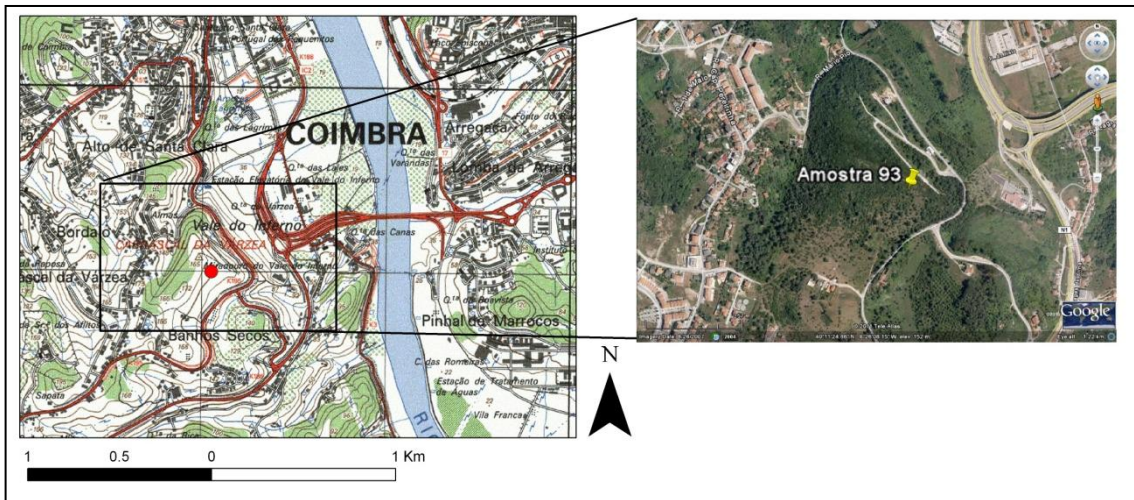


Fig.VI.1 – Localização da amostra 93.

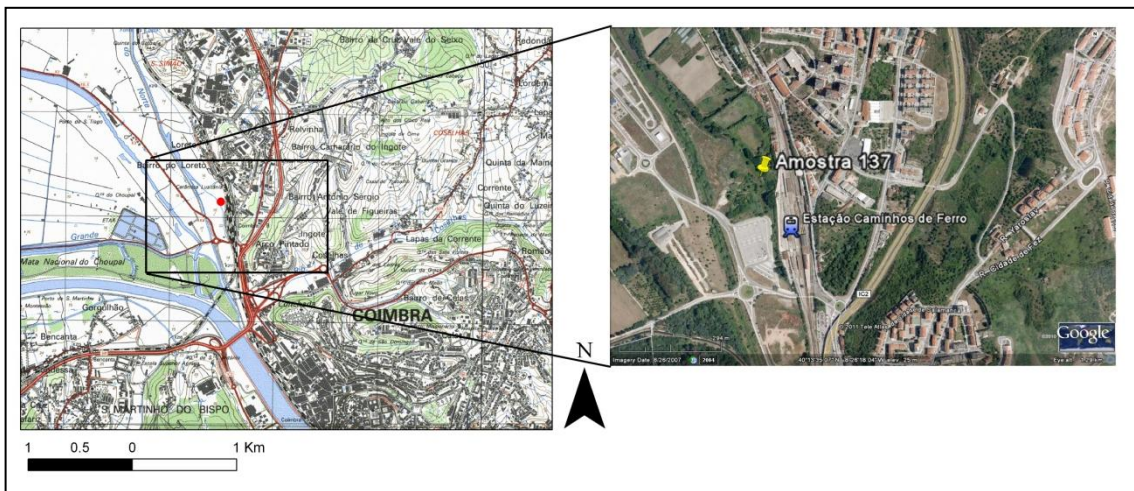


Fig. VI.2 – Localização da amostra 137.



Em relação à amostra 93, a existência de um estaleiro de obras de construção civil nas proximidades pode justificar o valor elevado para a  $\chi$ , acordo com informação oral da Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Celeste Gomes, que obteve resultados idênticos em estudos sobre poluição por partículas.

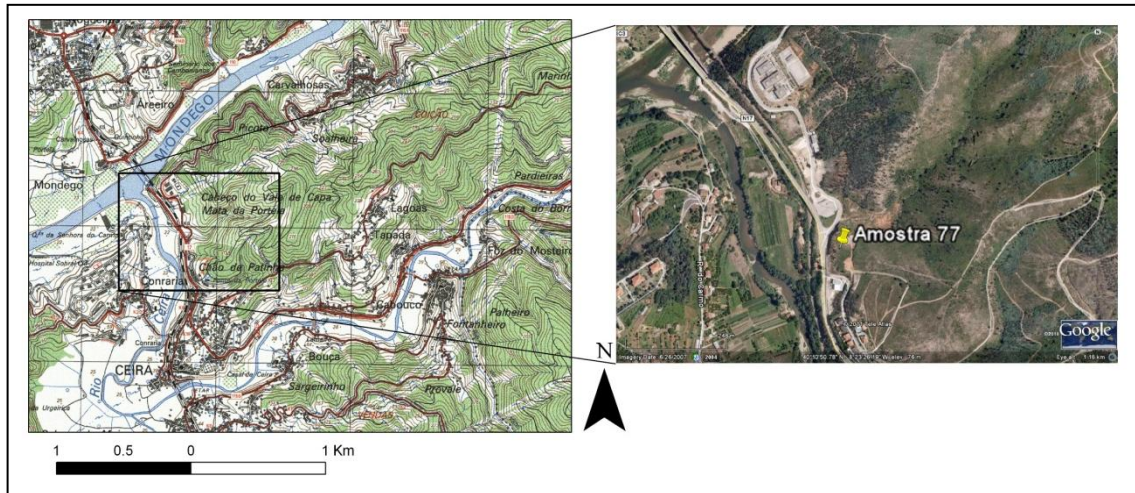


Fig. VI.3 – Localização da amostra 77.

As amostras P6A1 e 44 (figuras VI.4 e VI.5) exibem os valores mais baixos para a  $\chi$  ( $0,038 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  e  $0,049 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ , respectivamente); estas amostras foram colhidas em áreas florestais (pinhal), afastadas do centro urbano, de vias de comunicação principais e de unidades industriais.

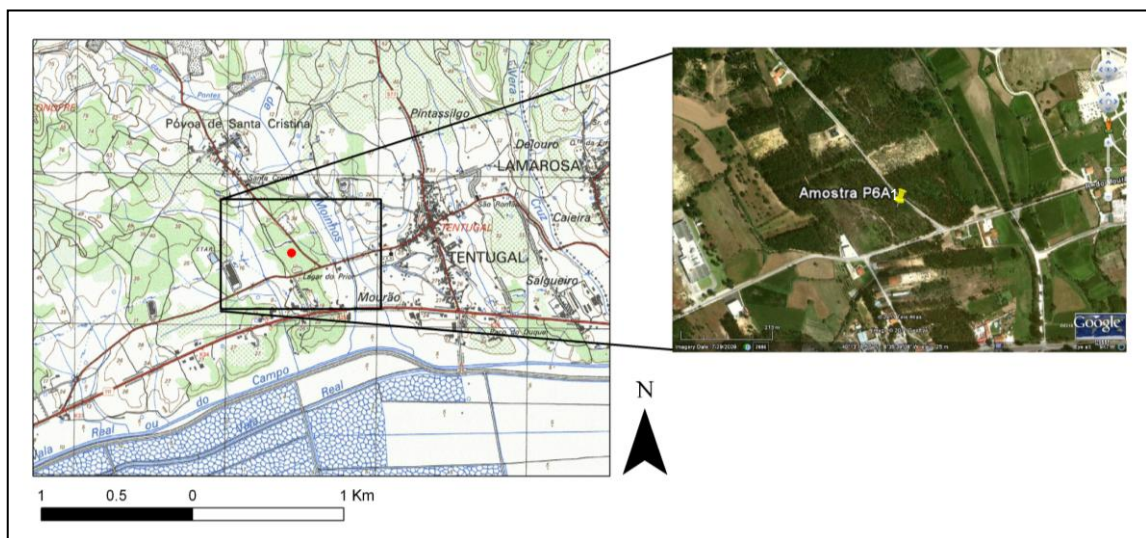


Fig. VI.4 – Localização da amostra P6A1.



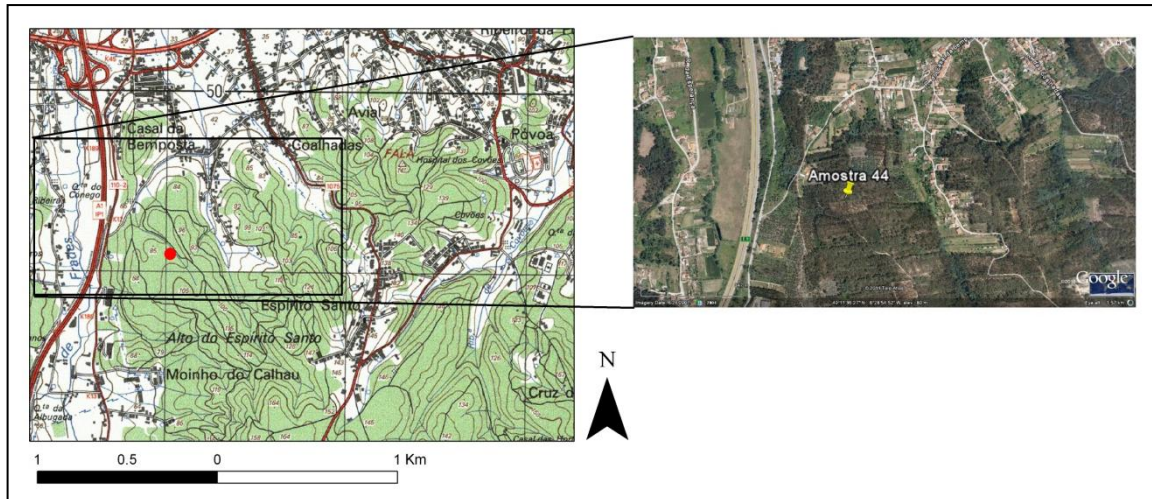


Fig. VI.5 – Localização da amostra 44.

A distribuição dos valores da  $\chi$  é apresentada na figura VI.6. Para elaboração do histograma, foram calculados os logaritmos naturais dos valores da  $\chi$ , dado a distribuição se assemelhar mais a uma distribuição lognormal do que a uma distribuição normal. Este procedimento foi igualmente adoptado por autores como Hanesh e Sholger (2002), Hanesh *et al.* (2003), Boyko *et al.* (2004) e Kapička *et al.* (2008).

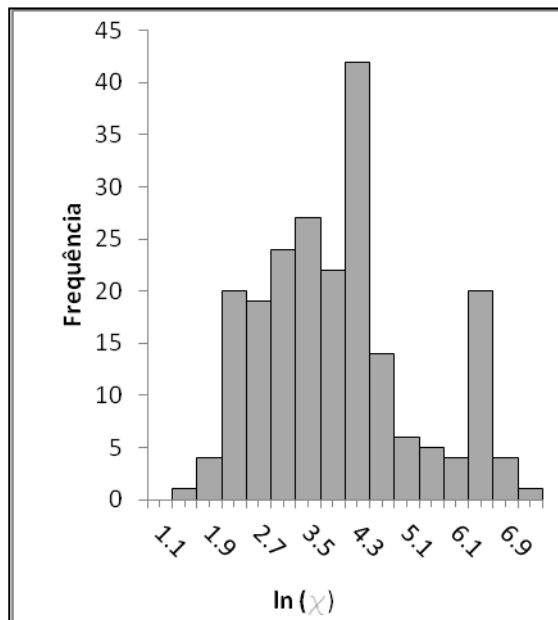


Fig. VI.6 - Histograma dos valores da  $\chi$  ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ).

A  $\chi$  depende de muitos factores, entre os quais se inclui o tipo de solo. Para analisar a influência dos diferentes tipos de solos nos valores da  $\chi$ , foram seleccionadas e individualizados grupos de amostras colhidas sobre cada uma das principais manchas de solos na área (Lourenço *et al.*, 2011a). Esta análise foi feita para as amostras colhidas em Cambissolos, Fluvissois e Leptossolos, manchas que assumem maior expressão na área sob investigação. Verificou-se que os valores médios da  $\chi$  são  $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  para os Leptossolos,  $0,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  para os Cambissolos e  $0,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  para os Fluvissois (figura VI.7). Os Cambissolos apresentam valores médios semelhantes aos observados para o mesmo tipo de solos ( $0,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ) em Maher (1998).

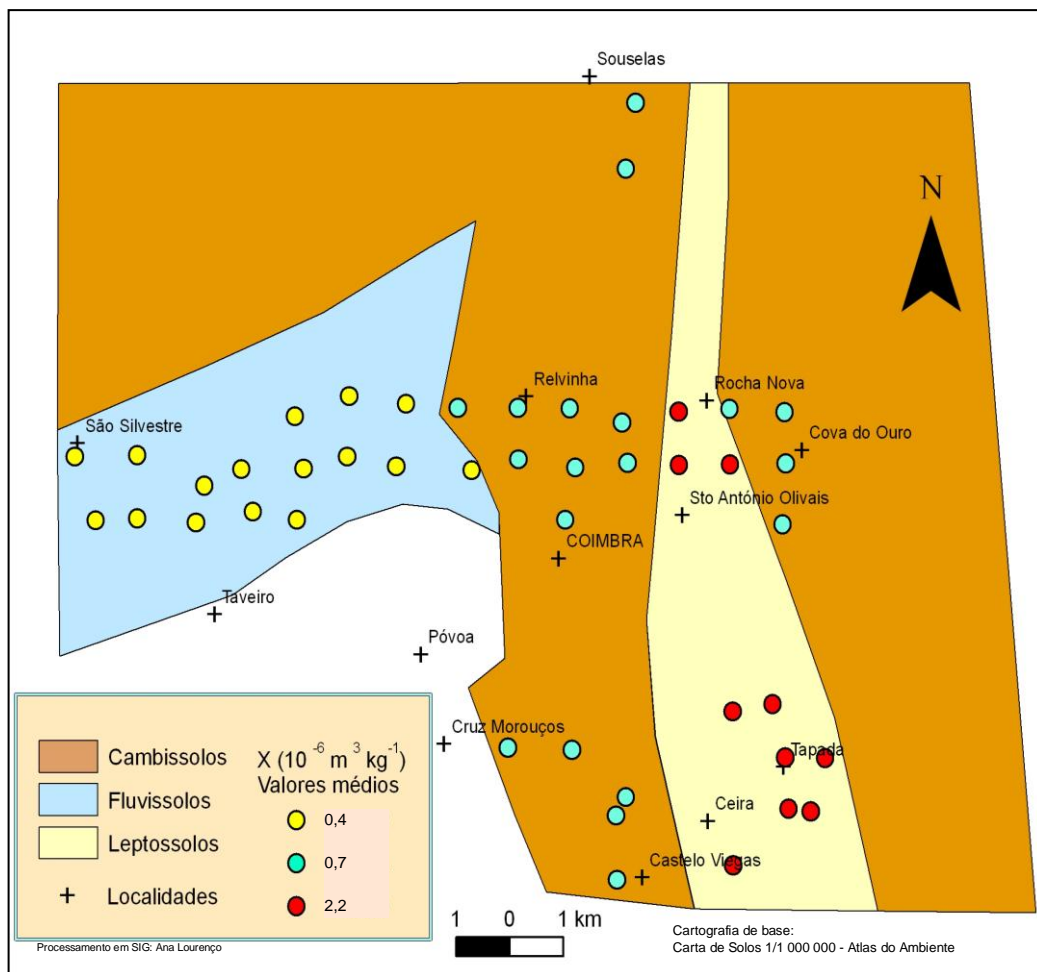


Fig. VI.7 – Valores médios da susceptibilidade magnética nos principais tipos de solos.

Para conhecermos a variação espacial dos valores da  $\chi$ , à superfície, foi elaborado o mapa apresentado na figura VI.8. Para interpolação dos valores utilizou-se o método de IDW (Inverse Distance Weighted). Este método estima o valor de cada célula pela média dos valores de pontos na vizinhança da célula em processamento. Quanto mais próximo da

célula está um ponto, mais influência, ou peso, tem no processo de cálculo da média. Este método assume que a variável a mapear diminui a sua influência com a distância ao ponto amostrado. No mapa da figura VI.8, que nos permite ter uma perspectiva geral da variação espacial dos valores da  $\chi$  superficial, para a área total, é visível a existência de um padrão em que os valores mais altos se distribuem preferencialmente na faixa mais a Este. É nesta faixa que se situa a cidade de Coimbra e zona peri-urbana, co-responsáveis pelo aumento significativo do sinal magnético. Os valores mais elevados mostram também estar relacionados com a natureza do substrato geológico, especialmente na zona mais a este da área de estudo, constituído por rochas metamórficas (xistos e grauvaques) (Cap.IV, secção IV.2.1). As amostras de solos que se localizam em terrenos metamórficos apresentam, em média, valores de  $\chi$  mais elevados do que os obtidos em amostras colhidas em áreas de rochas sedimentares. O confronto entre as duas principais unidades morfo-estruturais nesta área, a Orla Mesoceno-zóica Ocidental e o Maciço Hespérico, também está bem marcado pela variação acentuada de tonalidades, traduzido pelo padrão de distribuição dos valores da  $\chi$ .

Para melhor compreender os factores responsáveis pela variação dos valores da  $\chi$ , elaborou-se um segundo mapa utilizando uma simbologia diferente, já ensaiada em Lourenço (2003). Esta metodologia é adoptada também por Zhang *et al.* (2012). Neste tipo de legendagem, existe uma correspondência entre o diâmetro e a cor do círculo (símbolo escolhido no presente estudo) e o valor da  $\chi$  que ele representa (“graduated symbols”). Esta metodologia permite uma leitura mais clara e uma melhor percepção da localização dos pontos com valores extremos, podendo relacioná-los com as características do terreno. Da leitura deste mapa, podemos observar que os valores da  $\chi$  são mais elevados nas proximidades do centro urbano (Coimbra), junto a 1) vias de comunicação; 2) algumas linhas de água, 3) estação dos caminhos-de-ferro, 4) locais de obras e 5) uma unidade industrial de fabrico de cimento (Souselas) (figura VI.9). Na periferia da vila de Montemor-o-Velho observa-se também um ligeiro aumento dos valores da susceptibilidade. Os valores mais baixos observam-se nas zonas mais afastadas dos centros urbanos, ocupadas maioritariamente por campos agrícolas. Esta interpretação corrobora aquela efectuada para os dados dos solos de uma área a oeste da cidade de Coimbra (Lourenço, 2003; Lourenço *et al.*, 2004).

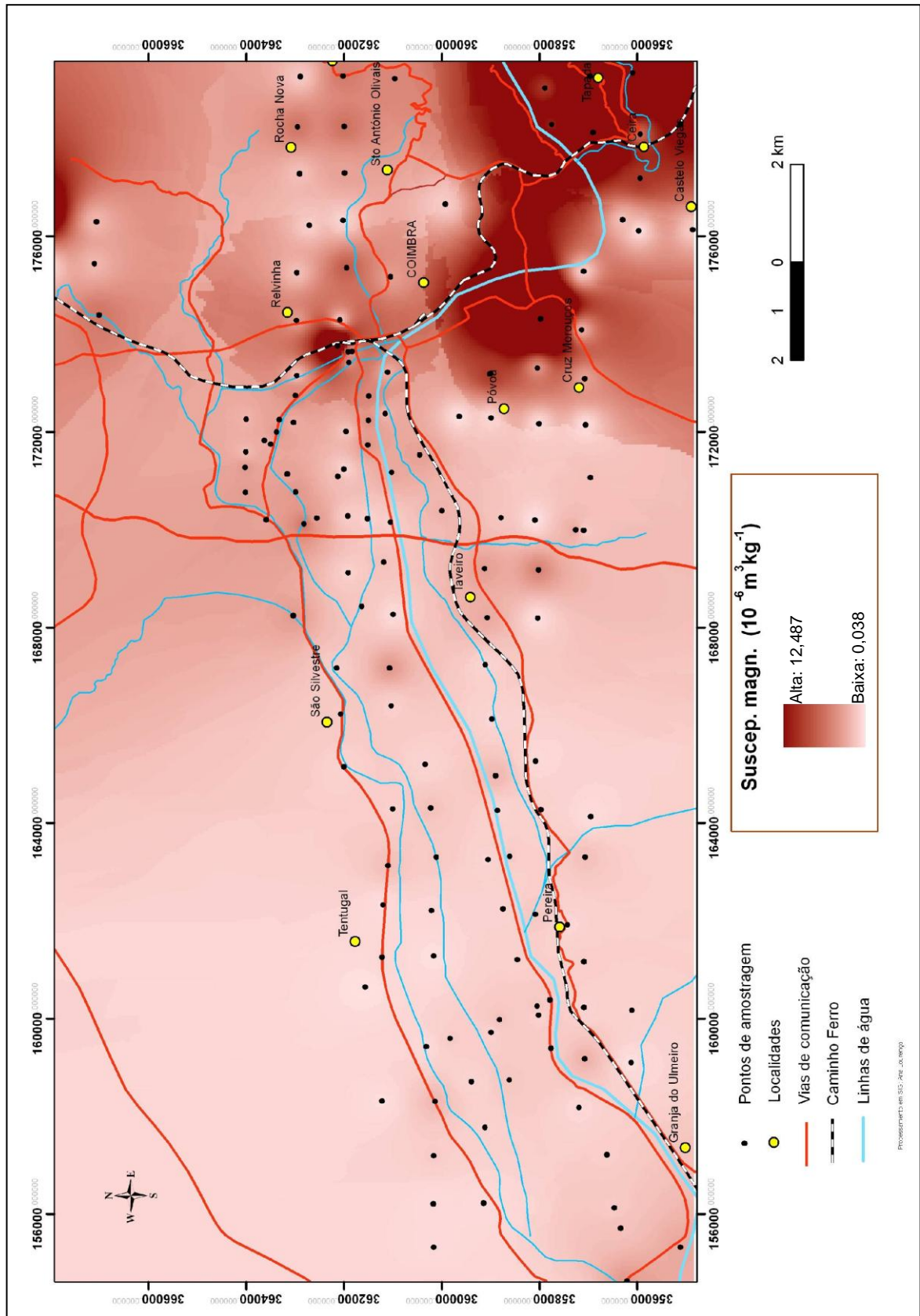


Fig. VI.8 – Variação espacial da susceptibilidade magnética (“IDW”).



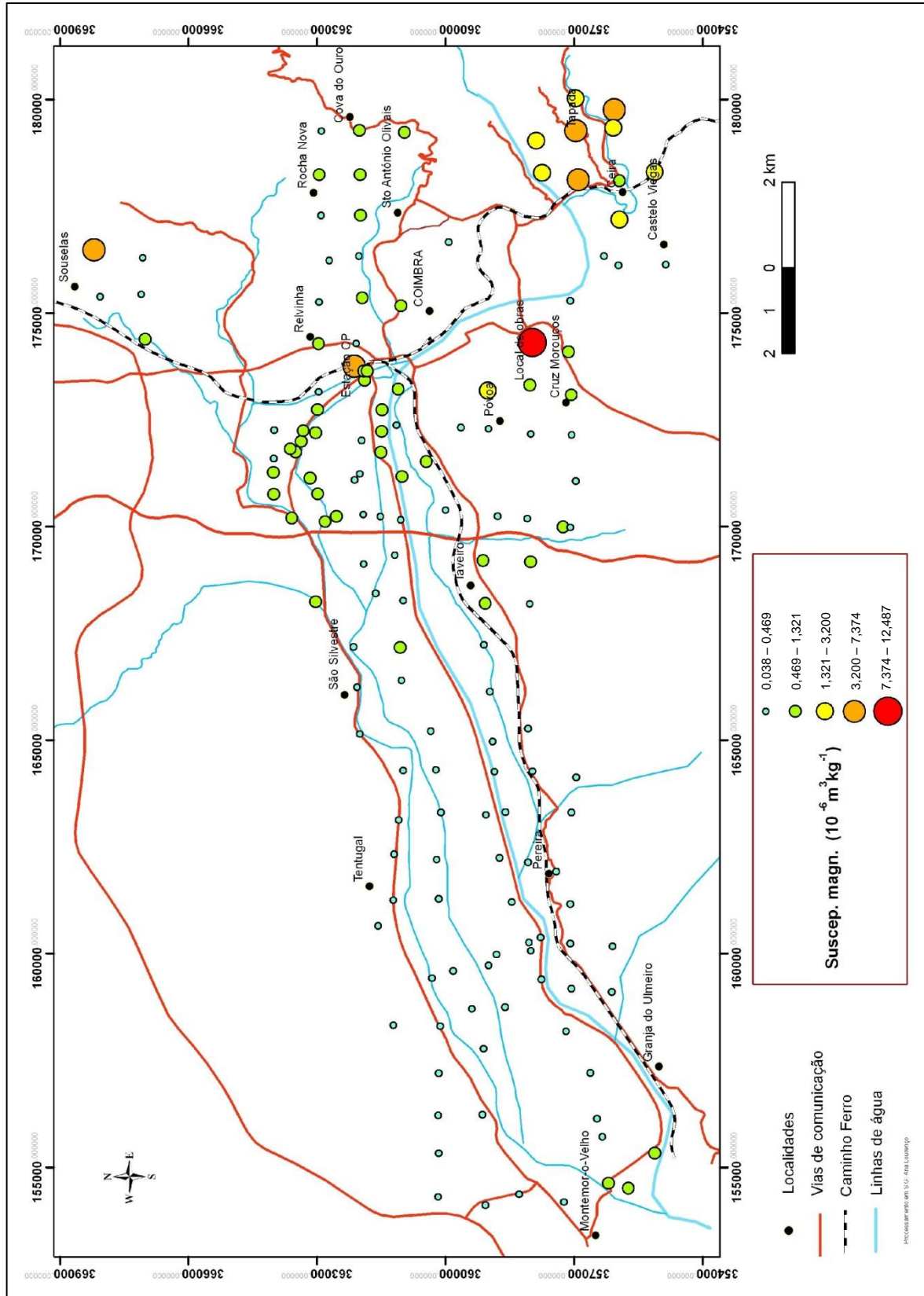


Fig. VI.9 – Variação espacial da susceptibilidade magnética ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) (“graduated symbols”).

### VI.1.2 Magnetização remanescente natural e isotérmica

O resumo estatístico das medições da magnetização é apresentado na tabela VI.2.

Tabela VI.2 - Resumo estatístico das medições da magnetização, para n=213.

Parâmetro	MRN ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ )	MRI <sub>-100 mT</sub> ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )	MRI <sub>-300 mT</sub> ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )	HMRI ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )
<b>m</b>	0,20	0,28	14,35	56,94	0,36
<b>M</b>	2479,21	107,40	29204,80	30296,13	1177,70
<b>Md</b>	30,93	11,40	4028,95	3975,00	93,37
<b>DP</b>	177,12	19,31	7153,83	7121,95	145,65
<b>CV</b>	5,73	1,75	1,78	1,79	1,56
<b>P10</b>	1,07	0,79	157,93	236,39	16,10
<b>P25</b>	1,54	1,33	397,75	443,91	26,92
<b>P50</b>	2,57	2,79	996,88	966,07	46,63
<b>P75</b>	6,60	6,62	2135,18	2349,04	91,99
<b>P95</b>	95,22	56,39	22540,21	22966,71	314,68

m-mínimo; M-máximo; Md-média; DP-Desvio-padrão;  
CV-Coeficiente de variação; P10-P95-percentis.

Os valores da MRI, obtidos para os vários campos aplicados, apresentam também uma ampla variação. Os factores responsáveis por esta variação são os apontados para a variação dos valores da  $\chi$ . As amostras que exibem os valores mais elevados para a MRI<sub>1T</sub> são as 93 ( $107,40 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ), 77 ( $74,22 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) e 137 ( $72,14 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ). As amostras 119 ( $0,33 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) (figura VI.10) e P6A1 ( $0,52 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) apresentam os valores mais baixos. A amostra 119 foi colhida numa zona florestal e, embora o local de amostragem se situe perto da auto-estrada A14 e de um acesso à mesma, a construção destas infraestruturas é relativamente recente (figura VI.10). A distribuição dos valores da MRI<sub>1T</sub> está representada no histograma da figura VI.11. À semelhança do que acontece com os valores da  $\chi$ , também os valores da MRI<sub>1T</sub> seguem uma distribuição lognormal. As curvas de aquisição da MRI de um conjunto de amostras são apresentadas na figura VI.12. A partir da análise das curvas de magnetização e dos quocientes S (secção VI.1.2.2) podemos estabelecer que MRI<sub>1T</sub> = MRIs, para a maioria das amostras.

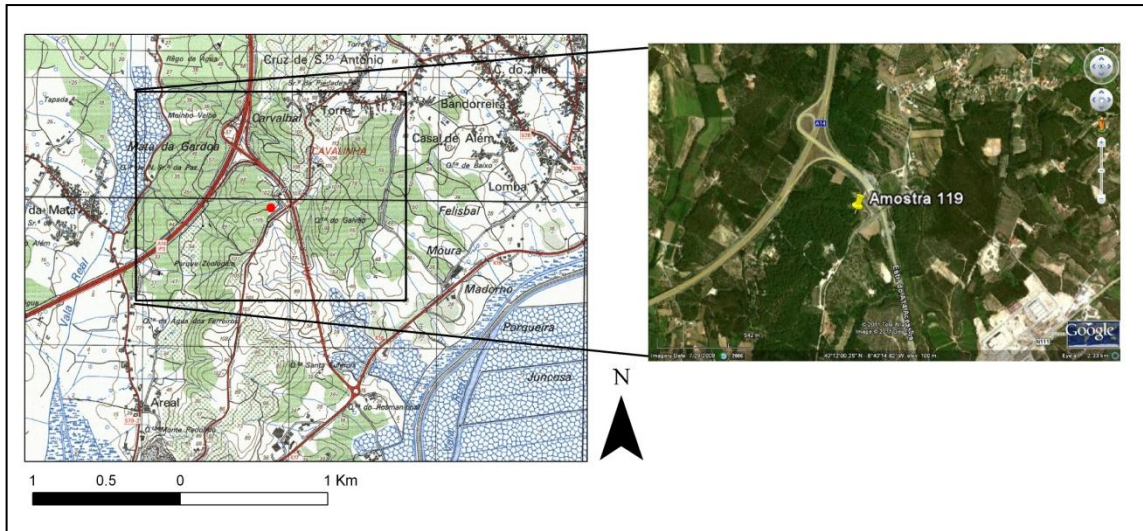


Fig. VI.10 – Localização da amostra 119.

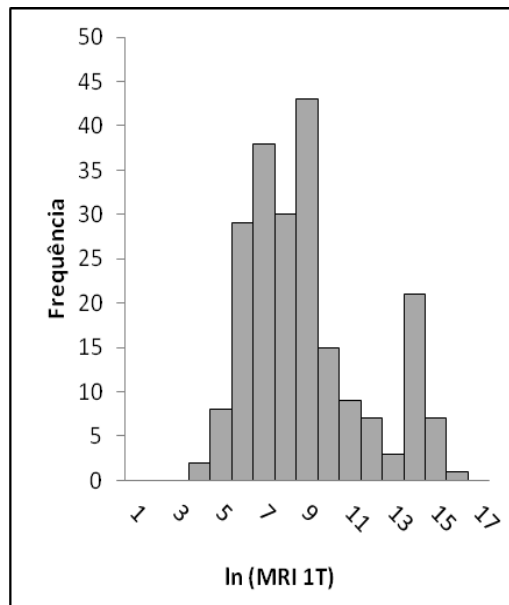


Fig. VI.11 - Histograma dos valores da  $MRI_{1T}$  ( $10^{-6} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ ).

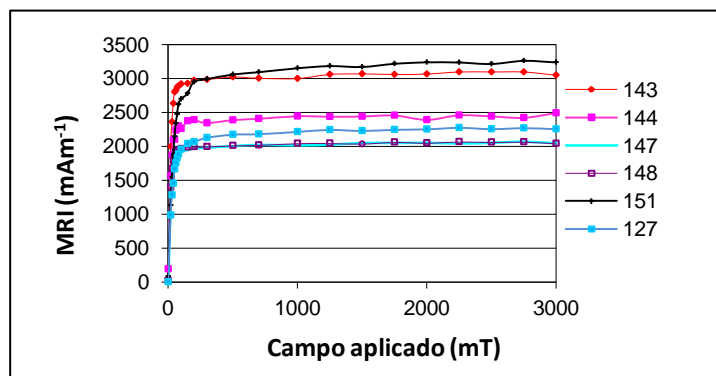


Fig. VI.12 – Curvas de aquisição da MRI.



### VI.1.2.1 Relação entre a magnetização remanescente isotérmica e a susceptibilidade magnética

Os valores da  $MRI_{1T}$  apresentam uma correlação elevada com os valores da  $\chi$  ( $r$  de Spearman = 1), correlação semelhante àquela determinada por Hanesh *et al.* (2003) e Lecoanet *et al.* (2003) (figura VI.13).

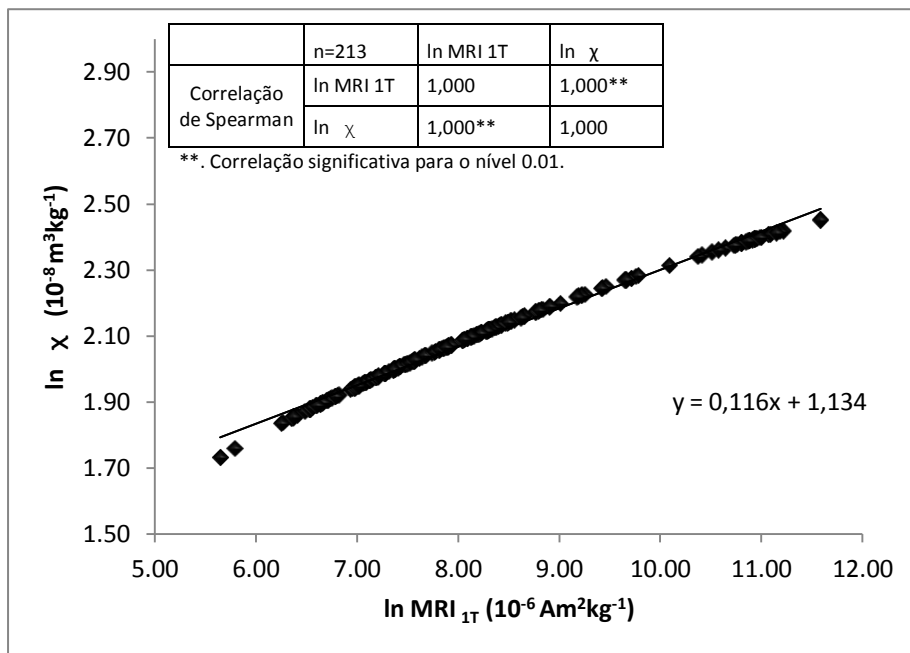


Fig. VI.13 – Correlação entre a  $MRI_{1T}$  e a  $\chi$ .

A correlação verificada entre a  $MRI_{1T}$  e a  $\chi$  permite justificar que os valores extremos se verifiquem praticamente para as mesmas amostras. O mapa da variação espacial da  $MRI_{1T}$  à superfície (figura VI.14) apresenta assim o mesmo padrão de distribuição. A razão entre a MRIs e a  $\chi$  pode ser utilizada para estimar o tamanho das partículas magnéticas (Thompson e Oldfield, 1986) quando projectados os valores destes dois parâmetros num gráfico de dispersão bi-logarítmico (“Thompson’s plot”) (figura VI.5). A magnitude destes parâmetros magnéticos dá indicações sobre a concentração e a razão entre as duas fornece informação sobre a granulometria. De acordo com Thompson and Oldfield (1986), valores na ordem dos  $10 \text{ kAm}^{-1}$  são característicos de magnetite com granulometria  $\approx 5 \mu\text{m}$ , e de acordo com Sandgren and Thompson (1990), típicos para granulometrias na ordem dos  $8 \mu\text{m}$ . Esta relação dá indicações sobre a granulometria partindo-se do pressuposto de que a mineralogia é homogénea (Moreno *et al.*, 2003).

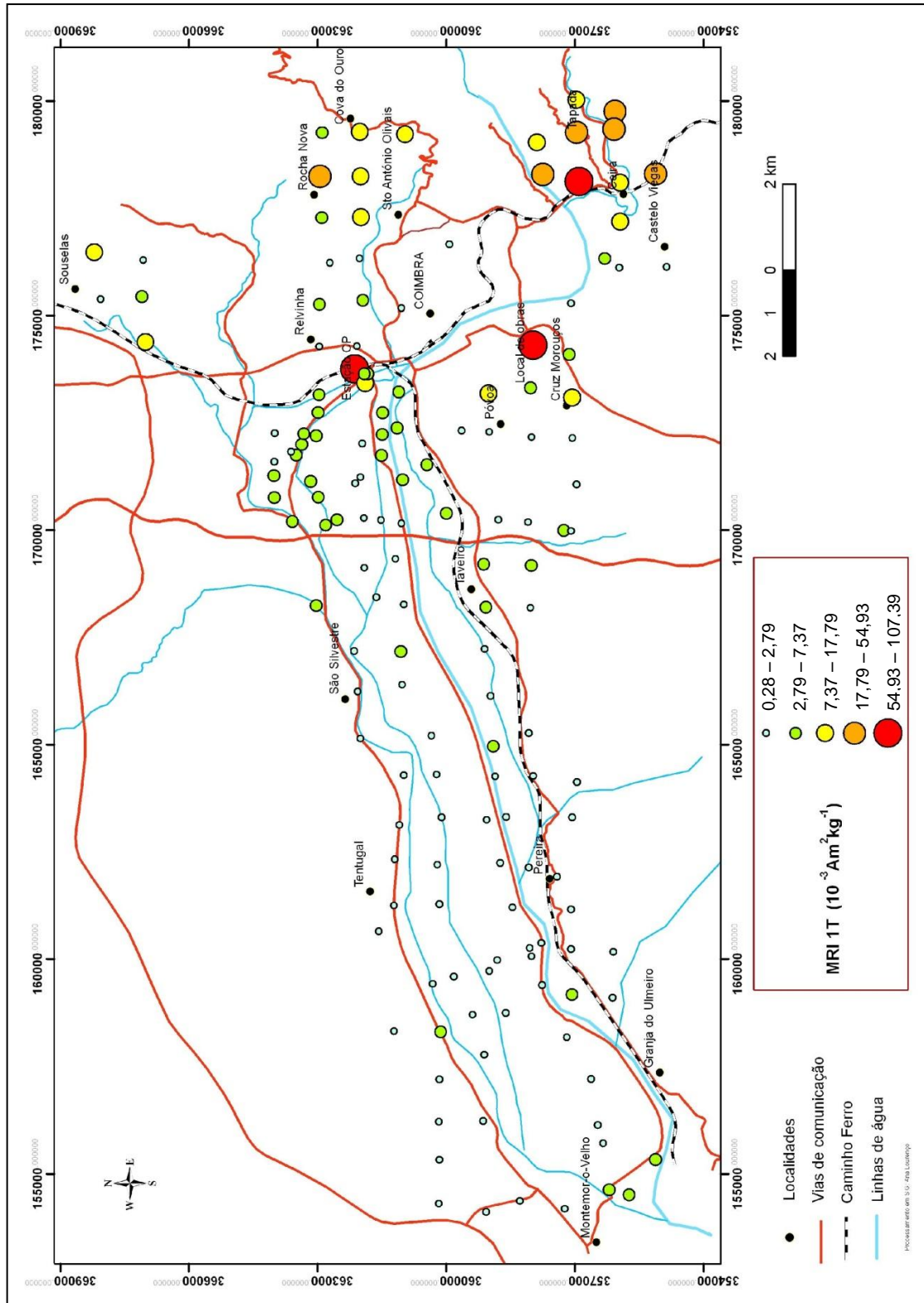


Fig.VI.14 – Variação espacial da MRI<sub>1T</sub> (10<sup>-3</sup> Am<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>).

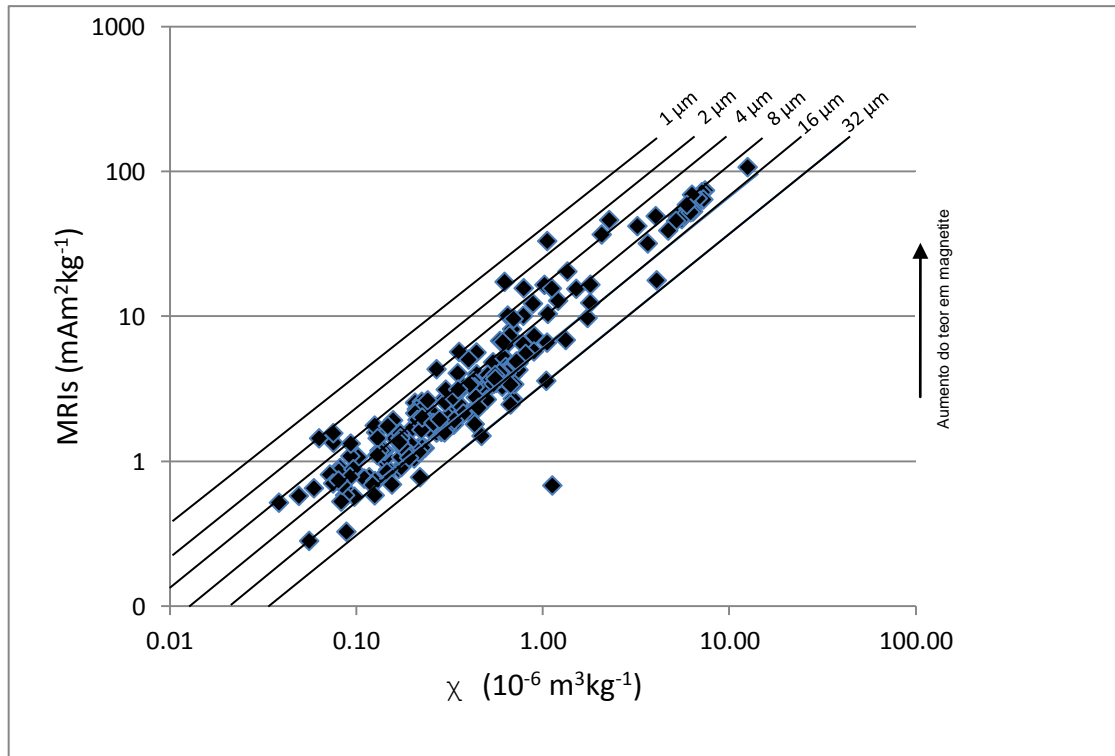


Fig. VI.15 – “Thompson’s plot” (adaptado de Sandgren e Thompson, 1990).

De acordo com o gráfico (figura VI.15), as granulometrias, de um modo geral, situam-se entre os 4 e os 16  $\mu\text{m}$ . Deve ter-se em conta que estes valores são apenas indicativos, dado que os autores realizaram os seus estudos utilizando amostras de magnetite sintética.

#### VI.1.2.2 Quocientes S e HMRI

Os quocientes S representam o valor obtido para a magnetização de uma amostra, depois de saturada e exposta a um campo inverso, dividido pelo valor da magnetização de saturação, considerada neste trabalho para um campo de 1 T. Estes quocientes permitem discriminar entre minerais anti-ferromagnéticos e minerais ferrimagnéticos (e.g. Maher, 1986). Robinson (1986, cit. em Hanesch *et al.*, 2003) refere que valores  $> 0,7$  são indicativos de uma componente ferrimagnética dominante. No presente trabalho foram calculados os quocientes  $S_{-100}$  e  $S_{-300}$  definidos, respectivamente, como

$$S_{-100} = \text{MRI}_{-100 \text{ mT}} / \text{MRIs}$$

$$S_{-300} = \text{MRI}_{-300 \text{ mT}} / \text{MRIs}$$

Minerais ferrimagnéticos como a magnetite exibem valores  $\approx 1$  para o quociente  $S_{-300}$ . Quanto mais baixo for este quociente, maior é o teor em minerais antiferromagnéticos, como a hematite (e.g. Liu *et al.*, 2007). De acordo com Lecoanet *et al.* (2003), as emissões produzidas pelos veículos automóveis apresentam maior percentagem de partículas ferrimagnéticas em oposição às cinzas volantes que exibem um comportamento magnético mais “duro”, por possuírem maior conteúdo em hematite. Thompson e Oldfield (1986) obtiveram valores para o quociente  $S_{-100}$  na ordem dos 0,52 a 0,63 o que, segundo os autores se deve à presença predominante de hematite.

Neste estudo, os valores médios para estes quocientes,  $S_{-100}=0,7$  e  $S_{-300}=0,9$ , são indicativos da presença de minerais ferrimagnéticos (magnetite e/ou maghemite), em concentração superior à dos minerais antiferromagnéticos. No entanto, algumas amostras exibem valores para o quociente  $S_{-300}$  inferiores a 0,7, o que poderá ser devido a uma fracção antiferromagnética predominante. Incluem-se neste grupo as amostras P2C, 86, P3C1, 80, 84 e P1C2 (figura VI.16). As amostras 106, P3C2 e P2B exibem valores próximos de 0, o que sugere que, nestas amostras, as contribuições de hematite e/ou maghemite são muito significativas (Liu *et al.*, 2007) ou que possuem uma quantidade muito pequena de material ferromagnético s.l. (Lecoanet *et al.*, 2003). As amostras P1C2, P2C e P3C1 foram colhidas em profundidade, no horizonte C, pelo que é de esperar uma contribuição antiferromagnética mais evidente, como observado em Sandgren e Thompson (1990).

O parâmetro HMRI foi calculado como  $HMRI = 0,5 \times (MRIs + MRI_{-300\text{ mT}})$  (e.g. Frank e Nowaczyk, 2008; Horng *et al.*, 2008). Este parâmetro permite estimar a contribuição dos minerais antiferromagnéticos nas amostras. Teoricamente, a HMRI elimina as contribuições de minerais fortemente magnéticos, mas de baixa coercividade, porque estes minerais saturam em campos abaixo de 300 mT. A HMRI reflete, assim, o sinal magnético de minerais antiferromagnéticos, fracamente magnéticos mas de alta coercividade (Thompson e Oldfield, 1986). O parâmetro HMRI é utilizado também na fórmula de cálculo do quociente L. De acordo com Liu *et al.*, 2007, alterações nos valores da HMRI só traduzirão variações na concentração de hematite e/ou goethite se o quociente L for relativamente constante. Por outro lado, alterações nos valores do quociente L indicam coercividades variáveis, que podem reflectir a existência de diferentes fontes de hematite e/ou goethite.

Os valores de HMRI calculados variam entre 0,36 e  $1177,70 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$  com um valor médio de  $93,37 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ . No conjunto de amostras, para as quais se obtiveram valores mais elevados para este parâmetro, além das amostras 75, 76, 78, 79 e 92, incluem-se as 80, 84, 86, 106 e P3C2 (figura VI.15) que também exibiram os valores mais baixos para o coeficiente  $S_{-300}$ . As amostras colhidas em profundidade, no perfil 5, exibem

igualmente valores elevados para a HMRI, o que significa que, provavelmente, estas amostras contêm uma concentração maior de minerais antiferromagnéticos (hematite/goethite) (e.g. Xia *et al.*, 2011). Os valores mais baixos para a HMRI indicam uma concentração menor da componente antiferromagnética nas amostras (Liu *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2007; Ng *et al.*, 2003). As amostras 25, 26, 98 e 132 (figura VI.15) incluem-se neste grupo (os coeficientes S calculados para estas amostras apresentam valores  $\approx 1$ ).

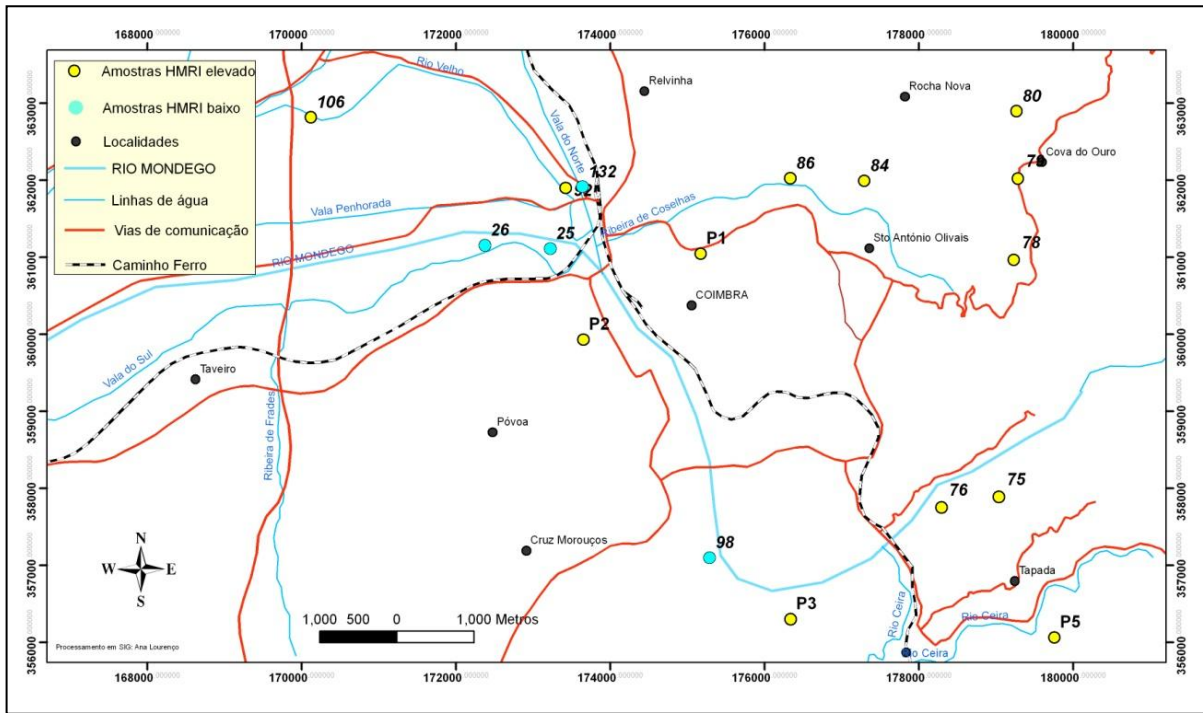


Fig. VI.16 – Localização das amostras com valores extremos para o parâmetro HMRI.

### VI.1.2.3 Quociente L

O quociente L foi calculado como  $L = HIRM / 0,5 \times (MRIs + MRI_{-100\text{ mT}})$ . As variações no quociente L traduzem variações na coercividade da componente antiferromagnética: quando varia pouco de amostra para amostra, os quocientes S podem ser interpretados do modo convencional (Liu *et al.*, 2007). No gráfico da figura VI.17 os dados “caem” praticamente todos dentro da área sombreada o que significa que o quociente L é razoavelmente constante. Esta situação sugere que as variações do quociente L se devem a variações na concentração das diferentes fracções magnéticas e não a variações na coercividade (Liu *et al.*, 2007). Podemos, assim, reiterar a interpretação feita anteriormente para o quociente S.

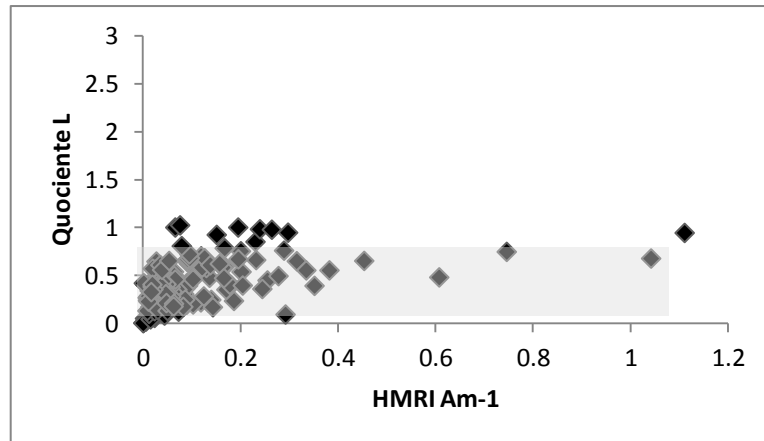


Fig. VI.17 – Relação entre o quociente L e a HMRI.

## VI.2 ANÁLISES QUÍMICAS

Na tabela VI.3 é apresentado o resumo estatístico das análises químicas, efectuadas para um conjunto seleccionado de amostras. Os elementos químicos analisados (41) fazem parte de um pacote pré-estabelecido pelo laboratório ACME Analytical Laboratories, Ltd. no qual se incluem os metais pesados, elementos de maior relevância para o presente estudo.

Vários elementos apresentam um coeficiente de variação muito elevado (e.g. As, Ca, Mg, Mn, Na e Zn), com teores máximos muito afastados da média. Resultados idênticos foram obtidos por Ferreira (2000) e Inácio *et al.* (2008). Os teores em Au estão abaixo do limite de detecção (0,1 mg/kg) em todas as amostras. Em relação ao S, cerca de 90% das amostras apresentam valores abaixo do limite de detecção (0,1 %). Para o Cd e a Ag, cerca de 50% das amostras também exibem valores abaixo do limite de detecção. Para estes elementos, uma vez que mais de 25% dos valores estão abaixo do limite de detecção, os resultados analíticos são considerados inadequados para determinadas finalidades (Inácio *et al.*, 2008).

Os valores obtidos para os elementos Cr, Cu, Ni, Pb e Zn foram comparados com os estabelecidos na Portaria n.º 26/2006 (tabela VI.4). Não se fez esta comparação para o Cd (que faz parte do grupo de metais pesados constantes da portaria) pelas razões acima referidas.

Tabela VI.3 - Resumo estatístico das análises químicas, para n=65.

	m	M	Md	DP	CV	P10	P25	P50	P75	P95
Al	1,480	14,050	5,587	2,853	0,511	2,454	3,380	4,790	7,390	10,460
As	2,000	165,000	19,984	25,940	1,298	3,000	5,500	13,000	22,500	56,100
Ba	64,000	600,000	292,400	127,640	0,437	145,600	194,000	260,000	392,000	520,000
Be	1,000	9,000	3,017	1,960	0,650	1,000	2,000	2,500	3,750	7,000
Bi	0,100	1,200	0,422	0,270	0,640	0,200	0,200	0,300	0,500	1,000
Ca	0,010	28,060	2,600	5,681	2,185	0,030	0,083	0,330	1,345	16,328
Ce	15,000	102,000	53,015	22,850	0,431	25,400	32,000	55,000	70,000	88,800
Co	0,700	20,500	6,918	5,353	0,774	1,400	2,500	5,300	9,700	17,940
Cr	5,000	98,000	33,415	25,000	0,748	10,000	13,000	24,000	49,000	78,800
Cu	2,3	127,7	26,312	24,753	0,941	5,200	11,300	19,200	31,800	72,220
Fe	0,320	7,950	2,431	1,719	0,707	0,662	1,050	2,240	3,120	5,586
Hf	0,600	3,800	2,082	0,953	0,458	2,000	1,200	2,000	2,800	3,800
K	0,370	4,650	2,489	1,136	0,456	1,182	1,480	2,500	3,410	4,294
La	6,900	45,200	24,878	10,131	0,407	12,180	15,400	26,300	33,300	40,900
Li	16,500	290,800	63,229	50,488	0,798	22,900	29,500	46,100	76,300	141,760
Mg	0,030	8,610	0,700	1,517	2,169	0,074	0,120	0,310	0,530	2,606
Mn	33,000	6753,000	585,462	964,906	1,648	70,600	177,000	332,000	565,000	1409,400
Mo	0,2	2,6	0,74	0,649	0,877	0,2	0,3	0,5	0,9	2,2
Na	0,039	1,354	0,291	0,322	1,106	0,057	0,104	0,131	0,306	1,001
Nb	2,400	16,200	7,703	3,834	0,498	3,500	4,700	6,800	10,000	14,960
Ni	2,500	56,300	18,692	14,975	0,801	5,320	7,200	14,500	27,100	51,620
P	0,006	0,132	0,053	0,029	0,545	0,019	0,035	0,045	0,070	0,105
Pb	10,000	211,000	40,040	32,584	0,814	16,120	22,100	32,700	43,600	100,260
Rb	32,400	298,900	143,546	63,096	0,440	66,700	94,700	134,600	185,100	244,300
Sb	0,200	4,300	1,071	0,837	0,782	0,400	0,600	0,800	1,300	3,060
Sc	1,000	18,000	6,328	4,462	0,705	2,000	2,750	5,000	9,250	14,850
Sn	1,000	15,200	5,757	3,536	0,614	2,280	3,400	4,500	7,000	12,920
Sr	17,000	435,000	72,769	70,787	0,973	27,800	38,000	56,000	80,000	197,600

As concentrações estão em mg/kg excepto para o Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S e Ti (em %).

m - mínimo; M - máximo; Md - média; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação; P10-P95 - percentis.



Tabela VI.3 - Resumo estatístico das análises químicas (continuação).

	m	M	Md	DP	CV	P10	P25	P50	P75	P95
Ta	0,200	1,900	0,805	0,455	0,565	0,300	0,400	0,800	1,000	1,780
Th	3,100	24,400	11,137	5,040	0,453	4,600	7,300	10,900	14,300	19,080
Ti	0,065	0,366	0,191	0,080	0,419	0,093	0,116	0,186	0,249	0,326
U	1,000	14,800	4,049	3,015	0,745	1,600	2,200	2,900	4,700	11,400
V	9,000	160,000	59,349	40,146	0,676	20,200	27,500	46,000	78,000	149,300
W	0,500	7,200	2,114	1,543	0,730	0,700	1,000	1,400	2,900	5,120
Y	2,000	41,400	10,814	7,717	0,714	5,000	5,800	8,700	12,800	28,160
Zn	9,000	543,000	88,754	114,298	1,288	15,200	31,000	51,000	101,000	382,000
Zr	21,700	137,400	73,840	33,485	0,453	34,680	43,400	69,500	102,300	127,240

As concentrações estão em mg/kg excepto para o Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S e Ti (em %).

m - mínimo; M - máximo; Md - média; DP - Desvio-padrão; CV - Coeficiente de variação; P10-P95 - percentis.

Tabela VI.4 – Comparação entre os valores-limite de concentração de metais pesados nos solos estabelecidos na Portaria nº 26/2006 e os valores obtidos no presente estudo.

	Portaria nº 26/2006			No presente estudo
	pH ≤ 6	6 < pH ≤ 7,0	pH > 7,0	
<b>Cd</b>	1	3	4	---
<b>Cu</b>	50	100	200	26,31
<b>Ni</b>	30	75	110	18,69
<b>Pb</b>	50	300	450	40,04
<b>Zn</b>	150	300	450	88,75
<b>Cr</b>	50	200	300	33,42

O pH dos solos analisados na área de estudo tem, regra geral, valores  $\leq 6$ , só excedendo o valor de 7 no local onde foi aberto o perfil nº 1 (Av. Gouveia Monteiro, Coimbra, figura VI.32). Podemos observar que os teores dos metais pesados analisados no presente estudo são inferiores aos estabelecidos na portaria em questão, para qualquer dos valores de pH nela considerados.

Foi feita também uma comparação entre os teores médios obtidos no presente estudo com os valores constantes em Inácio *et al.* (2008) para os elementos Al, As, Ba, Ca,

Co, Cr, Cu, Fe, K, L, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sr, Th, V e Zn (tabela VI.5). Com exceção do Co, que apresenta um valor médio mais baixo, e do Fe, do Ni e do P com teores médios na mesma ordem de grandeza, todos os elementos analisados exibem valores médios mais elevados na área de estudo, quando comparados com os valores considerados para o território de Portugal continental, no trabalho acima referido. Em Lourenço (2003), os teores médios obtidos para os metais pesados foram comparados com os valores médios de fundo para os solos mundiais e para solos agrícolas ingleses (Reimann e Caritat, 1998). Verificou-se que os teores médios dos elementos Pb, Ni, Zn e Cu apresentaram, também, valores mais elevados na área de estudo, comparativamente com os considerados em Reimann e Caritat (1998).

Tabela VI.5 - Comparação entre os teores de elementos químicos em Inácio *et al.* (2008) e no presente estudo.

	Atlas Geoquímico dos Solos de Portugal (n=165)		Presente estudo (n=65)	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média
<b>Al</b>	0,05 – 5,28	1,69	1,48 - 14,05	<u>5,59</u>
<b>As</b>	<1,00 – 371	15	2 - 165	<u>19,98</u>
<b>Ba</b>	5 – 203	61,1	64 - 600	<u>292,40</u>
<b>Ca</b>	0,005 – 26,50	1,59	0,01 - 28,06	<u>2,60</u>
<b>Co</b>	0,5 – 42	9,9	0,7 - 20,5	6,92
<b>Cr</b>	0,5 – 223	26,8	5 - 98	<u>33,42</u>
<b>Cu</b>	0,5 – 111	18,6	2,3 - 127,7	<u>26,31</u>
<b>Fe</b>	0,04 – 6,29	2,41	0,32 - 7,95	2,43
<b>K</b>	0,02 – 1,10	0,25	0,37 - 4,65	<u>2,49</u>
<b>La</b>	0,5 – 68	21	6,9 - 45,2	<u>24,88</u>
<b>Mg</b>	0,005 – 2,46	0,42	0,03 - 8,61	<u>0,70</u>
<b>Mn</b>	5 – 4466	480,6	33 - 6753	<u>585,46</u>
<b>Ni</b>	0,5 – 119	19,3	2,5 - 56,3	18,69
<b>P</b>	0,002 – 0,234	0,041	0,006-0,132	0,05
<b>Pb</b>	1 – 108	19	10 - 211	<u>40,04</u>
<b>Sr</b>	0,5 – 290	22,6	17 - 435	<u>72,77</u>
<b>Th</b>	1 – 49	6,9	3,1 - 24,4	<u>11,14</u>
<b>V</b>	0,5 – 188	32,7	9 - 160	<u>59,35</u>
<b>Zn</b>	0,5 – 589	50,6	9 - 543	<u>88,754</u>

As concentrações estão em mg/kg excepto para o Al, Ca, Fe, K, Mg e P (em %). (a sublinhado, destacam-se os valores médios obtidos no presente estudo que são mais elevados, comparativamente com os valores obtidos em Inácio *et al.*, 2008).

A amostra 93 (figura VI.1) exhibe o valor máximo para o Pb (211,0 mg/kg) e as amostras colhidas no horizonte A do perfil 2 (amostras P2A1 e P2A2, perfil localizado no Planalto de Santa Clara) (figura VI.33) exibem o valor máximo para o Cu (127,7 e 122,3

mg/kg, respectivamente). Estes valores são cerca de 5 vezes superiores à média observada para este elemento, no presente estudo. A amostra 48, colhida perto do Observatório Astronómico (figura V.1), tem os valores máximos para o Ni e Cr (56,3 mg/kg e 98,0 mg/kg, respectivamente). Para o Co, o valor máximo (20,5 mg/kg) foi registado para a amostra 79 (figura V.1), colhida perto da localidade de Cova do Ouro, afastada do centro urbano.

O Zn regista o valor máximo (543,0 mg/kg) para a amostra P1A (amostra do horizonte A do perfil 1). Esta amostra também apresenta os valores máximos para os teores em Cd (1,4 mg/kg) e As (165 mg/kg). Em relação ao As, chama-se a atenção para o facto de, neste caso, o valor ser muito superior aos valores de referência citados na bibliografia. Em Kabata-Pendias (2011) encontramos o valor de 6,8 mg/kg como valor de fundo para os solos e em Adriano *et al.* (1986, citado em Baptista, 2003) esse valor é de 7,2 mg/kg. Inácio *et al.* (2008) chamam a atenção para o facto de o nível de As nos solos portugueses estar claramente acima das concentrações referidas na literatura. Os autores propõem, assim, um valor de fundo de 22 mg/kg, considerado mais adequado à realidade portuguesa, tendo em conta a composição média dos solos do território nacional.

### **VI.2.1 Avaliação do grau de poluição do solo: Factores de Enriquecimento e Índice de Poluição**

Os factores de enriquecimento (FE) têm sido utilizados para suportar a hipótese de que um conjunto particular de elementos tem origem antrópica (Reinman e Caritat, 2005). Os FE podem ser calculados relativamente à crosta terrestre ou a um “background” local (por exemplo uma camada profunda do solo). Reinman e Caritat (2005) demonstram que a normalização de um elemento pela média crustal pode ser pouco fiável, devido a não serem normalmente considerados factores como, por exemplo, a fraccionação dos elementos que ocorre no decurso de processos superficiais (meteorização, pedogénese, erosão) e à pouca relevância dada aos processos biogeoquímicos. De acordo com os autores, os valores dos FE podem ser elevados devido a múltiplas razões, das quais a contaminação pode ser apenas uma. Os FE calculam-se relativamente à média crustal, de acordo com a fórmula:

$$FE_{(EI)_{crusta}} = \frac{[EI]_{amostra}/[X]_{amostra}}{[EI]_{crusta}/[X]_{crusta}},$$

em que [EI] se refere à concentração (mg/kg) do elemento em análise, e [X] é a concentração (mg/kg) do elemento de referência escolhido (Al, Li, Sc, Zr ou Ti). Os termos “amostra” e “crusta” referem-se ao meio em relação ao qual se considera a concentração do elemento em estudo e de referência. Quando se opta por fazer o cálculo do FE relativamente a um “background” local (por exemplo, o horizonte C do solo) a fórmula é

adaptada, substituindo os valores das concentrações médias conhecidas para a crosta (conhecidos como “valores de Clarke”) pelos do meio escolhido como referência. Por exemplo, Wang *et al.* (2012) calculam o FE em relação aos valores crustais e utilizam o AI como elemento de referência.

Para avaliar o grau de contaminação dos solos, autores como *e.g.* Wang e Qin (2005), Chaparro *et al.* (2008), Lu *et al.* (2008), Karimi *et al.* (2011) optam por calcular o Índice de poluição (PLI: “Tomlinson pollution load index”), que dá indicações sobre o número de vezes que a concentração de um metal pesado presente numa amostra excede a concentração do background, avaliando assim o seu grau de toxicidade. A fórmula de cálculo é:

$$PLI = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n CF_k} \quad (\text{e.g. Chaparro et al., 2008}),$$

em que  $CF_k$  ( $CF_k = C_{HM,k}/C_{background,k}$ ) é o quociente entre a concentração de cada metal pesado ( $C_{HM,k}$ ) e o valor do background ( $C_{background,k}$ ). Hanesh *et al.* (2007) utilizam o “Geoaccumulation Index” definido como:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1,5B_n),$$

em que  $C_n$  é a concentração do elemento e  $B_n$  é o limite superior do valor do background.

Uma questão crucial, no cálculo de qualquer um dos índices, é a escolha dos valores de base ou “background” (fundo geoquímico) a utilizar. De acordo com Inácio *et al.* (2008), o reconhecimento de concentrações elevadas, ou não usuais, requer uma avaliação do que deve ser considerado normal ou usual. As “concentrações normais” são referidas na literatura como “background” ou níveis de base, frequentemente como sinónimos. As concentrações do “background” geoquímico devem representar os níveis de um elemento nos ambientes naturais o que, idealmente, deveria excluir a influência humana. Reinman e Caritat (2005) obtêm resultados díspares para os FE calculados em função de diferentes “backgrounds” (camada superficial dos solos, horizonte C ou valores crustais). No cálculo do PLI, Chaparro *et al.* (2003), Wang e Qin (2005) e Chaparro *et al.* (2008) utilizam como valores do background, os valores médios para ambientes naturais (“mean values for natural environments”) de acordo com Frink (1996, cit. em Chaparro *et al.*, 2003). Por sua vez, Lu *et al.* (2007) e Yang *et al.* (2011) utilizam valores de “background” de acordo com China Environmental Monitoring Station (1990) (cit. em Lu *et al.*, 2007). Estes valores estão listados na tabela VI.6. Chan *et al.* (2001), Kim *et al.* (2007), Chaparro *et al.* (2008), Chaparro *et al.* (2011) e Karimi *et al.* (2011) utilizam, como valores de base, os valores mais baixos para a concentração em metais pesados, detectados nas amostras dos estudos.

Para avaliar o grau de poluição/contaminação dos solos, na área de estudo, foi calculado o PLI, por ser o índice de maior divulgação em trabalhos no âmbito do magnetismo ambiental. De acordo com Angulo (1996), “the Tomlinson Index (PLI) is claimed to be easily and quickly understood by unskilled personal in order to compare the pollution status of different places”. No presente estudo, para o cálculo do PLI, foram considerados os dados disponibilizados no Atlas Geoquímico dos Solos de Portugal (“The Soil Geochemical Atlas of Portugal”, Inácio *et al.*, 2008) (tabela VI.6), do qual constam os valores de referência para 9 elementos com importância ambiental, aqui utilizados como valores de base.

Tabela VI.6 - Valores de base para a concentração de metais pesados nos solos (mg/kg).

	“allowed mean values” (amv) (Chaparro <i>et al.</i> , 2004)	“Background values of elements in soils of China” (Lu <i>et al.</i> , 2007)	“Reference Values”(RV) (Inácio <i>et al.</i> , 2008)	“Action Values”(AV)
<b>Pb</b>	19,6	19,1	34	500
<b>Cu</b>	29,2	19,2	35	200
<b>Zn</b>	40,0	58,4	85	500
<b>Ni</b>	11,0	----	43	100
<b>Cr</b>	129,0	62,5	43	300
<b>Co</b>	-----	----	19	50
<b>As</b>	----	-----	22	55

Foram utilizados os valores de referência (RV: “reference values”) para os seguintes elementos: As, Co, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn. Os valores de referência representam, de acordo com Inácio *et al.* (2008), a concentração máxima num solo “limpo” e devem corresponder ao limite superior do “background” geoquímico. Abaixo destes níveis, o solo é considerado multi-funcional, isto é, apto para qualquer utilização. Os valores de intervenção (AV: “action values”) indicam concentrações acima das quais existe um risco considerável para a saúde humana e para os quais, devem ser tomadas medidas de remediação. Apenas as amostras P1A e P1B, colhidas no perfil 1 excedem estes valores relativamente ao As e Zn (amostra P1A: As = 165 mg/kg, Zn = 543 mg/kg; amostra P1B: As = 108 mg/kg, Zn = 517 mg/kg).

Os valores para o PLI apresentam uma variação de 0,104 a 2,458 (média: 0,604), com uma ordem de grandeza comparável às encontradas por Wang e Qin (2005), Lu *et al.* (2007) e Chaparro *et al.* (2011). Os valores mais elevados observaram-se para a amostra colhida na Av. Gouveia Monteiro (amostra P1A), amostra 93 (figura VI.1) e amostra 112

(colhida na periferia da fábrica de cimento de Souselas). Algumas amostras colhidas na Serra da Carapineira, próximo da localidade de Cova do Ouro (figura VI.18), em zona afastada do centro urbano e sem outras fontes de poluição nas imediações, exibem valores elevados para este índice. Esta área corresponde a uma superfície de aplanamento o que, conjugado com a localização da fábrica de cimento de Souselas e a direcção predominante dos ventos (NW), pode permitir explicar os valores elevados do PLI.

O PLI apresenta uma correlação muito significativa com a  $\chi$ , com a MRI<sub>1T</sub> e com os quociente S<sub>300</sub> e L (correlação negativa) (tabela VI.7). De acordo com Lu *et al.* (2007), a correlação elevada entre o PLI e os parâmetros  $\chi$  e MRI<sub>1T</sub> indica, provavelmente, uma fonte comum para os metais pesados e as partículas magnéticas, e que estes parâmetros constituem um bom indicador da poluição dos solos superficiais. Correlações significativas entre o PLI e a  $\chi$  e a MRI<sub>1T</sub> foram também observadas por Lu *et al.* (2008). No entanto, recomendamos que o termo “poluição” deve ser utilizado com alguma cautela, pois é necessário ter em conta que 1) os teores em metais pesados determinados no presente estudo se referem a valores totais e não extraíveis, pelo que podem não representar perigo para os seres vivos; 2) em solos com pH > 6,5, é muito improvável qualquer toxicidade por metais pesados e 3) em solos com pH < 5,5 podem existir formas solúveis mais facilmente absorvidas pelas plantas (Sequeira, E., inf. oral).

Tabela VI.7 – Correlação entre o PLI e parâmetros magnéticos, para n=65.

	$\chi$ ( $10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ )	HRMI	S <sub>100</sub>	S <sub>300</sub>	Quociente L
<b>PLI</b>	0,430**	0,362**	-0,039	0,228	0,303*	-0,476**

\*\* correlação significativa para o nível 0,01; \* correlação significativa para o nível 0,05.

### VI.2.2 Relação entre elementos químicos e parâmetros magnéticos

Foi analisada a relação entre os elementos químicos e os parâmetros magnéticos, com especial atenção à relação entre estes e os metais pesados. Utilizou-se o coeficiente de correlação de Spearman, método não paramétrico de correlação de dados que, em relação ao coeficiente de Pearson, apresenta maior robustez, por minimizar a influência de valores anómalos extremos, sendo mais adequado para situações em que os dados não seguem uma distribuição normal (Davis, 1986; Hanesh e Sholger, 2005).

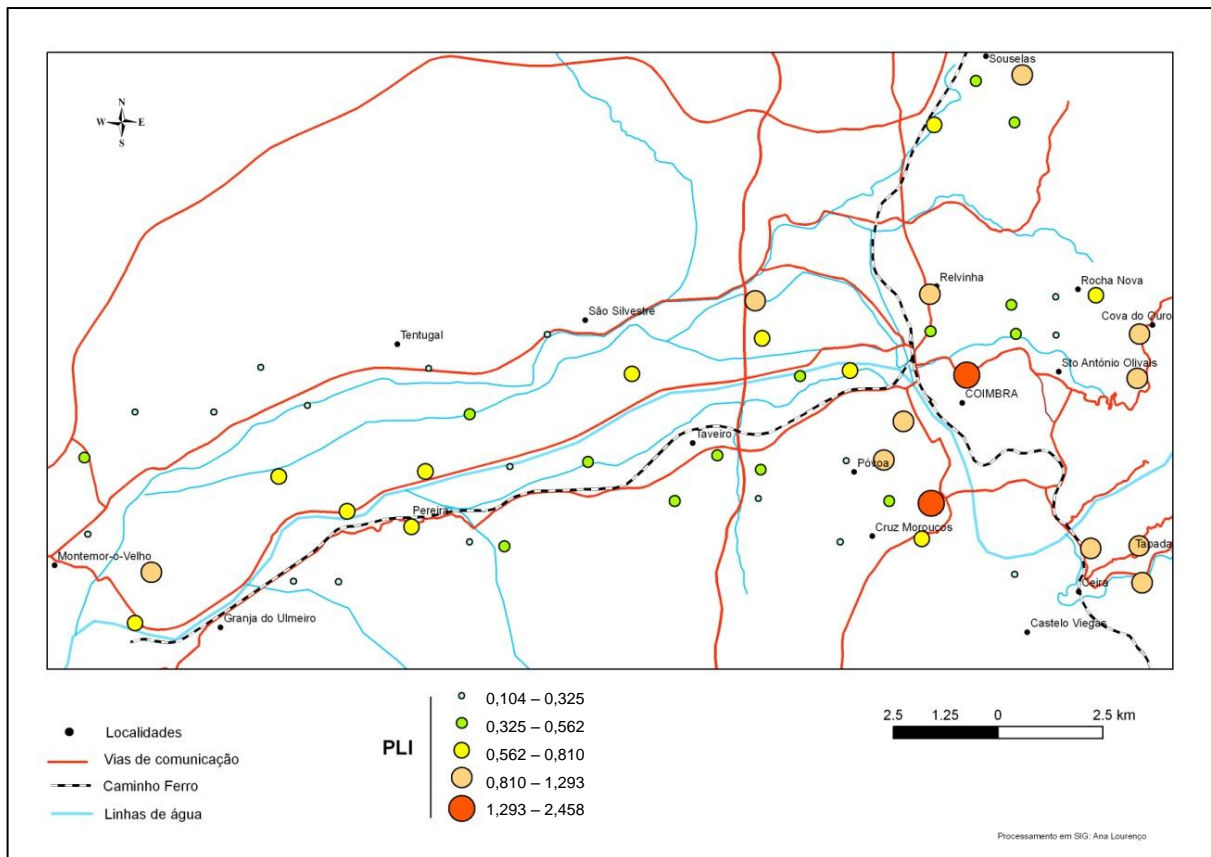


Fig. VI.18 – Variação espacial do PLI.

Para analisar o tipo de distribuição que melhor se ajusta a cada um dos elementos, foi aplicado o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (e.g. Dankoub *et al.*, 2012). Este é um teste não paramétrico que pode ser aplicado a dados não classificados, sendo mais sensível que outro tipo de testes deste tipo (Davis, 1986). Por o número de elementos com distribuições normais ser pequeno e, para facilitar o tratamento dos dados, foi decidido que, em algumas situações, todos os dados fossem logaritmizados. Por exemplo, no caso dos elementos Al, Ba, Co, Fe, K, La e Ti, os testes de normalidade realizados sobre os dados não transformados indicaram que estes apresentam distribuições que se assemelham mais a uma distribuição normal. No entanto, pela consulta dos histogramas obtidos após logaritmização, verifica-se que os dados logtransformados também se adaptam bem a uma distribuição normal. Como exemplo, são apresentados os histogramas do Mn e do As (figura VI.19) e do Fe e Al (figura VI.20). Na tabela VI.8 são apresentados os resultados da análise de correlações, entre todos os elementos químicos e os parâmetros magnéticos. Não fazem parte desta análise os elementos Ag, Au, Cd e S devido ao reduzido número de amostras com teores acima do limite de detecção, como descrito na página 153.



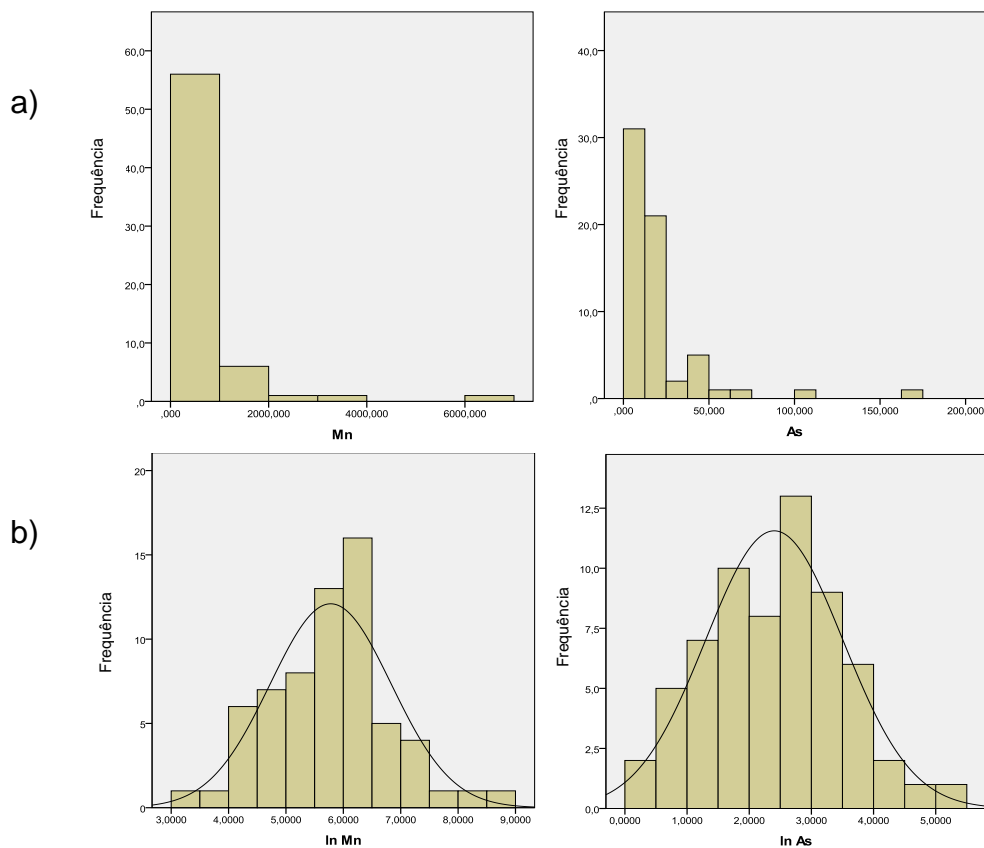


Fig. VI.19 – Histogramas da distribuição dos teores dos elementos Mn e As; a) antes da normalização e b) depois da normalização.

O parâmetro magnético que melhor se correlaciona com os teores dos elementos analisados é o  $S_{-100}$ , com 31 correlações significativas, seguindo-se a  $\chi$  com 28 correlações. A  $MRI_{1T}$ , a  $MRI_{100\text{ mT}}$  e a  $MRI_{300\text{ mT}}$ , apresentam também um bom nível de correlações positivas e significativas (22). O quociente L apresenta correlação negativa, mas significativa, com 34 elementos. A  $\chi$  tem correlação positiva, muito significativa, com os elementos Al, As, Ba, Ce, Co, Cr, Fe, Hf, La, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Sr, V, Y, Zn e Zr. A relação  $MRI/\chi$  correlaciona-se, positiva e significativamente, com 26 elementos. O parâmetro HMRI só apresenta 3 correlações significativas.

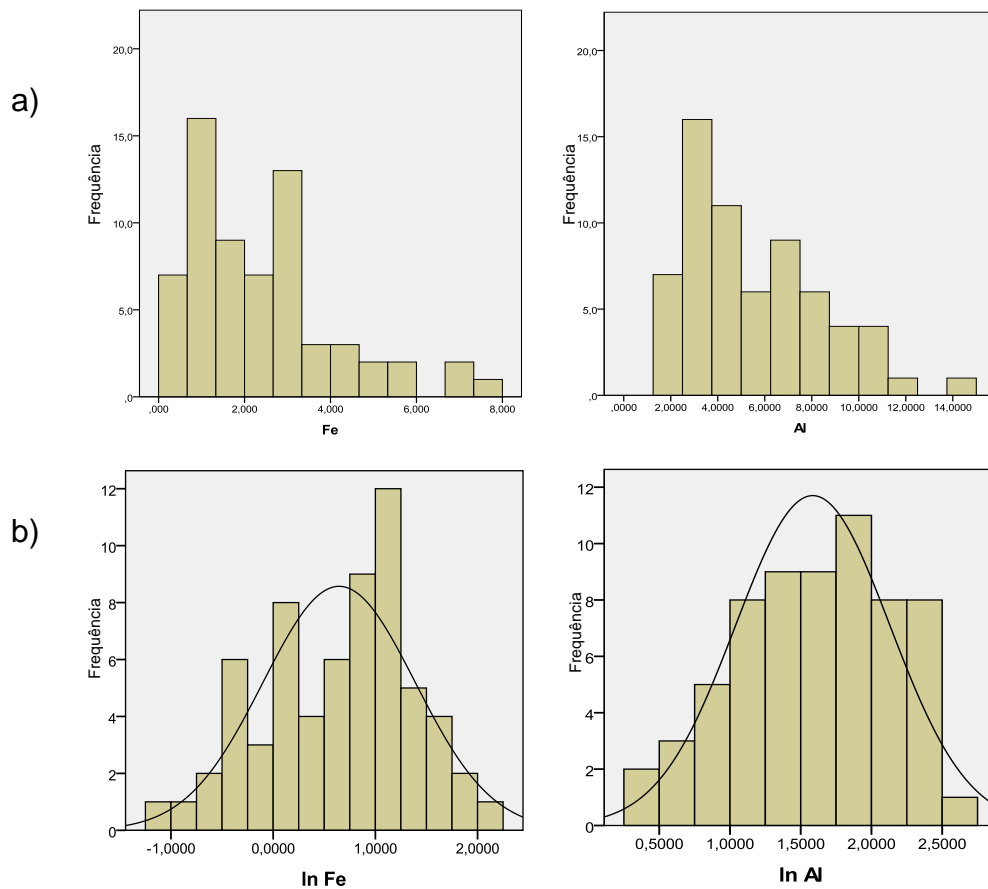


Fig. VI.20 – Histogramas da distribuição dos teores dos elementos Fe e Al; a) antes da normalização e b) depois da normalização.

Em geral, os metais pesados apresentam uma associação significativa com os parâmetros magnéticos, situação reportada em vários estudos (*e.g.* Rocha *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Dankoub *et al.*, 2012) (figura VI.21). Esta associação pode ser explicada pelo facto de os metais pesados serem preferencialmente adsorvidos pelos óxidos e hidróxidos de ferro (Reinman e Caritat, 2005). Por exemplo, a forte associação do arsénio com minerais de ferro, nos solos, foi descrita por Kabata-Pendias (2011). A ordem relativa das correlações entre metais pesados e parâmetros magnéticos representa a afinidade destes metais com os minerais ferrimagnéticos (Ng *et al.*, 2002). As correlações entre parâmetros dependentes da concentração,  $\chi$  e  $MRI_{1T}$ , sugerem provavelmente uma fonte comum dos materiais magnéticos e dos elementos (Xie *et al.*, 2001).

Tabela VI.8 – Correlação (r de Spearman) entre elementos químicos e parâmetros magnéticos, para n=65.

	$\chi \times 10^{-8}$ ( $m^3 kg^{-1}$ )	$MRI_{1T} \times 10^{-6}$ ( $Am^2 kg^{-1}$ )	$MRI_{-100mT}$ ( $mAm^{-1}$ )	$MRI_{-300mT}$ ( $mA m^{-1}$ )	HIRM ( $mA m^{-1}$ )	L	$S_{-100}$	$S_{-300}$	$MRI/\chi$ ( $kAm^{-1}$ )
Al	,479**	,357**	,357**	,357**	,137	-,520**	,359**	,036	-,268*
As	,540**	,338**	,338**	,338**	,221	-,443**	,310*	-,004	-,318**
Ba	,392**	,380**	,380**	,380**	,273*	-,365**	,343**	,108	,071
Be	,286*	,167	,167	,167	,079	-,442**	,366**	,048	-,293*
Bi	,177	-,018	-,018	-,018	-,151	-,333**	,268*	-,050	-,442**
Ca	,301*	,087	,087	,087	-,116	-,319**	,346**	,231	-,554**
Ce	,411**	,294*	,294*	,294*	,133	-,381**	,504**	,356**	-,131
Co	,539**	,356**	,356**	,356**	,055	-,549**	,499**	,247*	-,430**
Cr	,566**	,395**	,395**	,395**	,115	-,516**	,380**	,124	-,301*
Cu	,530**	,381**	,381**	,381**	,184	-,523**	,386**	,212	-,146
Fe	,608**	,410**	,410**	,410**	,151	-,530**	,318**	-,009	-,386**
Hf	,394**	,283*	,283*	,283*	,050	-,488**	,464**	,155	-,266*
K	,235	,215	,215	,215	,199	-,212	,151	-,045	-,048
La	,442**	,306*	,306*	,306*	,152	-,378**	,480**	,380**	-,175
Li	,518**	,289*	,289*	,289*	,077	-,519**	,496**	,130	-,491**
Mg	,417**	,149	,149	,149	-,075	-,481**	,366**	,079	-,679**
Mn	,452**	,303*	,303*	,303*	,140	-,396**	,248*	,028	-,366**
Mo	,670**	,435**	,435**	,435**	,225	-,434**	,264*	,061	-,418**
Na	,119	,164	,164	,164	,030	-,169	,399**	,270*	,093
Nb	,206	,005	,005	,005	-,197	-,356**	,432**	,187	-,578**
Ni	,596**	,389**	,389**	,389**	,090	-,577**	,445**	,168	-,459**
P	,302*	,327**	,327**	,327**	,055	-,335**	,516**	,338**	-,076
Pb	,455**	,302*	,302*	,302*	,262*	-,328**	,253*	,061	-,280*
Rb	,147	,203	,203	,203	,118	-,214	,124	-,125	-,026
Sb	,491**	,453**	,453**	,453**	,272*	-,353**	,112	-,122	,029
Sc	,568**	,376**	,376**	,376**	,139	-,519**	,403**	,130	-,340**
Sn	,114	,051	,051	,051	-,024	-,297*	,234	-,107	-,273*
Sr	,414**	,308*	,308*	,308*	,114	-,349**	,254*	,093	-,217
Ta	,070	-,064	-,064	-,064	-,217	-,247*	,309*	,067	-,476**
Th	,225	,146	,146	,146	-,059	-,323**	,360**	,126	-,253*
Ti	,307*	,133	,133	,133	-,121	-,337**	,369**	,179	-,428**
U	,252*	,069	,069	,069	-,057	-,355**	,350**	,014	-,405**
V	,496**	,337**	,337**	,337**	,130	-,453**	,235	-,043	-,206
W	,064	-,082	-,082	-,082	-,116	-,249*	,163	-,168	-,386**
Y	,407**	,154	,154	,154	-,087	-,482**	,451**	,186	-,570**
Zn	,588**	,319**	,319**	,319**	,107	-,537**	,564**	,268*	-,555**
Zr	,467**	,335**	,335**	,335**	,093	-,503**	,469**	,163	-,246*

As concentrações estão em mg/kg excepto para o Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti (em %).

\*\* Correlação significativa para o nível 0,01

\* Correlação significativa para o nível 0,05

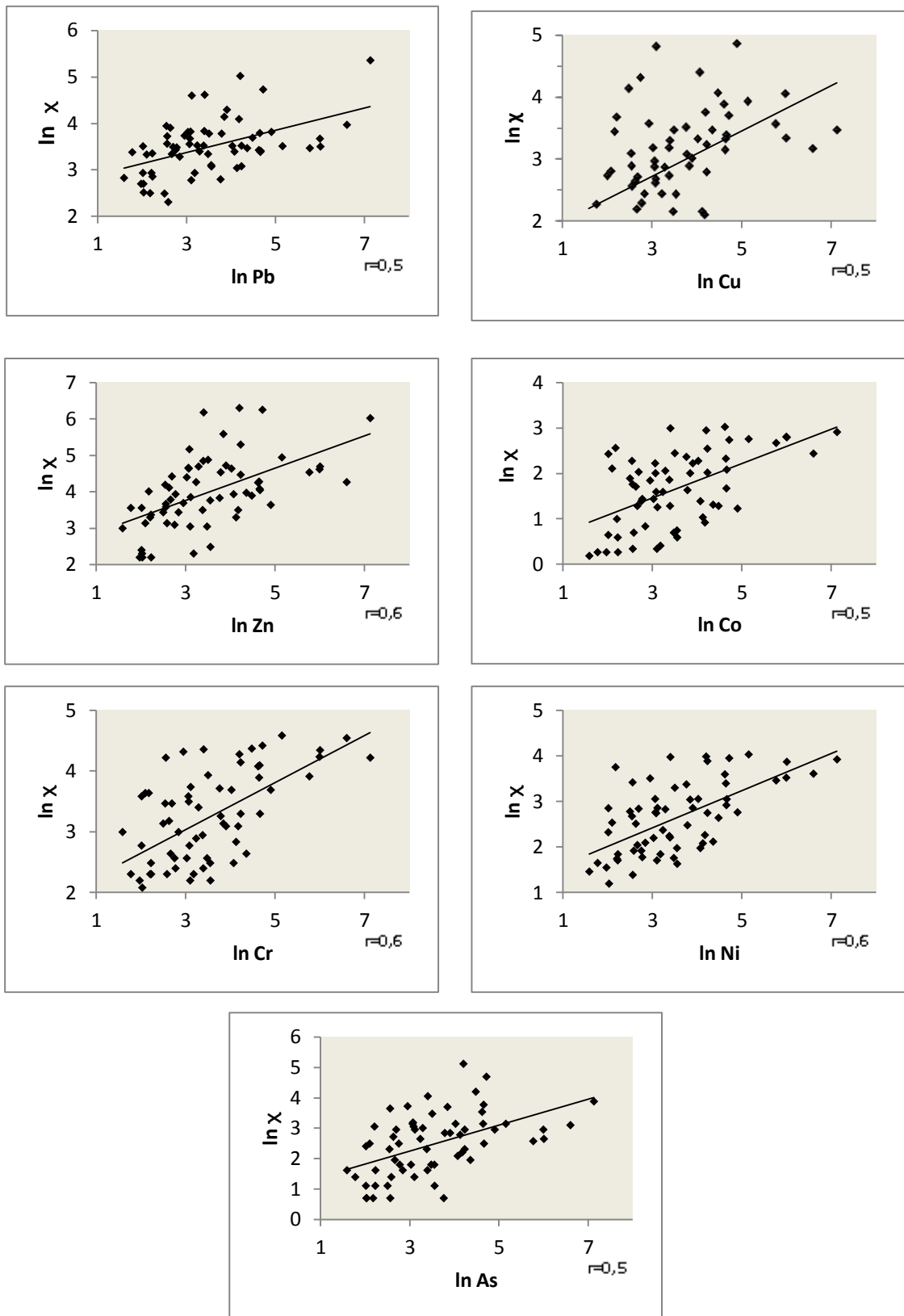


Fig. VI.21 – Relação entre a  $\chi$  ( $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) e metais pesados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).

### VI.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para o tratamento dos dados foi adoptada a Análise de Componentes Principais (ACP), com a finalidade de auxiliar a classificação e caracterização das amostras, bem como fornecer indicações preliminares de associações e possíveis fontes. Este método tem sido amplamente utilizado em aplicações geoquímicas, no sentido de identificar fontes de poluição e de distinguir entre contribuições naturais e antropogénicas (Wang *et al.*, 2012). A principal vantagem desta técnica assenta na possibilidade de reduzir o número de variáveis, permitindo simplificar as inter-relações entre as mesmas sem perda de informação. O objectivo da ACP é, assim, explicar o máximo de informação contida nos dados, com o menor número de componentes possível. Para tal procura-se 1) reduzir o número de variáveis e 2) detectar uma estrutura nas relações entre as variáveis. As bases teóricas desta técnica de análise estatística podem ser consultadas, por exemplo, em Davis (1986), Pereira e Sousa (1991) e Reinmam *et al.* (2008). Na tabela VI.9 apresentam-se os resultados da ACP levada a cabo sobre os resultados analíticos de um grupo de 21 elementos químicos e parâmetros magnéticos. Os factores foram rodados utilizando o algoritmo Varimax que permite uma interpretação mais fácil dos “loadings” das componentes principais. Foram extraídas 4 componentes principais, que permitem explicar 88% da variância total.

Na 1ª componente, que explica 23,3 % da variância, apresentam loadings elevados (> 0.5) os elementos Al, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Ti e Sc, e o coeficiente S<sub>-100</sub>. Estes elementos derivam fundamentalmente das emissões do tráfego automóvel (Wang e Qin, 2006; Zhang *et al.*, 2012).

Bem correlacionados com a 2ª componente, que explica 22,5 % da variância, estão os elementos Ag, As, Cd, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb e Zn, e o coeficiente S<sub>-300</sub> (embora com correlação negativa). As características da 2ª componente indicam uma origem comum, predominantemente antrópica, relacionada com a queima de combustíveis fósseis. Resultados idênticos foram obtidos por Wang *et al.* (2012). A origem do Sb também está ligada à queima de combustíveis fósseis e o Mn tem tendência para se associar a alguns metais-traço como o Co, Mo, Ni, Pb e Zn (Kabata-Pendias, 2011).

A 3ª componente (22,0 % da variância explicada) apresenta correlações elevadas para os parâmetros magnéticos  $\chi$ , MRI<sub>1T</sub>, S<sub>-100</sub>, S<sub>-300</sub>, MRI<sub>-100mT</sub>, MRI<sub>-300mT</sub>, HMRI, e os elementos Pb e Mn. Nesta componente surgem agrupados os parâmetros magnéticos. Em Chaparro *et al.* (2006), na ACP levada a cabo sobre um grupo de elementos químicos e parâmetros magnéticos, estes também são agrupados numa só componente, separando-se do restante grupo de variáveis. A 3ª componente é, também, indicativa de uma fonte

predominantemente antrópica, à semelhança do observado em Miguel *et al.* (1997), Wang *et al.* (2005) e Wang *et al.* (2012), onde, em análises semelhantes, também foram obtidas mais que uma componente indicadora de poluição antrópica, relacionada com a queima de combustíveis fósseis. O Pb e o Mn apresentam também “loadings” elevados nesta componente; o Pb deriva da queima de combustíveis fósseis e o Mn, como já foi referido, aparece frequentemente associado ao Pb.

Na 4<sup>a</sup> componente (20,6 % da variância explicada) aparecem associados os elementos Al, Ba, Be, Bi, Li e Sn, cuja presença nos solos deriva fundamentalmente de fontes naturais (Kabata-Pendias, 2011). O As e Sb exibem valores elevados nesta componente, mas também estão representados na componente 2. A razão pode estar relacionada com o facto de as distribuições destes elementos serem afectadas por fontes mistas (Wang *et al.*, 2005).





Tabela V.9 - Variância total explicada e matriz de componentes.

<b>Variância total explicada</b>															
Componente	Valores próprios iniciais			"Extraction Sums of Squared loadings"				"Rotation Sums of Squared Loadings"							
	Total	% de variância	valor próprio acumulado %	Total	% de variância	% de variância acumulada	Total	% de variância	% de variância acumulada						
1	13,396	47,844	47,844	13,396	47,844	47,844	6,519	23,281	23,281						
2	5,564	19,870	67,714	5,564	19,870	67,714	6,289	22,462	45,742						
3	3,283	11,726	79,440	3,283	11,726	79,440	6,166	22,020	67,763						
4	2,484	8,873	88,313	2,484	8,873	88,313	5,754	20,551	88,313						
5	1,317	4,703	93,016												
6	,813	2,902	95,918												
7	,328	1,173	97,090												
Matriz de componentes rodada	<b>x</b>	<b>MRI 1T</b>	<b>S<sub>-100</sub></b>	<b>S<sub>-300</sub></b>	<b>MRI<sub>-100mT</sub></b>	<b>MRI<sub>300mT</sub></b>	<b>HIRM</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Ag</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	
Componente	1	,116	,027	,560	,479	,159	,157	-,083	,432	,741	,036	,279	,398	,844	,745
	2	,239	,140	-,413	-,518	-,003	-,011	-,127	,829	,252	,668	,785	,798	,453	,469
	3	,945	,961	,606	,578	,947	,946	-,734	,160	,107	,547	,032	-,021	,164	,234
	4	-,025	,011	,099	,125	-,033	-,032	,091	-,117	,135	,469	,489	,079	,101	,276
Matriz de componentes rodada		<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Cr</b>	<b>Ba</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Sn</b>	<b>Be</b>	<b>Sc</b>	<b>Li</b>
Componente	1	,097	,564	,278	,222	,109	,136	,939	,309	,890	,657	,046	,262	,873	,384
	2	,661	,638	,585	,888	,612	,362	,220	-,070	,108	,031	-,002	,403	,231	,344
	3	,682	,273	-,058	,102	,339	-,220	,170	,210	,096	,057	-,109	,114	,098	-,253
	4	,257	,419	,604	,293	,606	,837	,121	,791	,335	,723	,897	,831	,323	,705



#### VI.4 ANÁLISES SEM/EDS

As análises magnéticas e químicas foram complementadas com determinações de SEM/EDS que permitem obter informação sobre a morfologia, a dimensão e a composição química das partículas. Obtiveram-se extractos magnéticos com o auxílio de um íman de mão, que foram dispersos em acetona, montados numa superfície aderente e revestidos a ouro.

A morfologia das partículas pode fornecer informação sobre a sua origem e possível fonte de emissão. A microscopia de varrimento electrónico revelou a presença de partículas com forma esférica (figura VI.22). Estas são típicas de emissões industriais e não industriais, que envolvem a queima de combustíveis fósseis (Flanders, 1994), e estão documentadas em diversos estudos (e.g. Spiteri *et al.*, 2005; Gomes *et al.*, 2008; Magiera *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009; Maher, 2011; Yan *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2011).

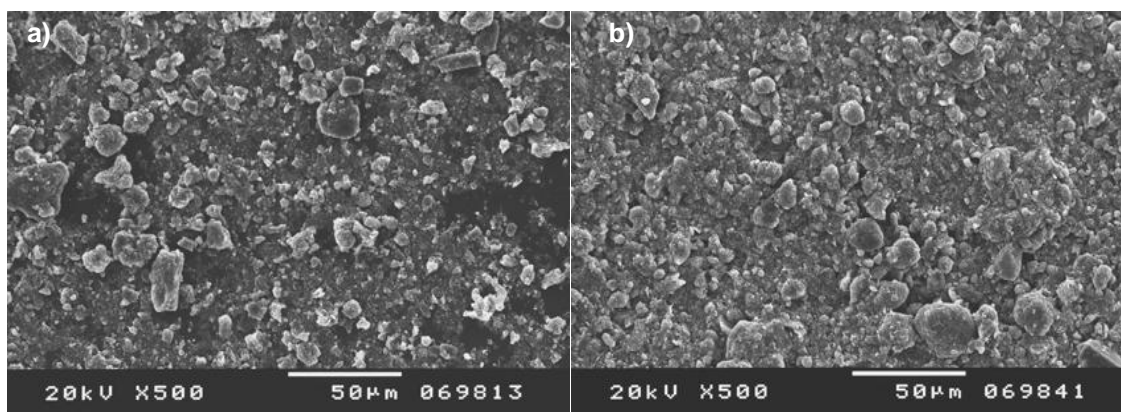


Fig. VI.22 - Microfotografias de amostras de solo superficial (aspecto geral), onde se observam partículas esféricas. a) amostra 93 e b) amostra P1A.

Foram observadas esférulas com diâmetros diversos (de 1  $\mu\text{m}$  a  $\approx 100 \mu\text{m}$ ) e diferentes estruturas superficiais, desde superfícies praticamente lisas (figura VI.23) a outras com morfologias típicas do tipo “casca de laranja” (figura VI.24 a) e b)). Esta última é muito comum a este tipo de partículas (Maher *et al.*, 1999). Superfícies porosas (figura VI.24 c)) e esférulas ocas (figura VI.25) foram também observadas. Horng *et al.* (2008) e Rosowiecka e Nawrocki (2010) também relatam a presença de esférulas ocas em extractos magnéticos e esférulas com aspecto poroso são referidas em Goddu *et al.* (2004), Maier e Sholger (2004) e Yang *et al.* (2011).

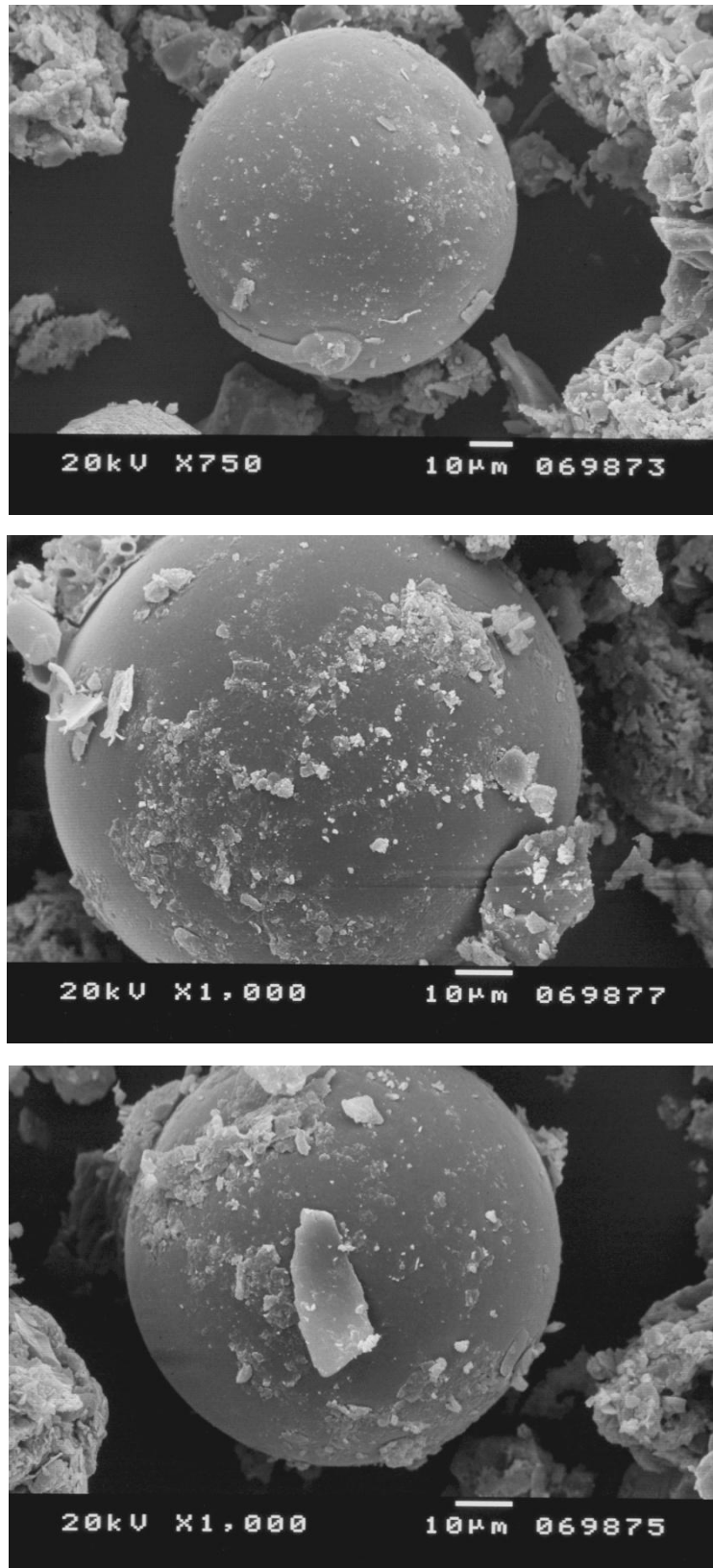


Fig. VI.23 – Microfotografias de esférulas da amostra P6A1.

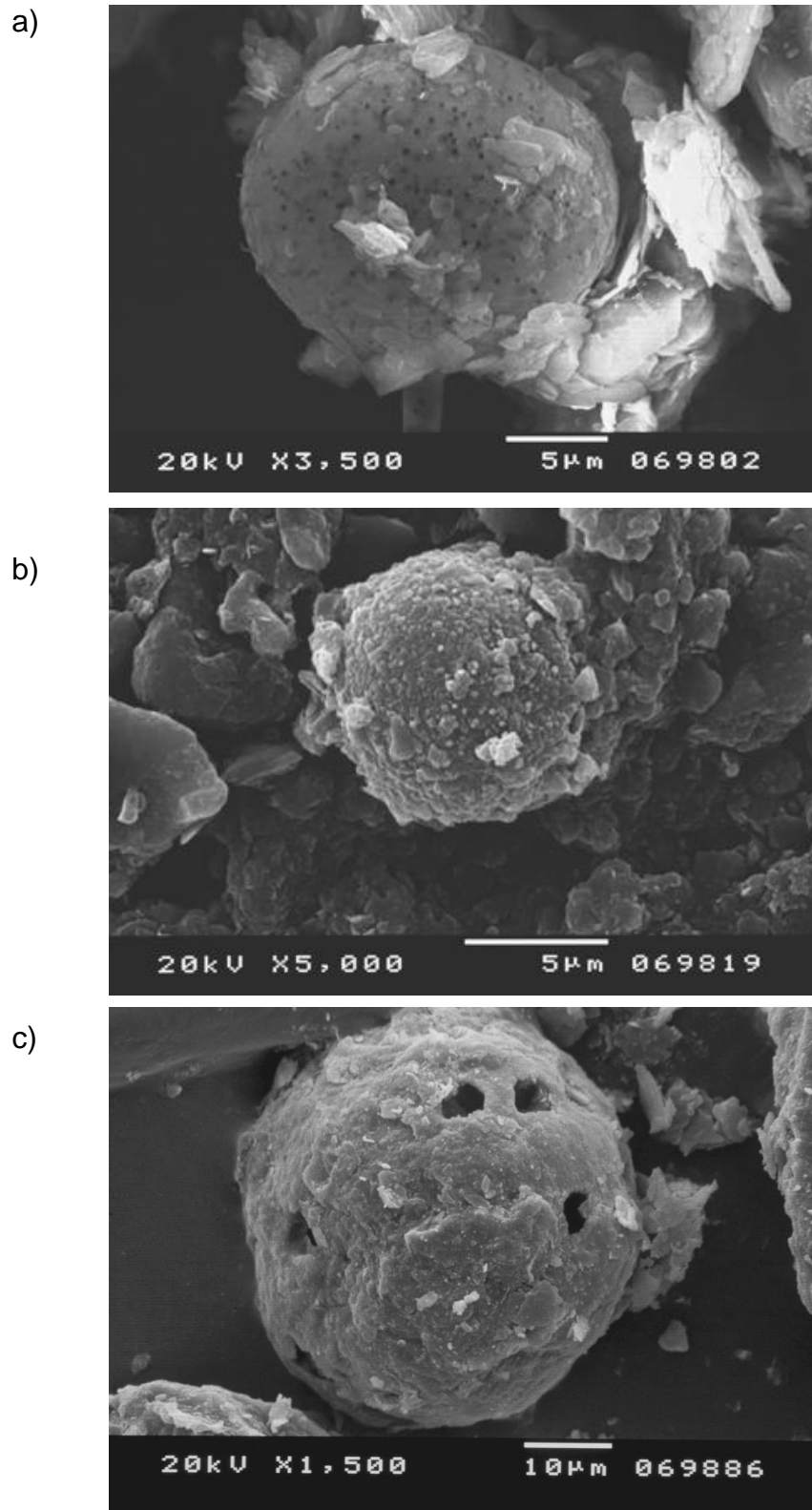


Fig. VI.24 - Microfotografias de esférulas das amostras a) 93, b) 112 e c) P2A1

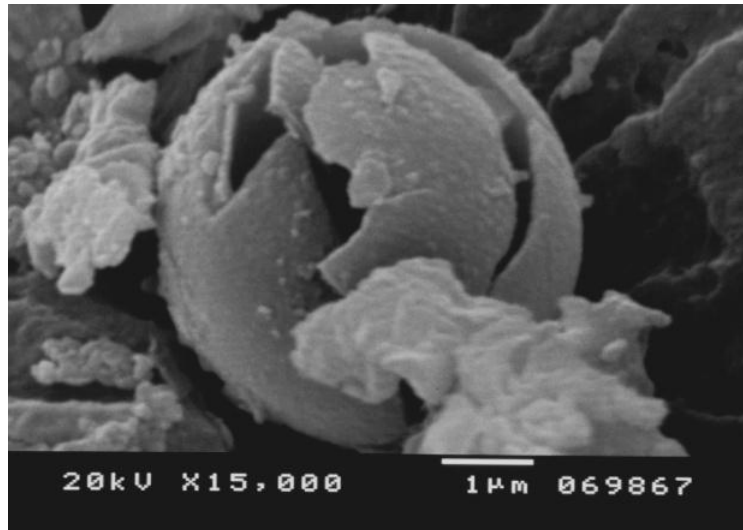


Fig. VI.25 - Microfotografia de esférula oca da amostra P6A2.

A presença de esférulas, apresentando cavidades na superfície, foi assinalada por Yang *et al.* (2011). Segundo os autores, as cavidades, que conferem o aspecto poroso, como se pode observar na figura VI.24 c), correspondem a figuras de dissolução induzida por uma alternância de condições anaeróbias e redutoras. Esta alternância de condições pode favorecer a dissolução de minerais magnéticos como a magnetite e a maghemite (Maher, 1998).

Nas microfotografias da amostra 137, colhida junto da linha de caminho-de-ferro (Estação Coimbra-B), observaram-se partículas angulosas que apresentam estruturas típicas de corrosão de metais (figura VI.26) resultantes, provavelmente, do desgaste dos carris.

As amostras colhidas à superfície revelaram a presença de esférulas, contrariamente às amostras colhidas em profundidade. Nas amostras colhidas nos horizontes sub-superficiais dos perfis de solo não se detectaram partículas magnéticas com esta morfologia (figura VI.27). A deposição de partículas magnéticas poluentes, provenientes de actividades antrópicas e transportadas pela atmosfera é, assim, o principal processo responsável pela presença destas partículas nas camadas superficiais dos solos. As amostras dos perfis 3 e 5 não revelaram a presença deste tipo de partículas (figura VI.28).



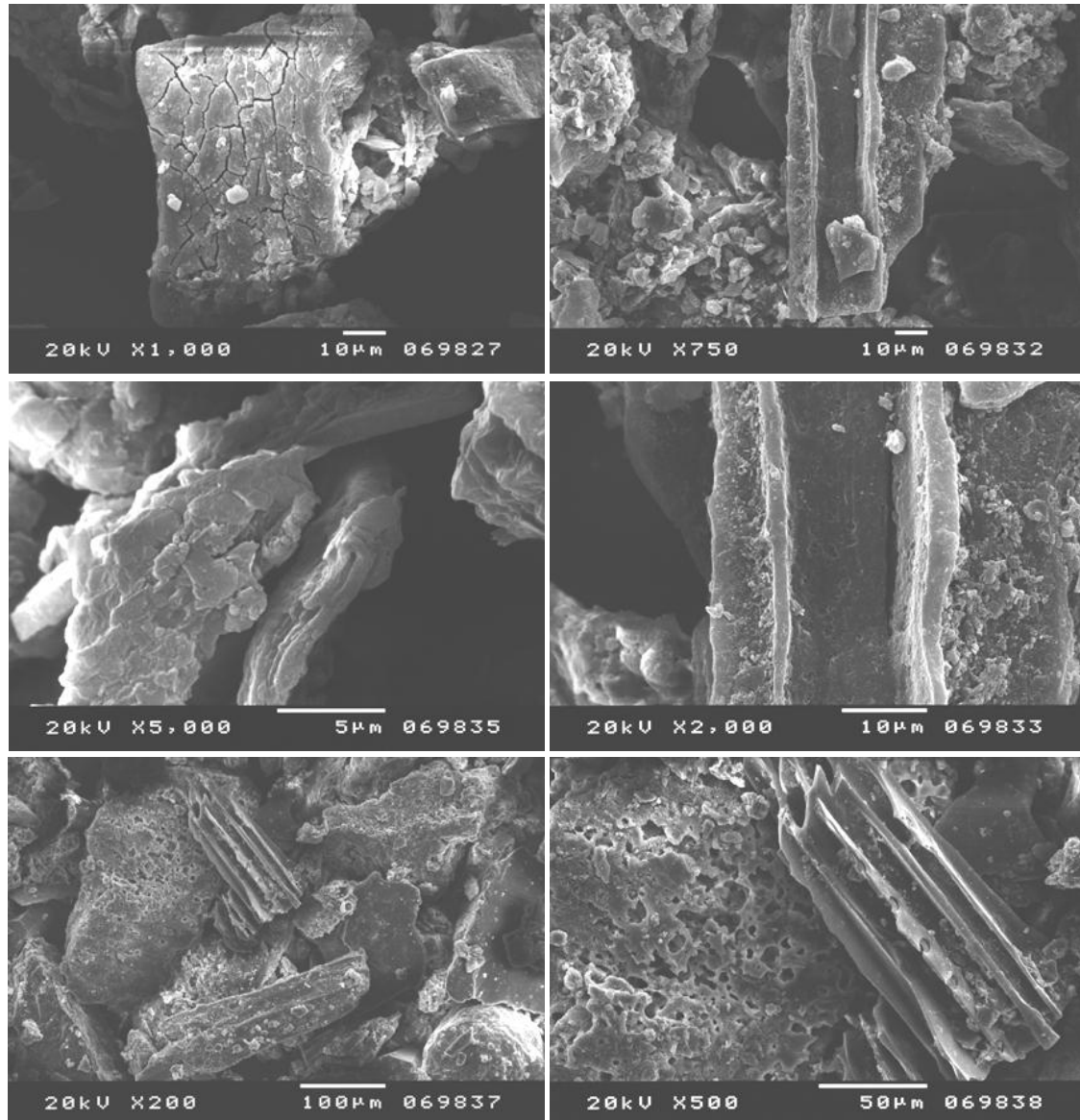


Fig. VI.26 - Microfotografias de partículas metálicas observadas na amostra 137.

A composição de um conjunto de esférulas representativas foi analisada por espectroscopia de raios-X, por energia dispersiva (EDS). Estas partículas são compostas predominantemente por Fe e O, tratando-se provavelmente de partículas de magnetite. Foram também identificados os elementos Al, C, K, Mg e Si. Aparece em todos os espectros um pico indexado ao Au, que resulta do material utilizado na preparação (revestimento) das amostras (figura VI. 29).



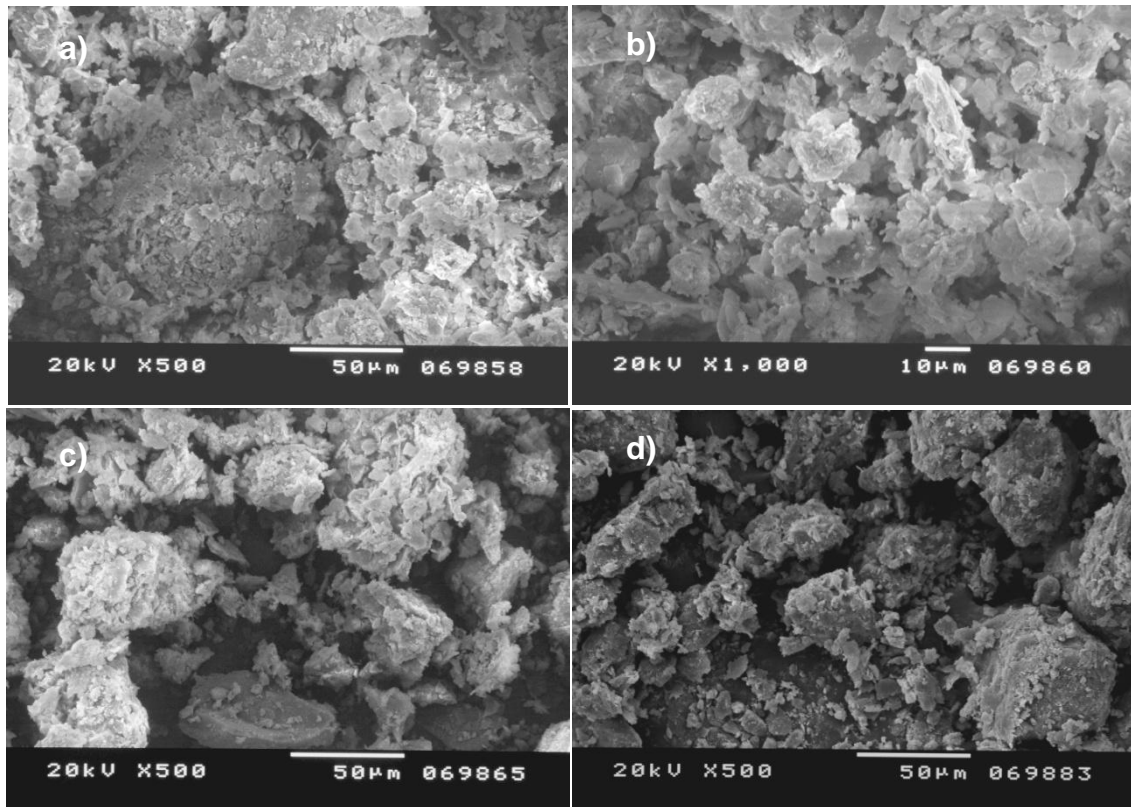


Fig. VI.27 – Microfotografias de amostras de solo colhidas em profundidade (aspecto geral); a) e b) amostra P2A2; c) amostra P3B e d) amostra P4B.

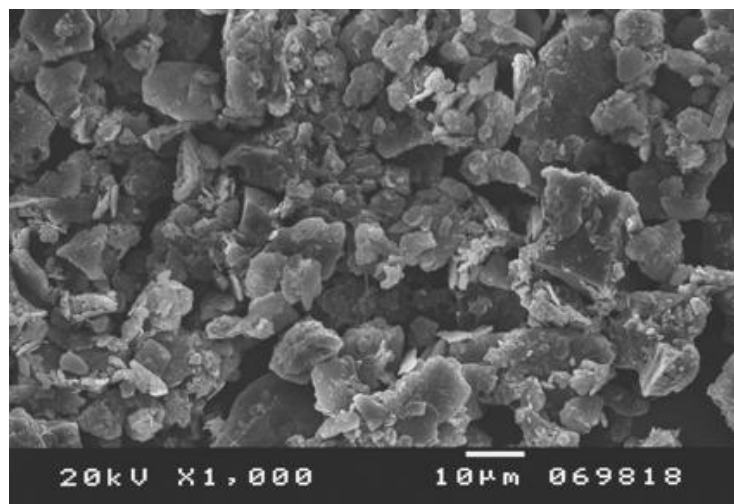


Fig. VI.28 - Microfotografia da amostra P5A

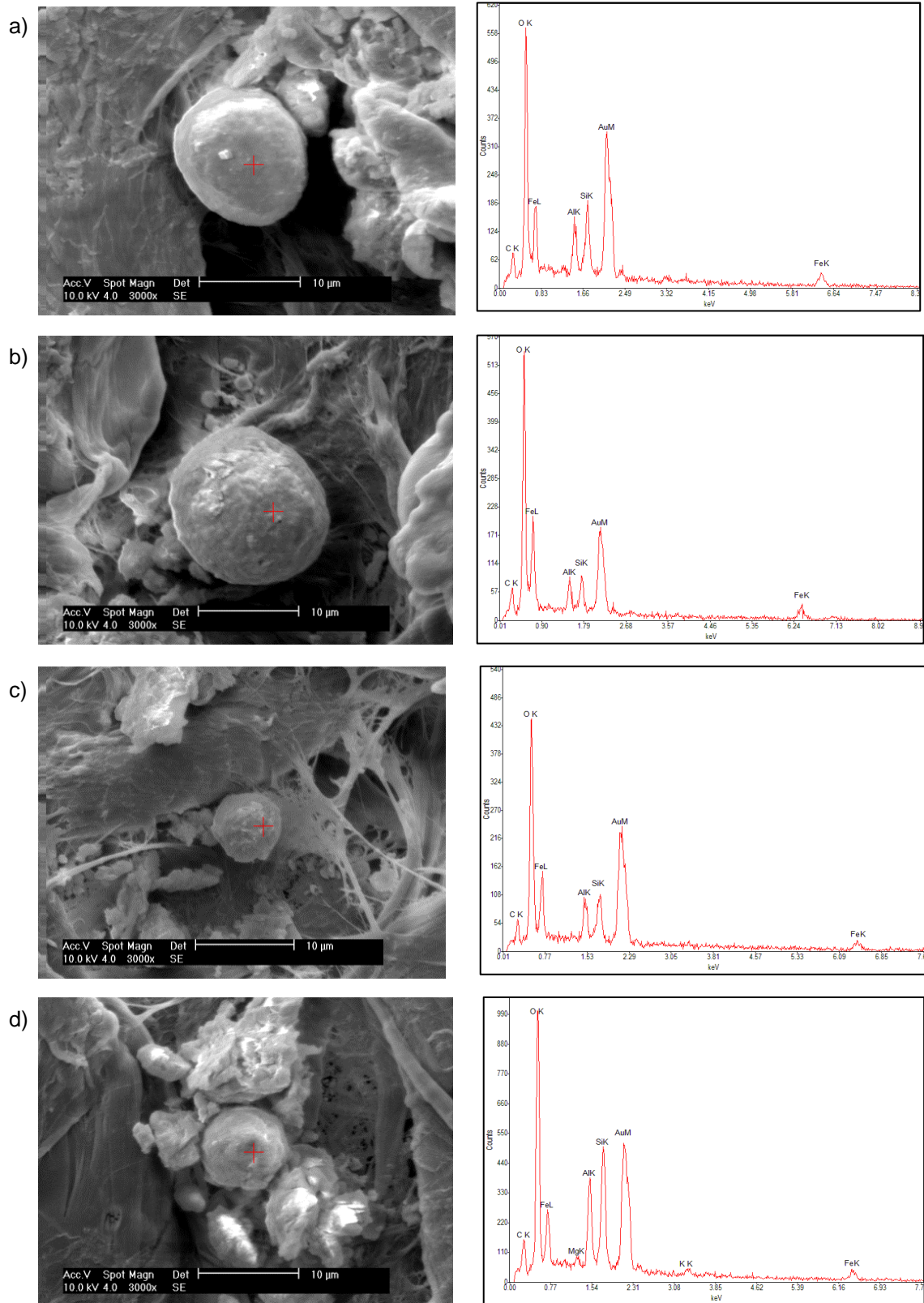


Fig. VI.29 – Imagens de EDS e microanálises de esférulas das amostras P1A (a e b), 93 (c) e 112 (d).

A composição das partículas analisadas é muito semelhante à determinada por Gautam *et al.* (2004), Horng *et al.* (2008) e Kim *et al.* (2009), com excepção do Ca e Co, que não foram detectados. A presença de C em todas as partículas analisadas indica que estas têm origem antrópica, como resultado da queima de combustíveis fósseis (Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2009). Os elementos como o Al, K, Mg e Si podem também estar relacionados com a composição dos combustíveis fósseis (Kim *et al.*, 2009), ou terem uma origem natural (litogénica/pedogénica), de acordo com El Baghdadi *et al.* (2011). A forte associação entre óxidos de ferro e minerais de argila justifica a presença de minerais silicatados nos extractos magnéticos (Maher *et al.*, 2003), sendo comum a presença de partículas magnéticas “revestidas” de minerais argilosos (e.g. Rosowiecka e Nawrocki, 2009; El Baghdadi *et al.*, 2011).

## VI.5 ANÁLISES MINERALÓGICAS

Para conhecimento da composição mineralógica dos solos, foram realizadas análises por difracção de raio-X num conjunto seleccionado de amostras (Lourenço *et al.* 2012). A determinação mineralógica qualitativa e semi-quantitativa foi efectuada para a fracção total e para a fracção argilosa (<2 µm).

### **Fracção total**

A análise semi-quantitativa foi realizada, sobre os difractogramas, com base na área dos picos basais e corrigida em função do poder reflector de cada mineral. A percentagem calculada (tabela VI.10) resulta da relação de cada frequência sobre o total dos valores respeitantes a cada mineral presente. Da análise dos difratogramas relativos à amostra total, verifica-se que o quartzo é o mineral mais abundante. Em relação aos minerais do grupo dos carbonatos, é comum a presença de calcite e dolomite, com predomínio da calcite. Também se detectou a presença de siderite nalgumas amostras com teores quantificáveis, não ultrapassando os 5%. Verificou-se, ainda, a presença vestigial de sulfuretos do grupo da pirrotite e/ou greigite (e.g. amostras 144, 145, 127), goethite (e.g. amostra 162) (figura VI.30), jarosite e minerais do grupo da plumbogumite (e.g. 130, 131, 144, 145 e 162). Nalgumas amostras (e.g. 147 e 149) (figura VI.31) assinalou-se a presença de óxidos de ferro como a magnetite e/ou maghemite (em quantidades-traço, à semelhança de Maher *et al.*, 2003).

Tabela VI.10 - Análise semi-quantitativa da fracção total (%).

	filossilicatos	quarzo	feldsp. K	plagioclase	calcite	dolomite	siderite
<b>Máx.</b>	45	56	30	60	24	24	5
<b>Mín.</b>	3	23	3	1	1	1	3
<b>Média</b>	24	38	11	16	11	7	4

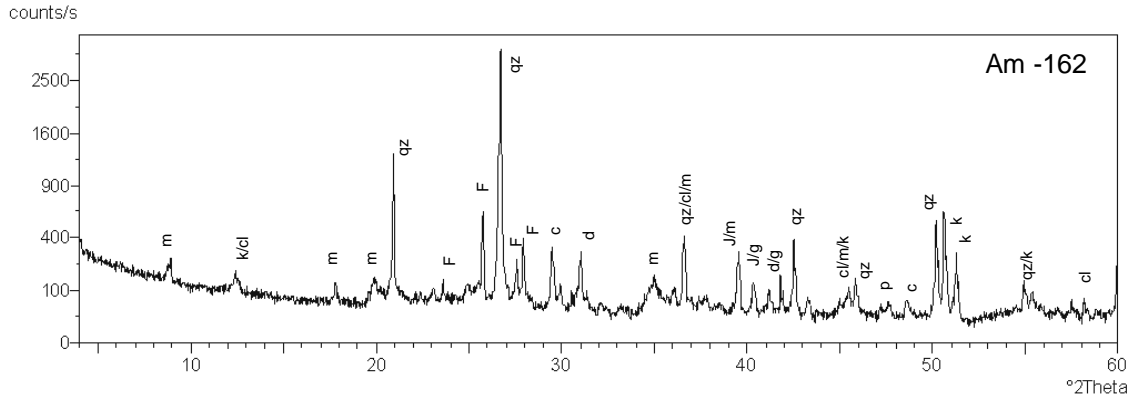


Fig. VI.30 – Diffractograma da amostra 162 (qz - quartzo; m - mica; cl - clorite; F - feldspato; J - jarosite; g - goethite; d - dolomite; p - plumbogumite, k - caulinite; c - calcite).

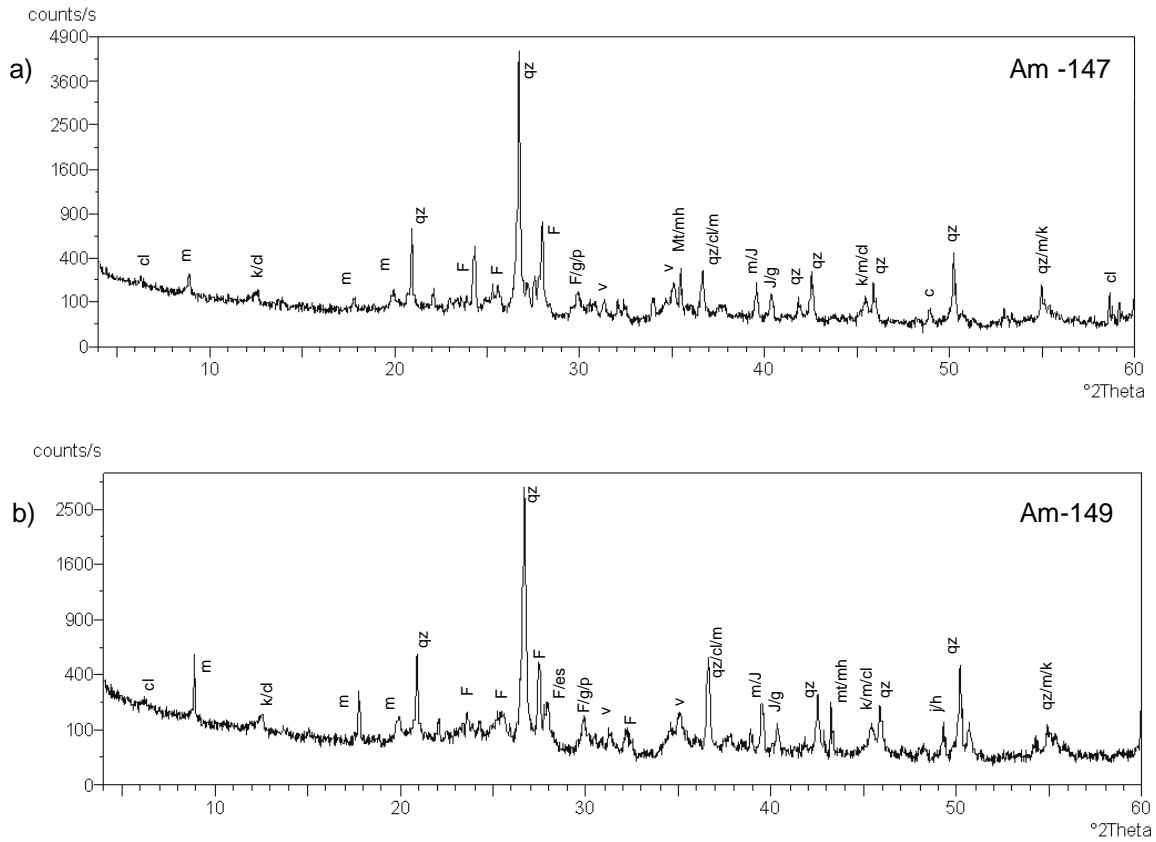


Fig. VI.31 – Diffractogramas das amostras 147 a) e 149 b) (qz - quartzo; m - mica; cl - clorite; F - feldspato; J - arosite; g - goethite; p - plumbogumite, k - caulinite; es - esmectite; v - vermiculite; h - hematite; mt - magnetite; mh - maghemite).

### Fracção argilosa

A semi-quantificação dos minerais de argila baseou-se na área dos picos, registados nos três tipos de difractograma (Thorez, 1970 cit. em Lapa e Reis, 1977). Os minerais mais abundantes (tabela VI.11) são os minerais do grupo da ilite e do grupo da caulinite. Seguem-se-lhes os minerais do grupo da clorite. Na maior parte das amostras, a ilite predomina em relação à caulinite e, apenas num número muito reduzido de amostras, a caulinite tem um teor superior ao da ilite (e.g. amostras 131, 145 e 154). Nalgumas amostras estes dois minerais apresentam-se em proporções equivalentes (e.g. amostras 148 e 166). A esmectite foi detectada num número reduzido de amostras, mas em proporção não quantificável. A presença de interstratificados do tipo ilite-esmectite é comum em todas as amostras.

Tabela VI.11- Análise semi-quantitativa da fracção argilosa (%).

	<b>ilite</b>	<b>clorite</b>	<b>caulinite</b>	<b>interstratificados</b>
<b>Máx.</b>	68	18	55	26
<b>Mín.</b>	23	1	17	1
<b>Média</b>	52	6	33	9

### Índice de cristalinidade

Foram determinados os índices de cristalinidade da ilite, clorite e caulinite (Lourenço *et al.*, 2012). Estes índices reflectem as condições ambientais a que os minerais argilosos foram sujeitos. Estes adaptam-se às condições prevalentes através de modificações na sua estrutura cristalóquímica, como por exemplo, as decorrentes dos processos diagenéticos. Deste modo, a avaliação da cristalinidade pode ser utilizada em estudos estratigráficos, paleogeográficos e paleoclimáticos e permitir um melhor conhecimento dos ambientes geológicos modernos e antigos (Rocha, 1993). Pode ser também utilizada em estudos geoquímicos (Rocha e Vidinha, 2011), pois o grau de cristalinidade tem uma influência importante na fixação de metais pesados por minerais secundários, como as argilas, sendo os minerais mal cristalizados absorventes mais eficientes do que os cristalinos (Jackson, 1998). Quanto maior o valor do índice, menor será a cristalinidade dos minerais. Os resultados são apresentados na tabela VI.12. No presente estudo, não foram encontradas correlações significativas entre o teor em metais pesados e os índices de cristalinidade.

Tabela VI.12- Índices de cristalinidade ( $^{\circ}2\theta$ ).

	<b>Ilite</b>	<b>Clorite</b>	<b>Caulinite</b>
<b>Máx.</b>	1.30	1.00	0.27
<b>Mín.</b>	0.20	0.20	0.11
<b>Média</b>	0.59	0.45	0.18



## VI.6 PERFIS DE SOLO

Com o objectivo de obter informação sobre o comportamento em profundidade dos vários parâmetros analisados no presente estudo, foram abertos 6 perfis de solo (figura V.1), de forma a estudar as principais manchas de solos presentes na área (figura IV.19).

### VI. 6.1 Descrição morfológica dos perfis de solo

Nesta secção faz-se a apresentação dos perfis estudados.

#### Perfil nº 1

*Localização:* Portugal, distrito de Coimbra, concelho de Coimbra, freguesia de Santo António dos Olivais, Av. Gouveia Monteiro (Coord. UTM 548786,59; 4452063,89, elev. 52 m) (fig. VI.32)

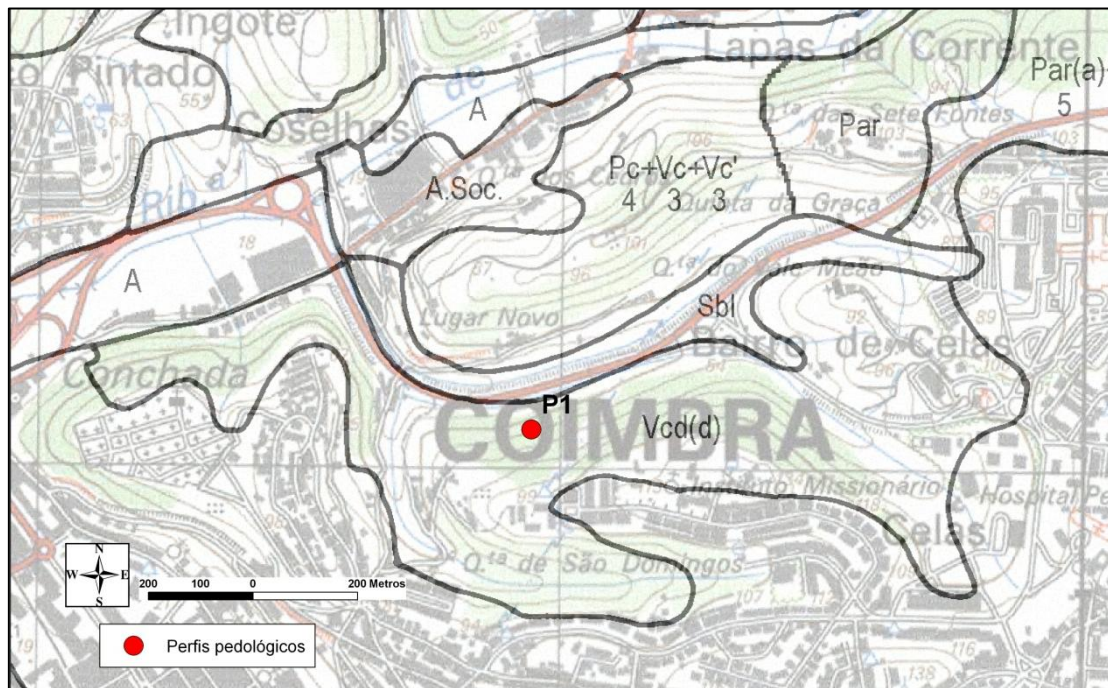


Fig. VI.32 – Localização do perfil 1: enquadramento na carta de solos 1/25 000, folha nº 230. **Vcd**: Solos Argiluvitados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Calcários, Normais, de calcários compactos ou dolomias; **Sbl**: Solos Incipientes - Solos de Baixas (Coluviossolos), Não Calcários, de textura ligeira; **Pc**: Solos Calcários, Pardos dos Climas de Regime Xérico, Normais, de calcários não compactos; **Vc**: Solos Calcários, Vermelhos dos Climas de Regime Xérico, Normais, de calcários; **Vc'**: Solos Calcários, Vermelhos dos Climas de Regime Xérico, Para-Barros, de calcários não compactos, associados a dioritos ou gabros ou rochas eruptivas ou cristalofílicas básicas, ou de materiais afins; **Par**: Solos Litólicos, Não Húmicos Pouco Insaturados, Normais, de materiais arenáceos pouco consolidados (de textura arenosa a franco-arenosa); **A**: Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura mediana; **A. Soc.**: Área Social; **(a)**: fase agropédica; **(d)**: fase delgada (D.G.A.D.R., 2002).

**Litologia:** calcários e calcários dolomíticos

**Geologia:** Formação de Coimbra (Soares et al., 2007).

**Topografia:** declive 34%, exposição a Norte.

**Uso actual:** Terreno de cultivo abandonado

**Drenagem:** Externa - Boa; Interna - Fraca

**Vegetação:** giestas (*Cytisus striatus*), silvas (*Rubus* sp.), heras (*Hedera helix*), vincas (*Vinca* sp.), viburnos (*Viburnum tinus*), serralhas (*Sonchus oleraceus*), chicórias (*Cichorium intybus*), pilriteiros (*Crataegus monogyna*), loureiros (*Laurus nobilis*), medronheiros (*Arbutus unedo*), gilbardeiras (*Ruscus aculeatus*), olaias (*Cercis siliquastrum*), choupos (*Populus* sp.).



Perfil nº 1, Av. Gouveia Monteiro, Coimbra.

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
A	0 - 30	Pardo avermelhado (5YR 4/3). Textura argilosa. Consistência firme e rija. Estrutura anisoforme. Presença de muitas raízes finas a médias. Apresenta actividade biológica. Sem efervescência ao HCl. Transição gradual para B. pH: 5,5.
B	30 - 70	Apresenta-se com manchas amarelas - pardo amarelado claro (2,5Y 6/4) e manchas castanhas - pardo forte (7,5YR 5/8). Textura argilosa. Consistência plástica, aderente. pH: 6,5.
C <sub>1</sub>	70 - 100	Material originário proveniente do calcário alterado, com manchas pardo amarelado claro (2,5YR 6/4) e amarelas (2,5Y 8/6). pH: 6,5.
C <sub>2</sub>	100 - 110	Material originário menos alterado que o anterior. pH: 7.
R	110 - ...	Rocha - mãe.



## Perfil nº 2

*Localização:* Portugal, distrito de Coimbra, concelho de Coimbra, freguesia de Santa Clara, Planalto de Santa Clara (Coord. UTM 547530,86; 4450917,05, elev. 74 m) (figura VI.33).

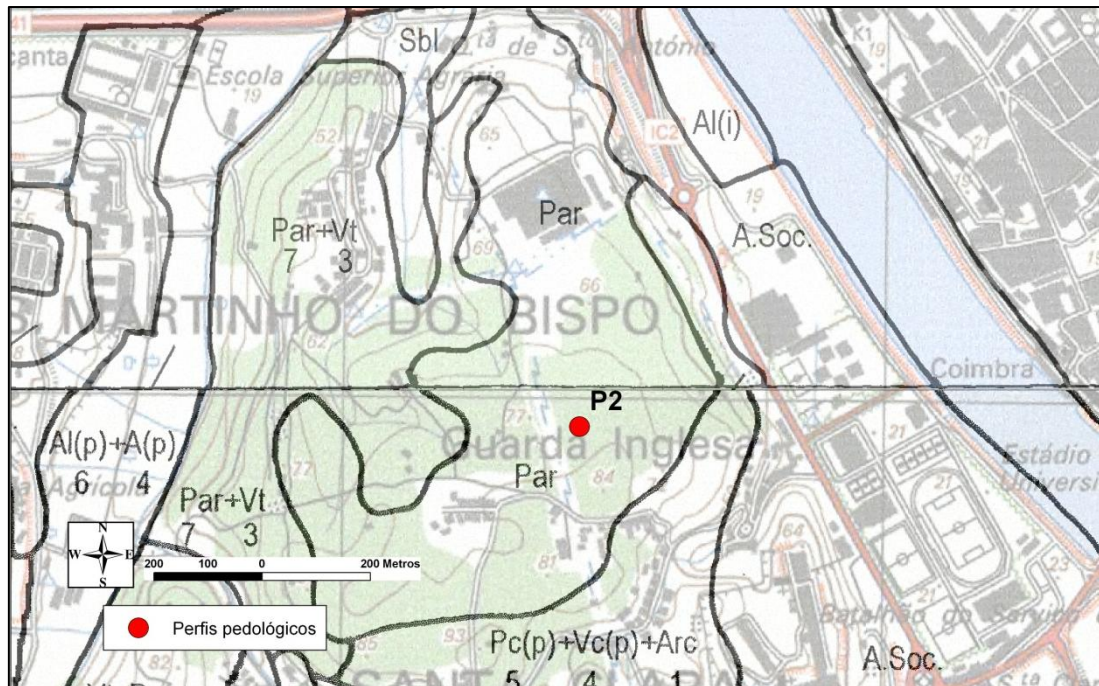


Fig. VI.33 – Localização do perfil 2: enquadramento na carta de solos 1/25 000, folhas nº 230 e 241. **Par**: Solos Litólicos, Não Húmicos Pouco Insaturados, Normais, de materiais arenáceos pouco consolidados (de textura arenosa a franco-arenosa); **Vt**: Solos Litólicos, Não Húmicos, Pouco Insaturados Normais, de arenitos grosseiros; **Pc**: Solos Calcários, Pardos dos Climas de Regime Xérico, Normais, de calcários não compactos; **Vc**: Solos Calcários, Vermelhos dos Climas de Regime Xérico, Normais, de calcários; **Arc**: Afloramento Rochoso de calcários ou dolomias; **Al**: Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura ligeira; **A**: Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura mediana; **A. Soc.**: Área Social; **(p)**: fase pedregosa; **(i)**: fase inundável (D.G A.D.R., 2002).

**Litologia:** depósito detrítico, cascalhento, com calhaus rolados de quartzo e quartzito e matriz argilosa.

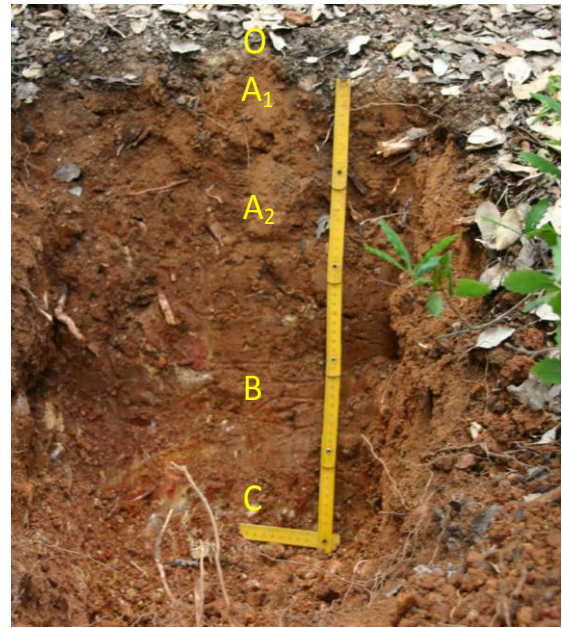
**Geologia:** *Areias Vermelhas de Ingote* (Soares *et al.*, 2007)

**Topografia:** zona aplanada, a 65 metros de altitude.

**Uso actual:** Zona de mato.

**Drenagem:** Externa-Boa; Interna-Fraca.

**Vegetação:** sobreiros (*Quercus suber*), azinheiras (*Quercus ilex*), carvalhos (*Quercus* sp.), sabugueiros (*Sambucus* sp.), oliveiras (*Olea europaea*), acácias (*Acacia* sp.), giestas (*Cytisus striatus*), heras (*Hedera helix*), pilriteiros (*Crataegus monogyna*), urze (*Erica* sp.), azevinho (*Ilex aquifolium*) e medronheiros (*Arbutus unedo*).



Perfil nº 2, Planalto de Santa Clara, Coimbra.

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
O <sub>0</sub>	-2 - -1	Folhada (folhas secas e outros resíduos orgânicos não decompostos).
O <sub>1</sub>	-1 - 0	Detritos orgânicos parcialmente decompostos.
A <sub>1</sub>	0 - 3/4	Pardo avermelhado (5YR 5/3) (seco) e pardo avermelhado escuro (5YR 3/4) (húmido). Textura franco-argilosa. Consistência: pouco plástico, não aderente. Friável. Estrutura grumosa. Presença de muitas raízes finas. pH: 6,5.
A <sub>2</sub>	3/4 - 20	Vermelho (2,5YR 4/6) (seco) e vermelho (2,5YR 5/6) (húmido). Estrutura anisforme grosseira. Consistência plástica, aderente. Textura franco-argilosa. Presença de raízes médias a grossas. Transição ondulada para B. pH: 4,5.
B	20 - 30/40	Presença de manchas amarelo-avermelhado (7,5YR 7/6: seco; 5YR 6/8: húmido) e vermelho (2,5YR 4/8: seco; 2,5YR 4/8: húmido). Sem estrutura, compacto, duro. Consistência plástica, aderente. Textura argilosa. Raízes grossas. pH: 5.
C	30/40 - 50	Vermelho (10R 4/8) (seco). Material detrítico, com algumas raízes grossas. Presença de manchas brancas, pardo-amareladas e amarelo-vivo. Estrutura dura, compacta. pH: 4,5.

### Perfil nº 3

*Localização:* Portugal, distrito de Coimbra, concelho de Coimbra, freguesia de Castelo Viegas (Coord. UTM 550151,72; 4447397,84, elev. 38 m) (fig. VI.34).

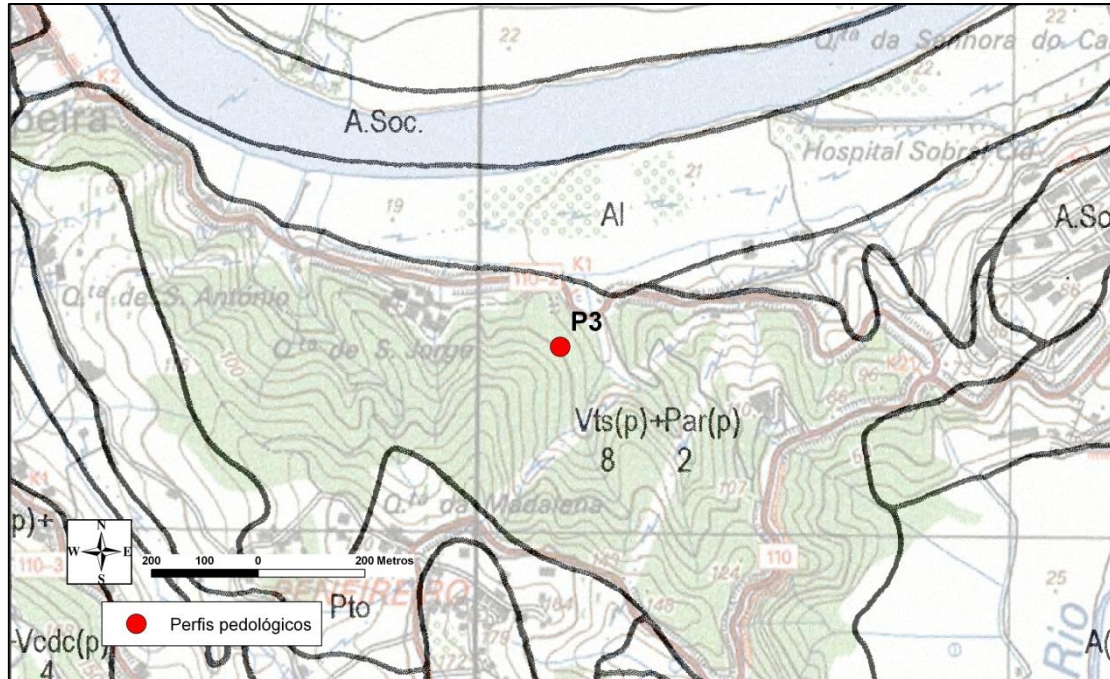



Figura VI.34 – Localização do perfil 3: enquadramento na carta de solos 1/25 000, folha nº 241. **Vts:** Solos Litólicos, Não Húmicos Pouco Insaturados, Normais, de "grés de Silves" ou rochas afins; **Par:** Solos Litólicos, Não Húmicos Pouco Insaturados, Normais, de materiais arenáceos pouco consolidados (de textura arenosa a franco-arenosa); **Pto:** Solos Litólicos, Não Húmicos, Pouco Insaturados, Normais, pardos, de arenitos finos micáceos (de textura franco-arenosa a franca); **AI:** Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura ligeira; **A. Soc.:** Área Social; **(p):** fase pedregosa (D.G.A.D.R., 2002).



<p><b>Litologia:</b> conglomerados, arenitos e pelitos.</p> <p><b>Geologia:</b> <i>Formação de Castelo Viegas</i> (Soares <i>et al.</i>, 2007).</p> <p><b>Topografia:</b> em vertente declivosa, a 50 metros de altitude, com declive de 17% e exposição a Norte.</p> <p><b>Uso actual:</b> Terreno de cultivo abandonado</p> <p><b>Drenagem:</b> Externa - Boa; Interna – Boa.</p> <p><b>Vegetação:</b> sobreiros (<i>Quercus suber</i>), carvalhos (<i>Quercus sp.</i>), azinheiras (<i>Quercus ilex</i>), oliveiras (<i>Olea europaea</i>), medronheiros (<i>Arbutus unedo</i>), urze (<i>Erica sp.</i>), acácias (<i>Acacia sp.</i>), pilriteiros (<i>Crataegus monogyna</i>), vincas (<i>Vinca sp.</i>), sabugueiros (<i>Sambucus sp.</i>), giestas (<i>Cytisus striatus</i>), azevinho (<i>Ilex aquifolium</i>), silvas (<i>Rubus sp.</i>), heras (<i>Hedera helix</i>), chicórias (<i>Cichorium intybus</i>), loureiros (<i>Laurus nobilis</i>) e gilbardeiras (<i>Ruscus aculeatus</i>).</p>	 <p>Perfil nº3, Mosteiro de S. Jorge de Milréu, Coimbra.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
A	0 - 15/20	Vermelho (2,5YR 4/8) (seco) e vermelho fraco (2,5YR 4/2) (húmido). Friável, pouco aderente. Textura franco-arenosa. Presença de muitas raízes finas a médias. Apresenta actividade biológica. Transição difusa para B. pH: 5.
(B)	15/20 - 40	Pardo avermelhado escuro (2.5YR 2/4) (seco) e vermelho sombrio (2.5YR 3/2) (húmido). Textura franco-arenosa. Friável. Presença de algumas raízes muito finas. pH: 5,5.
C <sub>1</sub>	40 - 60	Material originário alterado. pH: 4.
C <sub>2</sub>	60 - 80	Material originário menos alterado que o anterior. pH: 5.5.
R	80 - ....	Rocha-mãe.

## Perfil nº 4

*Localização:* Portugal, distrito de Coimbra, concelho de Coimbra, freguesia de Ameal (Coord. UTM 539911,65; 4448945,53, elev. 30 m) (figura VI.35).

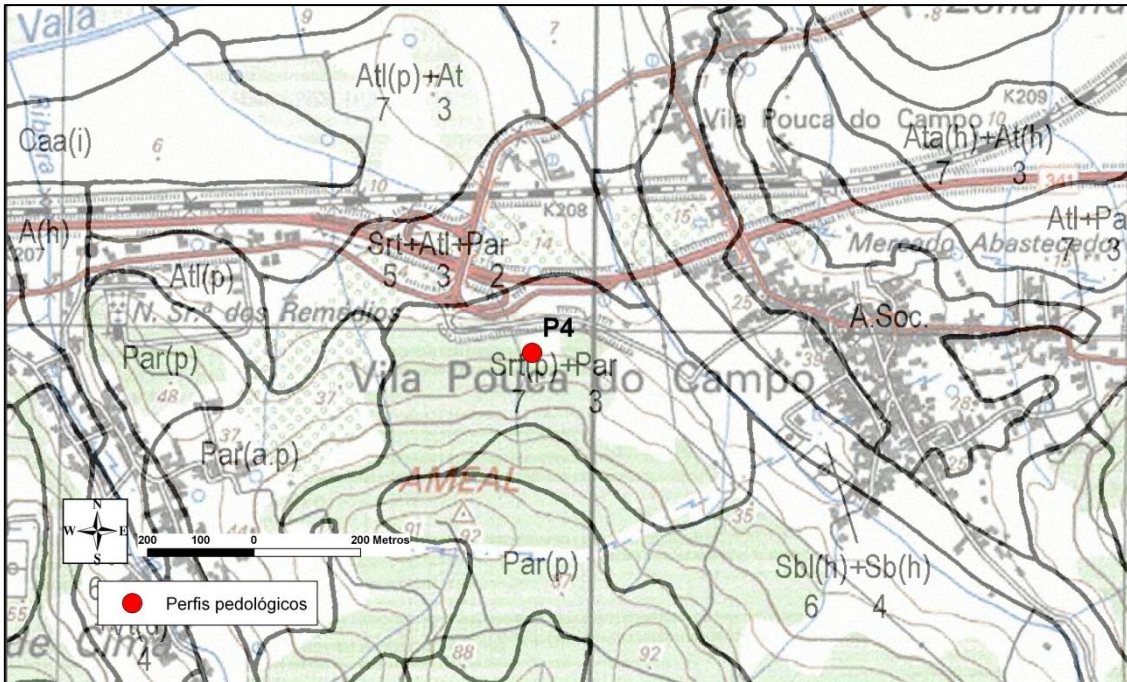


Fig. VI.35 – Localização do perfil 4: enquadramento na carta de solos 1/25 000, folha nº 241. **Srt**: Solos Argiluiados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Não Calcários, Normais, de arenitos arcósicos ou arcoses; **Par**: Solos Litólicos, Não Húmicos Pouco Insaturados, Normais, de materiais arenáceos pouco consolidados (de textura arenosa a franco-arenosa); **Sbl**: Solos Incipientes - Solos de Baixas (Coluviosolos), Não Calcários, de textura ligeira; **Sb**: Solos Incipientes - Solos de Baixas (Coluviosolos), Não Calcários, de textura mediana; **Caa**: Solos Hidromórficos, Sem Horizonte Eluvial, Para-Aluviosolos (ou Para-Coluviosolos), de aluviões ou coluviais de textura pesada; **Atl**: Solos Incipientes - Aluviosolos Antigos, Não Calcários, de textura ligeira; **A**: Solos Incipientes - Aluviosolos Modernos, Não Calcários, de textura mediana; **At**: Solos Incipientes - Aluviosolos Antigos, Não Calcários, de textura mediana; **Ata**: Solos Incipientes - Aluviosolos Antigos, Não Calcários, de textura pesada; **A. Soc.**: Área Social; **(p)**: fase pedregosa; **(h)**: fase mal drenada; **(i)**: fase inundável (D.G.A.D.R., 2002).

**Litologia:** arenitos grosseiros, argilo-conglomeráticos.

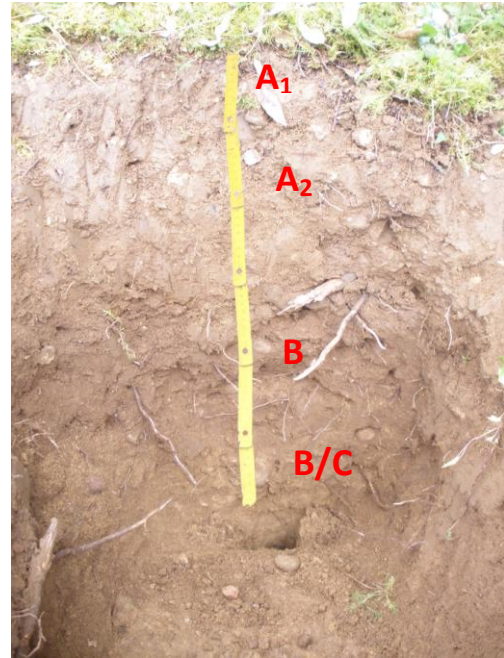
**Geologia:** Arenitos e Argilas de Taveiro (Rocha *et al.*, 1981) = Formação de Taveiro (Soares *et al.*, 2007).

**Topografia:** vertente pouco declivosa, a 20 metros de altitude, com declive de 10% e exposição a Norte.

**Uso actual:** Terreno de cultivo abandonado.

**Drenagem:** Externa - Boa; Interna – Fraca.

**Vegetação:** carvalhos (*Quercus sp.*), sobreiros (*Quercus suber*), loureiros (*Laurus nobilis*), pilriteiros (*Crataegus monogyna*), pinheiros (*Pinus sp.*), eucaliptos (*Eucalyptus sp.*), acácias (*Acacia sp.*), silvas (*Rubus sp.*), heras (*Hedera helix*), madressilva (*Lonicera ericlymenum*).



Perfil nº4, Ameal, Coimbra.

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
A <sub>1</sub>	0 - 2	Pardo avermelhado (2,5YR 5/4). Poroso, solto, grumoso. Presença de muitas raízes finas e muita matéria orgânica. pH: 5.
A <sub>2</sub>	2 - 25	Pardo acinzentado ((2,5Y 5/2). Textura franco-argilosa, aderente, compacto. Estrutura anisoforme, forte, com muitas raízes na transição para B. pH: 4,5.
B	25 - 50	Pardo oliváceo claro (2,5Y 5/4). Aderente, compacto, estrutura anisoforme, textura franca. pH: 4,5.
B/C	50 - 100	Pardo (7,5YR 5/2). Franco-argilo-limoso, pouco aderente, compacto. Estrutura grumosa fina. Muitas raízes finas. pH: 4,5.
C	100 - ...	Rosa (7,5YR 7/4). Textura areno-franca, solto, não aderente. Sem efervescência ao HCl. pH: 4.



## Perfil nº 5

*Localização:* Portugal, distrito de Coimbra, concelho de Coimbra, freguesia de Ceira (Coord. UTM: 553569,42; 4447148,73, elev. 107 m) (fig. VI.36)

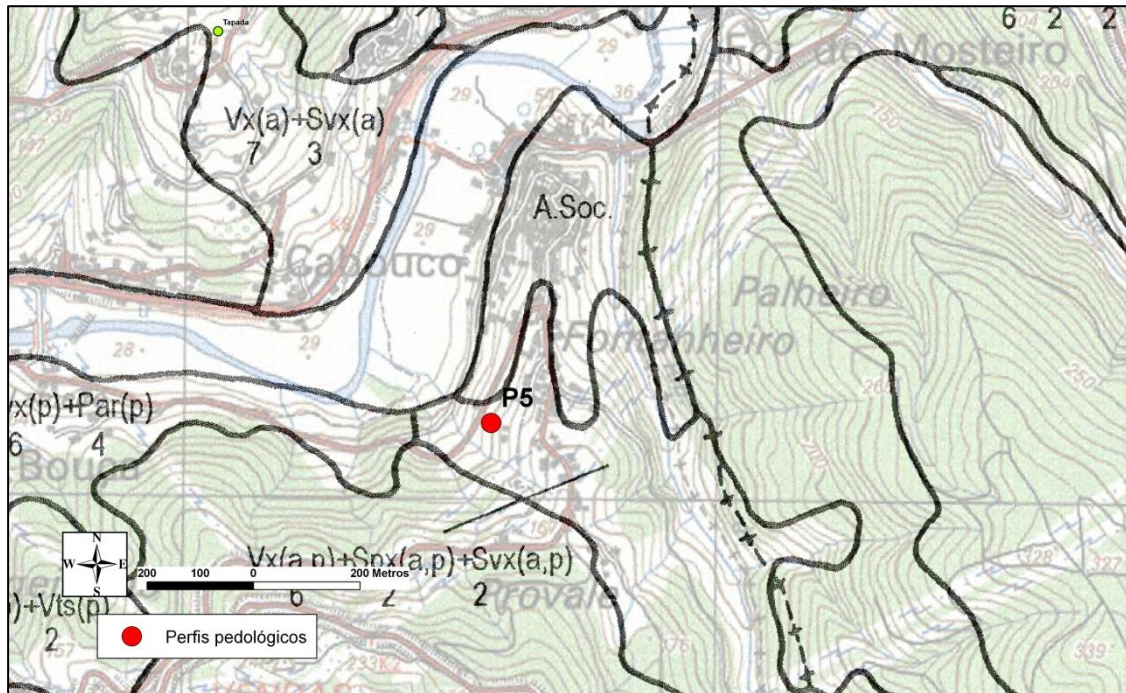
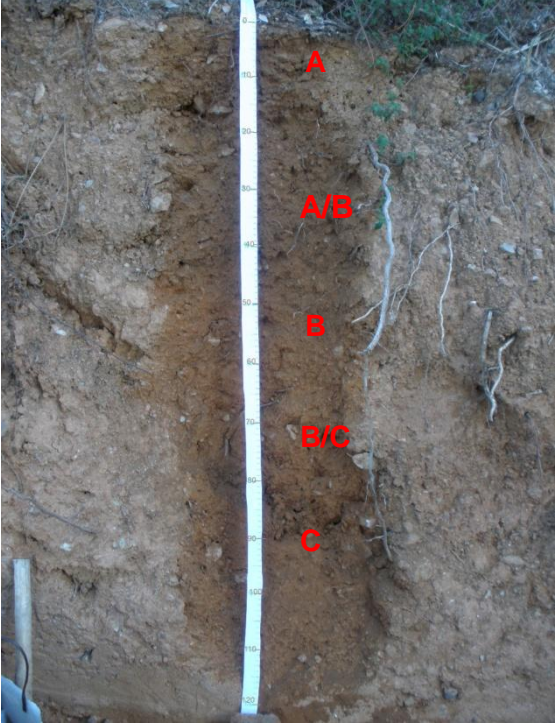


Fig. VI.36 – Localização do perfil 5: enquadramento na carta de solos 1/25 000, folha nº 241. **Vx**: Solos Argiluiados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Não Calcários, Normais, de xistos ou grauvaques; **Spx**: Solos Argiluiados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Pardos, de Materiais Não Calcários, Normais, de material coluviado de solos derivados de xistos ou grauvaques; **Svx**: Solos Argiluiados Pouco Insaturados - Solos Mediterrâneos, Vermelhos ou Amarelos, de Materiais Não Calcários, Normais, de material coluviado dos solos da Família Vx; **A. Soc.**: Área Social; **(a)**: fase agropédica; **(p)**: fase pedregosa (D.G.A.D.R., 2002).



<p><i>Litologia:</i> filitos negros</p> <p><i>Geologia:</i> Série Negra (Soares et al., 2007).</p> <p><i>Topografia:</i> declive 34%, exposição a Norte.</p> <p><i>Uso actual:</i> Terreno de cultivo abandonado</p> <p><i>Drenagem:</i> Externa - Boa; Interna - Fraca</p> <p><i>Vegetação:</i> giestas (<i>Cytisus striatus</i>), silvas (<i>Rubus</i> sp.), medronheiros (<i>Arbutus unedo</i>), sobreiros (<i>Quercus suber</i>), oliveiras (<i>Olea europaea</i>).</p>	
<p>Perfil nº 5, estrada Bouça-Cabouco, Coimbra.</p>	

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
A	0 - 25	Pardo avermelhado (5YR 4/3). Friável, pouco aderente. Textura arenosa. Estrutura anisoforme. Presença de pedras e raízes finas a médias. Apresenta actividade biológica (galerias). Transição gradual para B. pH: 6.
A/B	25 - 45	Pardo (7,5YR 5/4). Algumas raízes finas. Consistência firme. Textura compacta, franco-arenosa. Presença de pedras. pH: 5,5.
B	45 - 70	Vermelho fraco (10R 4/3). Algumas raízes finas. Estrutura anisoforme. Algumas raízes finas. Textura franco-arenosa. pH: 4,5.
B/C	70 - 90	Pardo avermelhado (2,5YR 5/4). Textura franca, aderente. Rijo. Com pedras e poucas raízes muito finas. pH: 6.
C	90 - ...	Material parental (filito negro). Sem raízes.

## Perfil nº 6

*Localização:* Portugal, distrito de Coimbra, concelho de Montemor-o-Velho, freguesia de Tentugal (Coord. UTM: 534483,19; 4452467,87, elev. 24 m) (fig. VI.37).

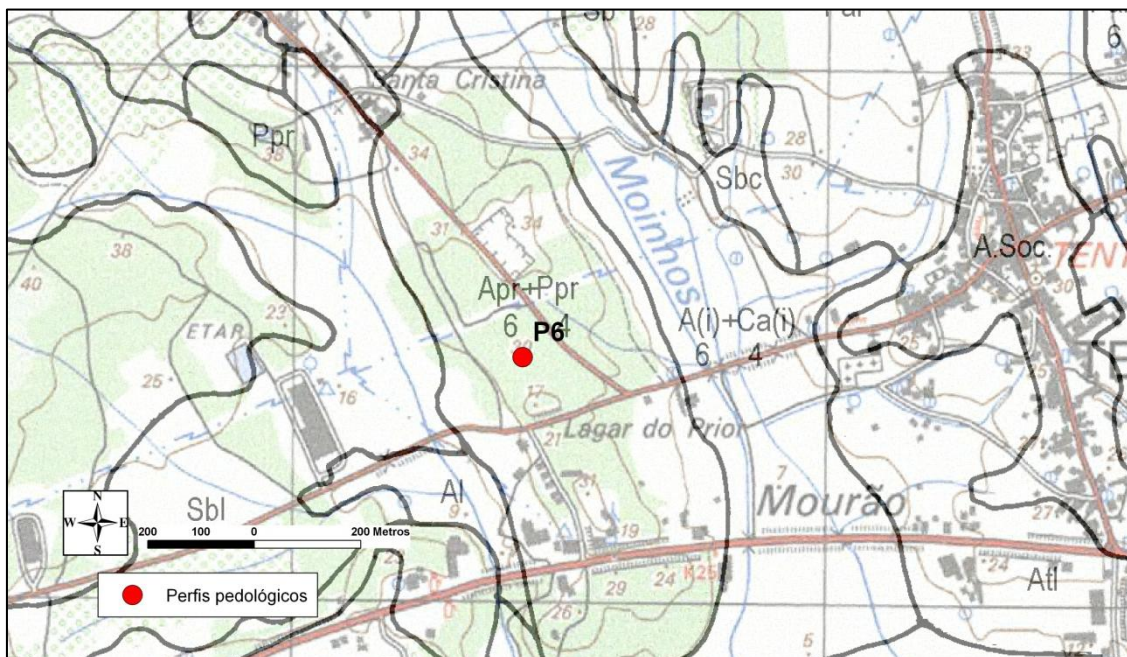
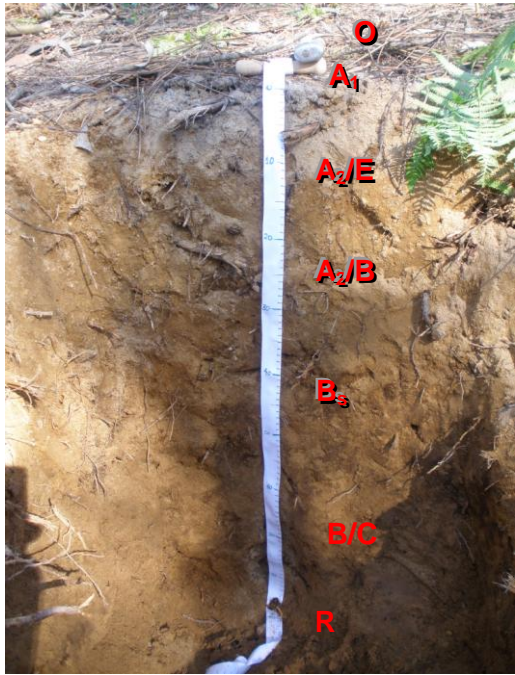


Fig. VI.37 – Localização do perfil 6: enquadramento na carta de solos 1/25 000, folha nº 229.  
**Apr:** Solos Podzolizados - Podzóis (Não Hidromórficos), Sem Surraipa, Para-Solos Litólicos, de materiais arenáceos pouco consolidados; **Ppr:** Solos Podzolizados - Podzóis, (Não Hidromórficos), Com Surraipa, com A2 incipiente, de materiais arenáceos pouco consolidados; **Sbl:** Solos Incipientes - Solos de Baixas (Coluviossolos), Não Calcários, de textura ligeira; **Al:** Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura ligeira; **A:** Solos Incipientes - Aluviossolos Modernos, Não Calcários, de textura mediana; **Ca:** Solos Hidromórficos, Sem Horizonte Eluvial, Para-Aluviossolos (ou Para-Coluviossolos), de aluviões ou coluviais de textura mediana; **Sbc:** Solos Incipientes - Solos de Baixas (Coluviossolos), Calcários. (Para-Solos Calcários), de textura mediana; **Atl:** Solos Incipientes - Aluviossolos Antigos, Não Calcários, de textura ligeira; **A. Soc.:** Área Social; **(i):** fase inundável (D.G. A.D.R., 2002).

<p><i>Litologia:</i> arenitos</p> <p><i>Geologia:</i> Grés de Furadouro (Barbosa et al., 1988) = Formação de Lousões (Soares et al., 2007)</p> <p><i>Topografia:</i> zona plana.</p> <p><i>Uso actual:</i> floresta</p> <p><i>Drenagem:</i> Externa - Boa; Interna – Boa</p> <p><i>Vegetação:</i> pinheiros (<i>Pinus</i> sp.), eucaliptos (<i>Eucalyptus</i> sp.), tojo (<i>Ulex</i> sp.), urze (<i>Erica</i> sp.), azinheiras (<i>Quercus ilex</i>) e fetos (<i>Pteridium</i> sp.).</p>	 <p>Perfil nº 6, Tentúgal, Coimbra.</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
O	-2 - 0	Folhada de caruma e eucalipto.
A <sub>1</sub>	0 - 5	Cinzento claro (2,5Y 7/0). Textura arenosa, solto, misturado com matéria orgânica mais escura, muitas raízes finas e médias de pinheiro. pH: 5,5.
A <sub>2</sub> /E	5 - 25	Cor marmoreada: pardo amarelado claro (2,5Y 6/4) e amarelo claro (2,5Y 7/4 e 8/4). Muitas raízes finas e médias e algumas grossas de pinheiro. Húmido, textura arenosa, firme. pH: 4,5.
A <sub>2</sub> /B <sub>s</sub>	25 - 35/40	Pardo oliváceo claro marmoreado (2,5Y 5/4 e 5/6). Textura arenosa. Algumas raízes finas e algumas raízes grossas. pH: 4,5.
B <sub>s</sub>	35 - 65	Pardo oliváceo (2,5Y 4/4) com manchas pardo oliváceo claro (2,5 Y 5/6). Compacto a firme. pH: 4,5.
B/C	65 - 85	Pardo oliváceo claro (2,5Y 5/6). Compacto. Algumas raízes finas a média, diminuindo com a profundidade. pH: 5
R	85 - ....	Rocha parental. Pardo oliváceo claro (2,5Y 5/6). Sem raízes. Presença de galeria, com ≈5 cm de diâmetro, preenchida com areia solta, de cor pardo acinzentado (2,5Y 5/2). pH. 4.

### VI. 6.2 Análises convencionais de solos: parâmetros pedológicos

Para uma melhor caracterização dos perfis de solo, amostras representativas de cada um dos horizontes de perfis selecionados foram analisadas no Laboratório de Solos da Escola Agrária de Coimbra. Foi feita uma análise sumária e foram determinadas as bases de troca. Na análise sumária foram determinados os seguintes parâmetros: Textura de campo, pH, Matéria Orgânica (M.O), Terra Fina, P “assimilável” e K “assimilável”. As bases de troca determinadas foram o Ca, o Mg, o K e o Na. Os resultados são apresentados na tabela VI.13.

Os solos apresentam todos textura média, com mais de 80% de terra fina (fracção < 2 mm). O pH varia entre 4,8 (Ácido) a 8,7 (Alcalino) (fig. VI.38). No perfil 1, os valores do pH variam de 8 a 8,7: trata-se de um solo desenvolvido sobre material calcário, reflectindo a natureza da rocha-mãe (*Formação de Coimbra, Soares et al., 2007*). Os teores de  $Ca^{+}$  e  $Mg^{+}$  são igualmente muito altos neste perfil.

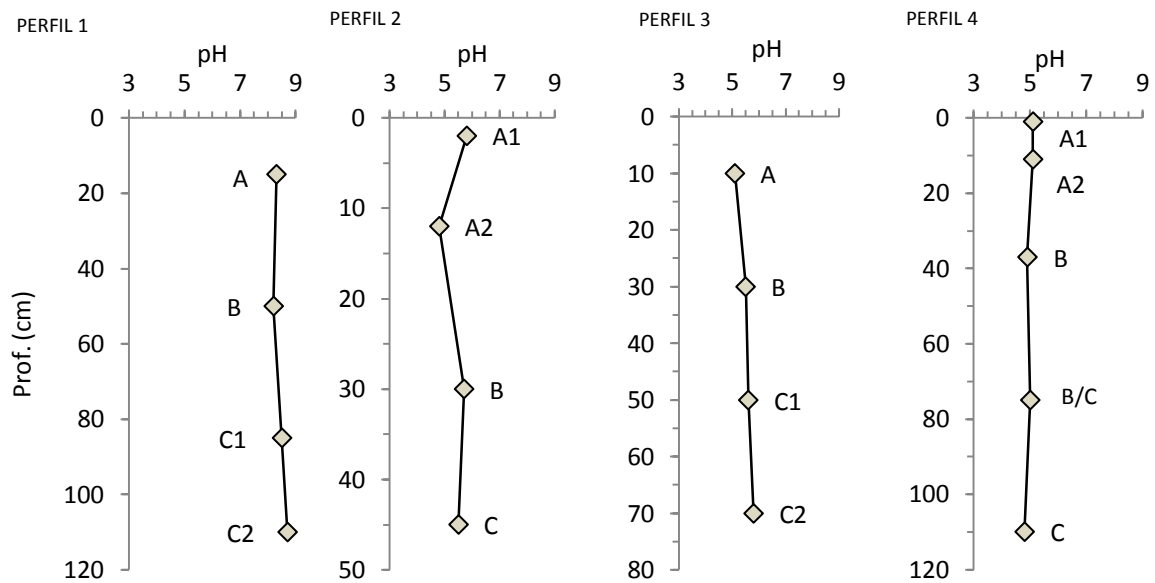


Fig. VI.38 – Valores do pH nos perfis de solo



Tabela VI.13 – Resultados das análises convencionais de solo, para n=18.

Ref. <sup>a</sup>	Textura manual	Terra fina %	M.O. %	pH (H <sub>2</sub> O)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	K <sub>2</sub> O (mg/kg)	K <sup>+</sup> (me/100g)	Na <sup>+</sup> (me/100g)	Ca <sup>+</sup> (me/100g)	Mg <sup>+</sup> (me/100g)								
PERFIL 1																		
P1A	Média	82,91	1,54	B	8,3	PAlc	Vest.	MB	>200	MA	0,88	A	0,04	MB	15,1	A	6,4	MA
P1Bc	Média	100	0,38	MB	8,0	PAlc	Vest.	MB	>200	MA	0,48	M	0,12	B	17,9	A	8,0	MA
P1Bb	Média	82,91	0,69	MB	8,3	PAlc	Vest.	MB	>200	MA	0,49	M	0,09	MB	18,2	A	8,0	MA
P1C1	Média	85,02	0,31	MB	8,5	PAlc	Vest.	MB	87	M	0,19	B	0,04	MB	25,95	MA	4,08	A
P1C2	Média	77,4	0,12	MB	8,7	Alc	Vest.	MB	71	M	0,14	B	0,03	MB	25,52	MA	3,12	A
PERFIL 2																		
P2A1	Ligeira	87,1	8,54	A	5,8	PAc	Vest.	MB	191	A	0,4	M	0,06	MB	11,5	A	2,64	A
P2A2	Média	85,72	1,75	B	4,8	Ac	Vest.	MB	58	M	0,1	MB	0,06	MB	2,45	B	1,12	M
P2B	Média	82,81	1,31	B	5,7	PAc	Vest.	MB	88	M	0,17	B	0,14	B	6,55	M	3,28	A
P2C	Média	86,37	0,62	MB	5,5	Ac	Vest.	MB	41	B	0,07	MB	0,11	B	4,35	B	2,8	A
PERFIL 3																		
P3A	Média	86,31	0,8	MB	5,1	Ac	Vest.	MB	51	M	0,08	MB	0,04	MB	1,33	MB	0,41	MB
P3B	Média	88,79	0,39	MB	5,5	Ac	Vest.	MB	44	B	0,07	MB	0,04	MB	1,49	MB	0,38	MB
P3C1	Média	84,28	0,21	MB	5,6	Pac	Vest.	MB	46	B	0,06	MB	0,06	MB	1,37	MB	0,36	MB
P3C2	Média	88,83	0,28	MB	5,8	Pac	Vest.	MB	54	M	0,08	MB	0,17	B	2,31	B	0,64	B
PERFIL 4																		
P4A1	Média	86,13	1,44	B	5,1	Ac	Vest.	MB	107	A	0,2	B	0,03	MB	2,64	B	0,78	B
P4A2	Média	90,43	0,85	MB	5,1	Ac	Vest.	MB	45	B	0,07	MB	0,03	MB	1,85	MB	0,62	B
P4B	Média	90,2	0,56	MB	4,9	Ac	Vest.	MB	46	B	0,08	MB	0,03	MB	3,02	MB	0,88	B
P4B/ C	Média	91,18	0,43	MB	5,0	Ac	Vest.	MB	22	MB	0,03	MB	0,08	MB	0,6	MB	0,26	MB
P4C	Média	92,62	0,11	MB	4,8	Ac	Vest.	MB	19	MB	0,02	MB	0,02	MB	0,27	MB	0,14	MB

Vest - Vestígios; MB - Muito Baixo; B - Baixo; M - Médio; A - Alto; MA - Muito Alto

Mac - Muito Ácido; Ac - Ácido; PAc - Pouco Ácido; N - Neutro; PAlc - Pouco Alcalino; MAlc - Muito Alcalino

Em todas as amostras de solos analisadas, o fósforo “assimilável” é muito baixo. Em relação ao potássio “assimilável”, apenas nos horizontes A e B, do perfil 1, é muito alto (> 200 mg/kg), variando nos restantes solos, entre muito baixo (no horizonte B/C do perfil 4) a alto, nos horizontes A1 do perfil 2 e perfil 4. Da análise das bases de troca, podemos referir que apenas no horizonte A1, do perfil 1, o K<sup>+</sup> tem teores relativamente elevados, sendo muito baixos nas restantes amostras. O Na<sup>+</sup> tem comportamento semelhante (baixo a muito baixo em praticamente todos os horizontes amostrados). Quanto ao Ca<sup>+</sup> e Mg<sup>+</sup>, com valores acima da média para o perfil 1 (cujo material parental é constituído por calcários dolomíticos), apresentam teores muito baixos no perfil 3 e 4 (trata-se de solos desenvolvidos sobre rochas gresosas). No perfil 2, apresentam também valores elevados, o que pode estar relacionado com a proximidade da *Formação de Coimbra*, conjunto essencialmente calco-dolomítico, subjacente às *Areias Vermelhas de Ingote*. Muitas propriedades importantes do solo dependem da M.O., nomeadamente a retenção e o movimento da água, a adsorção e troca de catiões e a capacidade para o fornecimento de nutrientes às plantas. A

importância M.O. na formação de magnetite/maghemite foi estudada por vários autores (e.g. Le Borgne, 1955; Le Borgne, 1960; Tite e Linington, 1975). Nos solos analisados, a percentagem de matéria orgânica é baixa a muito baixa, diminuindo em profundidade (fig. VI.39) e, apenas no horizonte A1 do perfil 2, apresenta valores na ordem dos 8,54%, (alta). O perfil 3 destaca-se do conjunto por apresentar, em média, valores ainda mais baixos. Fogos florestais ou práticas agrícolas, como a lavoura, podem estar na origem da destruição da M.O. Como se trata de um terreno que já não é cultivado há muitos anos, e porque os fogos florestais que ocorreram na periferia da cidade de Coimbra, em 2005, também atingiram esta área, pensamos ser esta a hipótese mais provável para justificar os valores observados para o teor de matéria orgânica

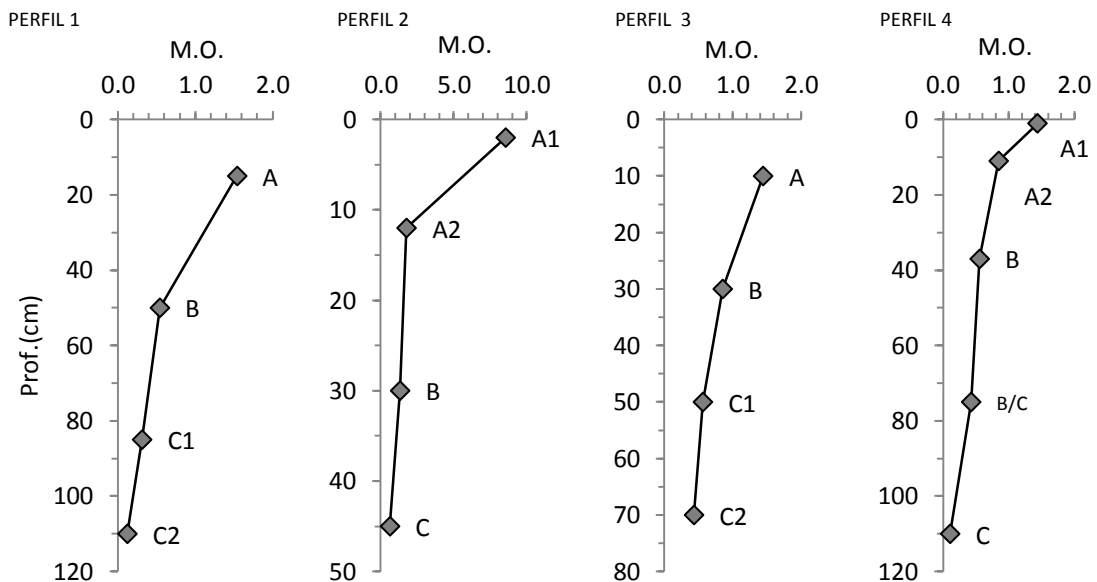


Fig. VI.39 – Teores de M.O. (%) nos perfis de solo

## VI. 6.3 Parâmetros magnéticos nos perfis de solo

### VI. 6.3.1 Susceptibilidade magnética

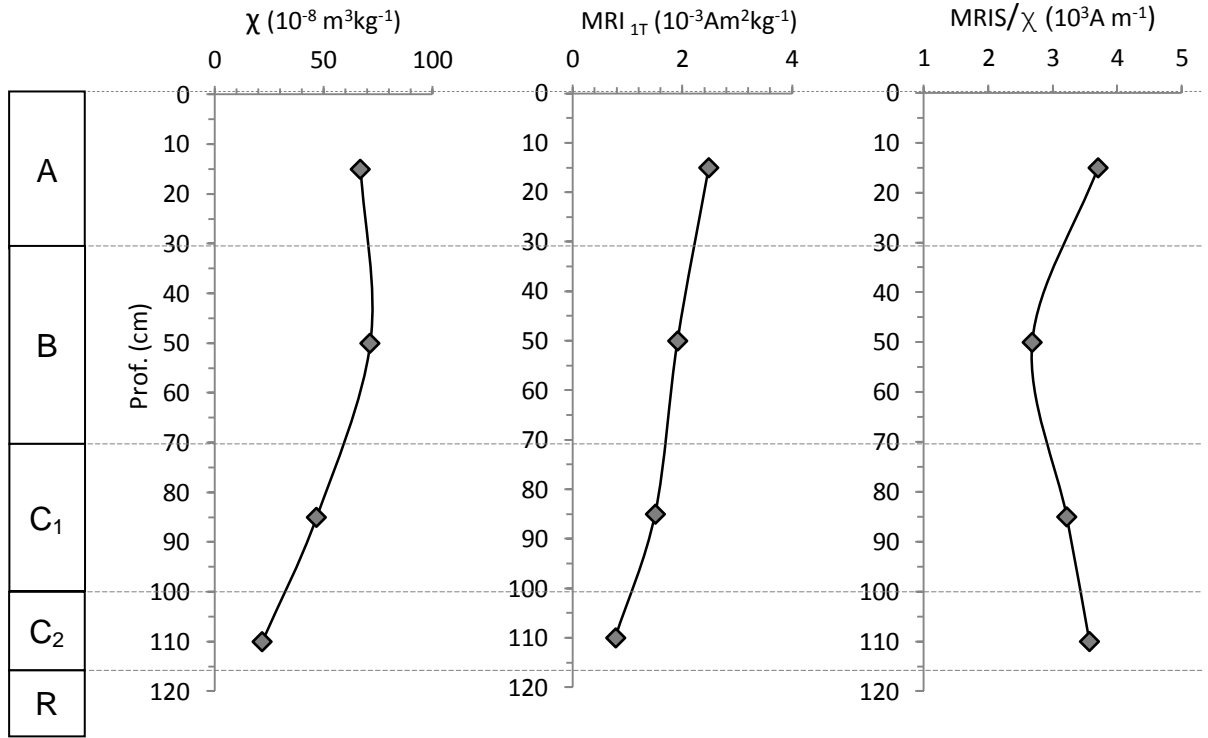
A  $\chi$  apresenta um padrão de variação similar nos perfis 1, 2, 3, e 4 (fig. 40, 41, 42 e 43), com valores mais elevados nos horizontes superficiais e valores mais baixos nos horizontes mais profundos. Este parâmetro pode apresentar valores mais elevados na camada superficial dos solos devido a vários factores, já referidos neste

trabalho (cap. III, secção III.3.1, tab. III.3) e explicados de um modo mais detalhado em Lourenço (2003). Sucintamente, podemos referir que as causas mais comuns para o aumento dos valores da  $\chi$  estão relacionadas com a síntese de magnetite/maghemite (no decurso de processos pedogenéticos ou por sobreaquecimento do solo (fogos florestais, clima), formação de greigite e deposição de cinzas volantes (com origem na queima de combustíveis fósseis). Como as amostras foram colhidas na proximidade de um centro urbano, e com base na observação das imagens SEM, pensamos que a razão dos valores elevados que se observam para a  $\chi$ , nos horizontes superficiais destes perfis, está relacionada com factores antropogénicos (poluição urbana). Os valores mais elevados da  $\chi$  observam-se nos primeiros 10-20 cm do solo. No perfil 5 (figura 44) verifica-se um comportamento diferente, com os valores mais elevados na zona mais profunda do perfil, reflectindo a influência da rocha-mãe. Neste caso, a contribuição litogénica controla o aumento da  $\chi$  em profundidade. O material parental é, em alguns casos, a principal influência no sinal da  $\chi$  (Hanesh e Sholger, 2005). Nas imagens de SEM dos horizontes superficiais do perfil 5 não foi detectada a presença de esférulas (figura VI.28). As amostras colhidas neste perfil exibem valores muito altos para os parâmetros magnéticos em comparação com as restantes perfis (tabela VI.13). Por exemplo, a  $\chi$  tem o valor máximo de  $7,23 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  numa amostra colhida neste perfil. O valor mínimo de  $0,04 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  foi medido numa amostra do perfil 6, que exhibe os valores mais baixos para este parâmetro (figura 45). As diferenças são justificadas pela natureza da rocha-mãe: filitos negros no caso do perfil 5 (*Série Negra*, Soares *et al.*, 2007) e rochas gresosas no caso do perfil 6 (*Grés de Furadouro*, Barbosa *et al.*, 1988 = *Formação de Lousões*, Soares *et al.*, 2007).

No perfil 6, os valores mais elevados da  $\chi$  foram registados a uma profundidade entre os 30 e os 40 cm. Este perfil foi aberto num solo em processo de podzolização (figura VI.37). Este processo pedogenético, que ocorre preferencialmente em regiões temperadas (com superavite de água no Inverno), em solos formados em rochas arenosas e com vegetação ácida, caracteriza-se pela deslocação dos óxidos de ferro e alumínio da parte superior do perfil para as zonas mais profundas. Este arrastamento é potenciado pela pluviosidade e pela elevada porosidade do material. Durante a decomposição da matéria orgânica, esta forma complexos com os óxidos de ferro e alumínio e acaba por migrar para a parte inferior do perfil, onde a acidez é menos acentuada, levando à precipitação dos óxidos, com a conseqüente formação de um horizonte espódico (Bs), na zona de acumulação, na parte mais profunda do perfil.



Perfil 1



Perfil 1

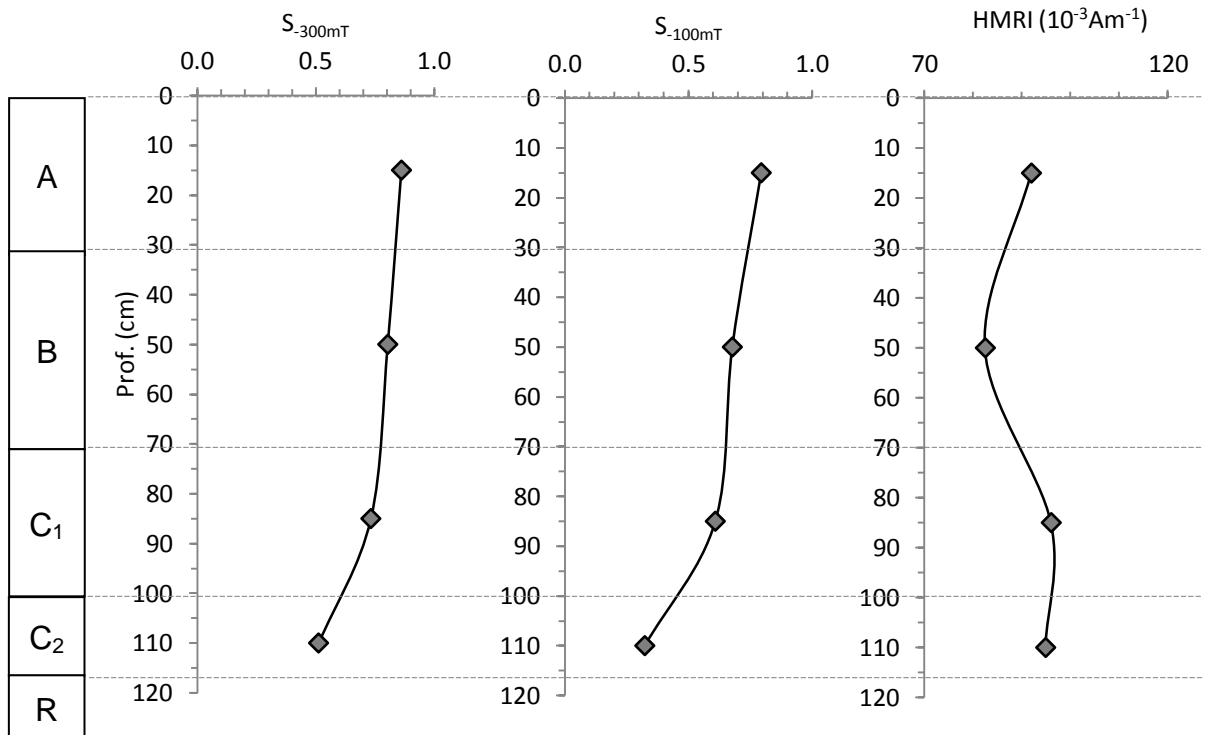
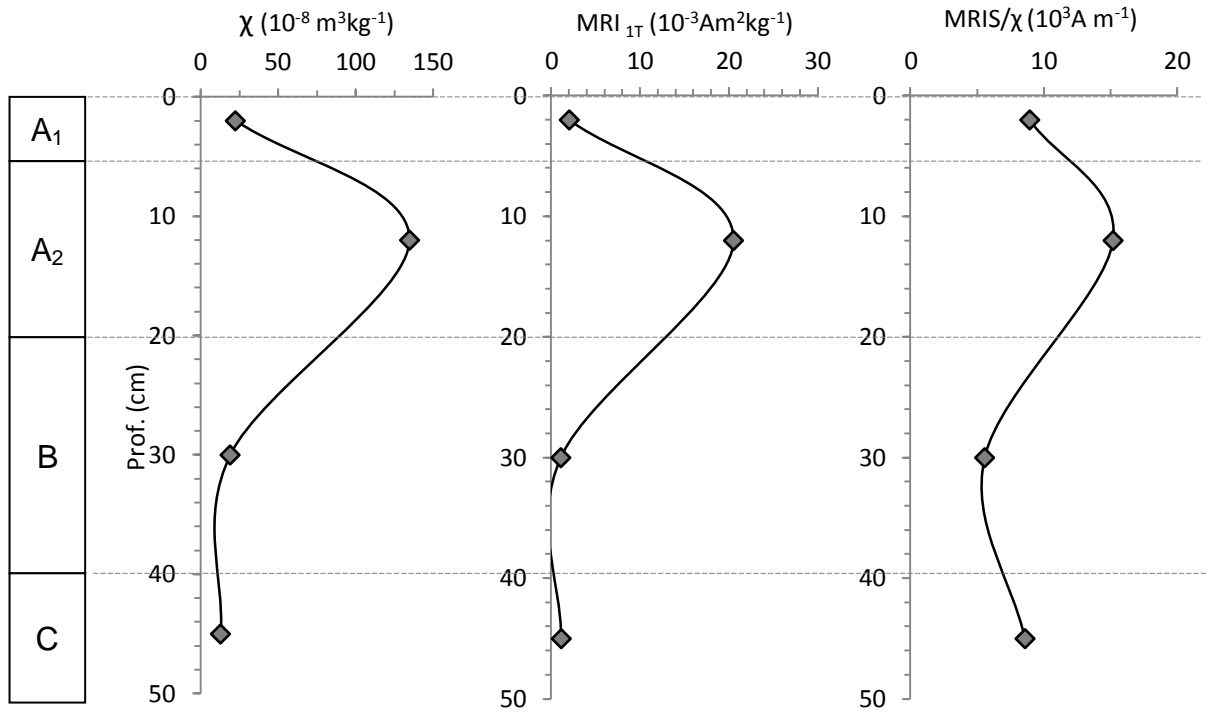


Fig. VI. 40 – Variação dos parâmetros magnéticos no perfil 1.

Perfil 2



Perfil 2

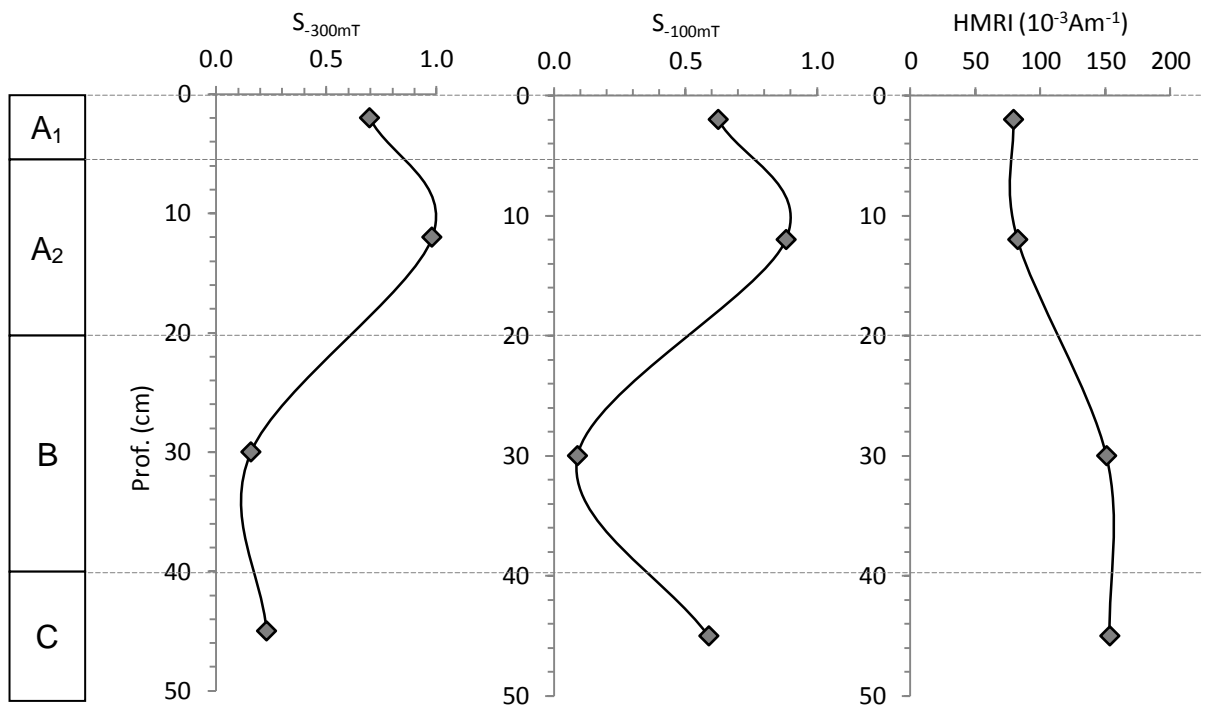
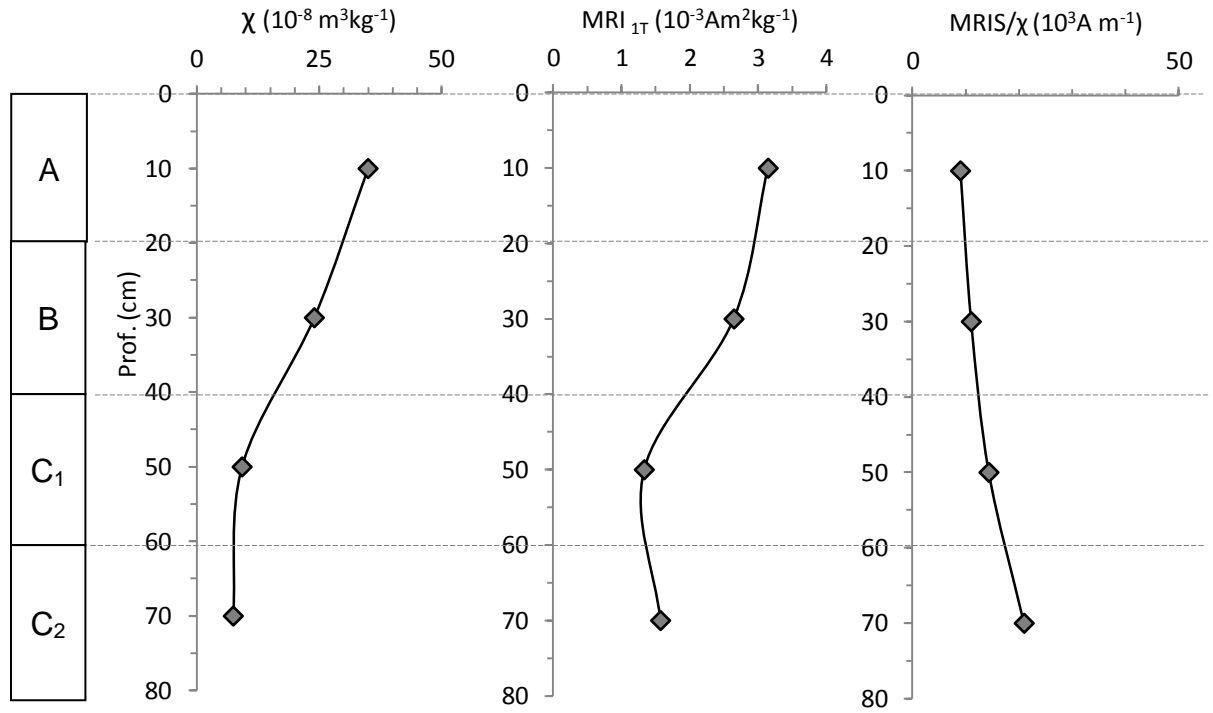


Fig. VI. 41 – Variação dos parâmetros magnéticos no perfil 2.

Perfil 3



Perfil 3

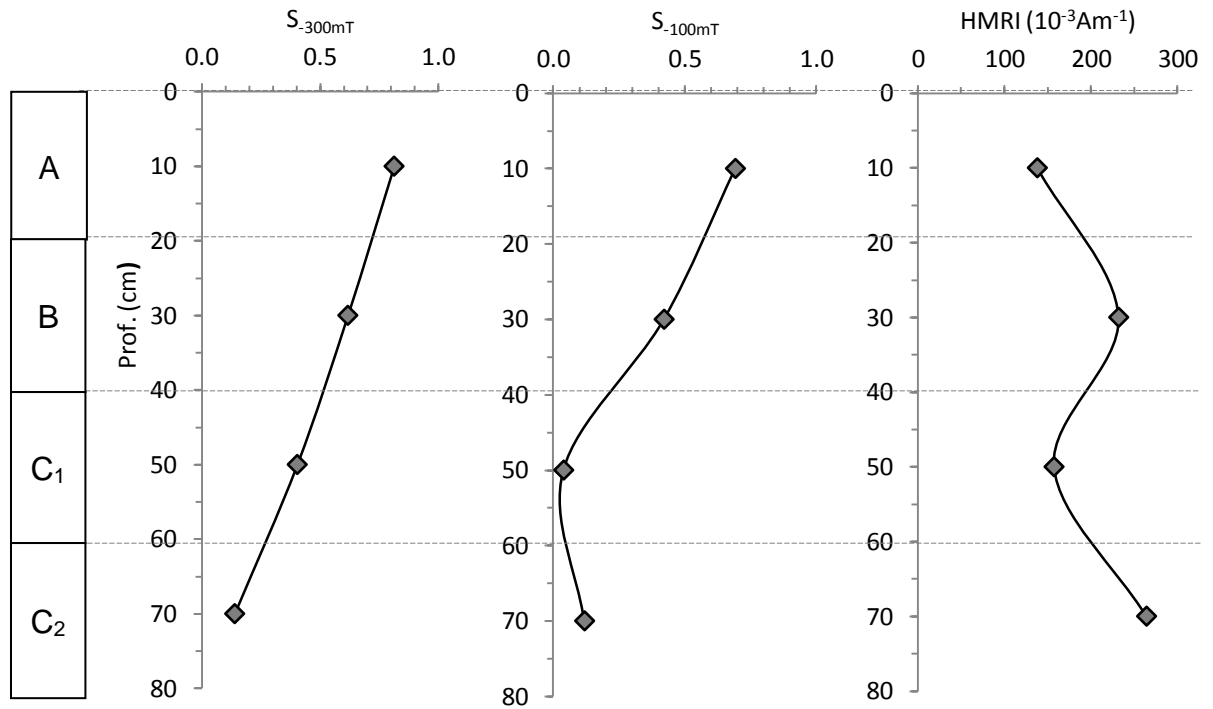


Fig. VI. 42 – Variação dos parâmetros magnéticos no perfil 3.

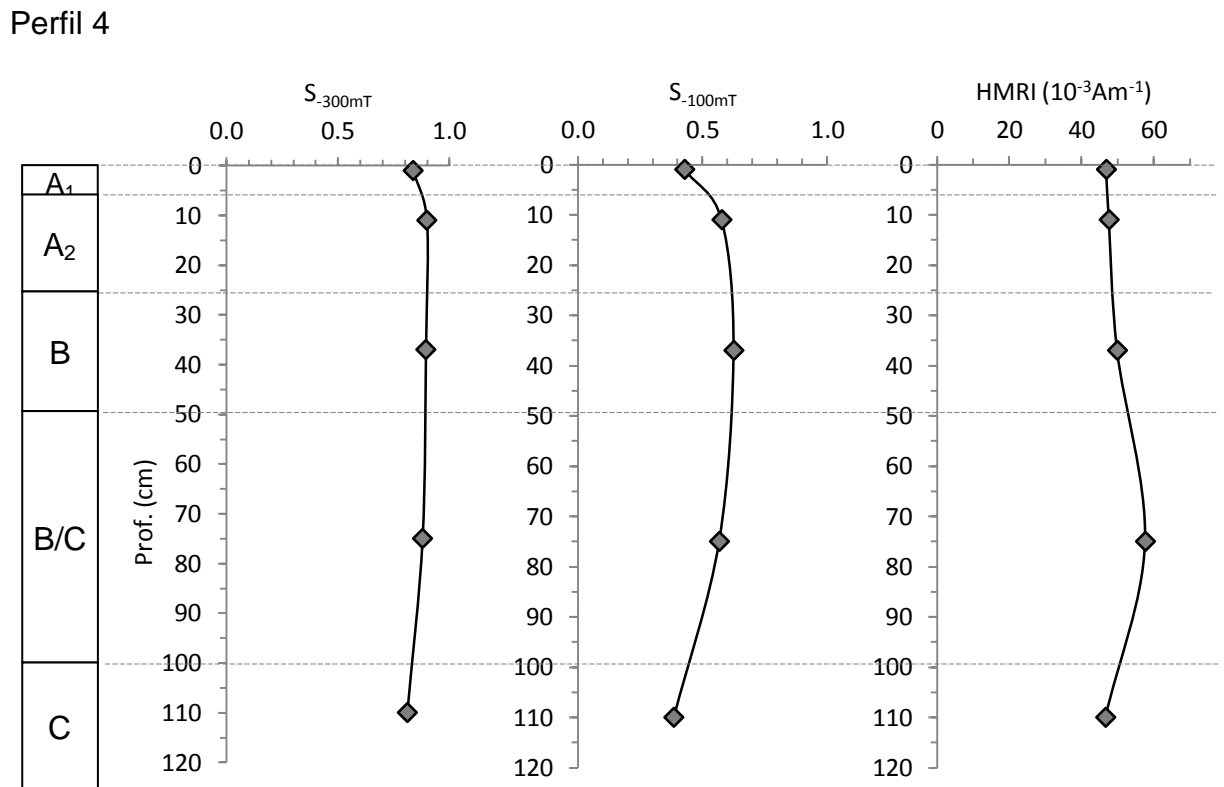
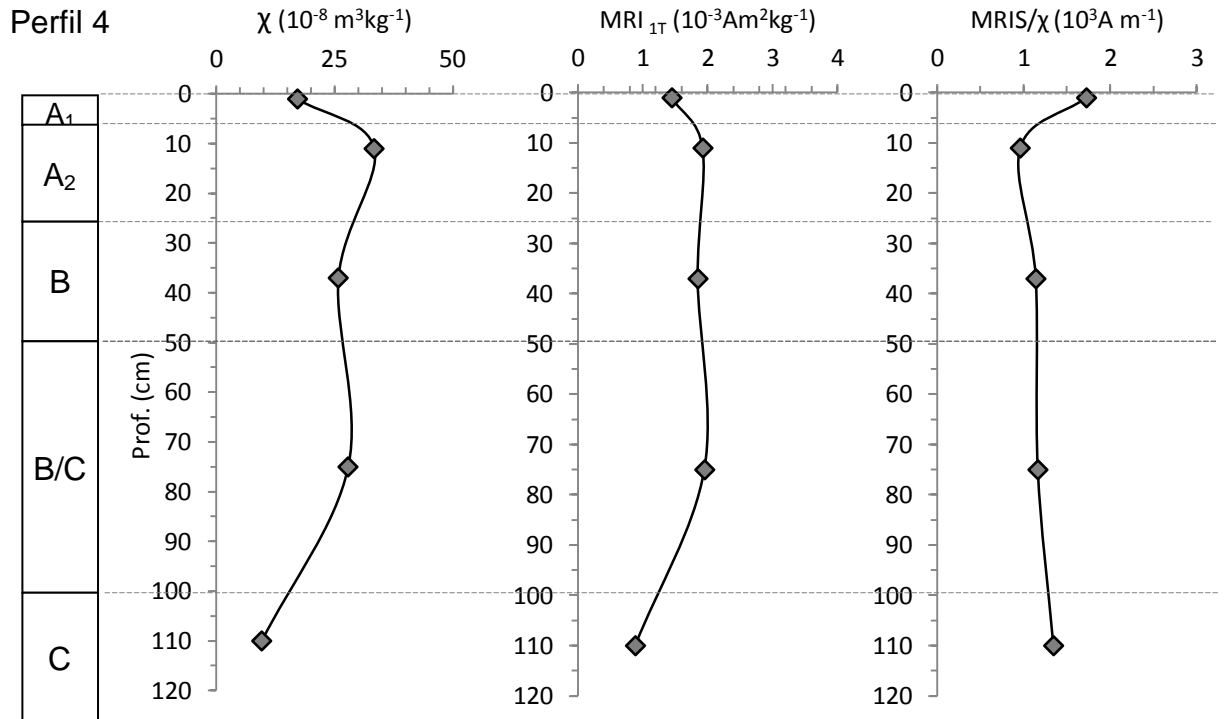


Fig. VI. 43 – Variação dos parâmetros magnéticos no perfil 4.

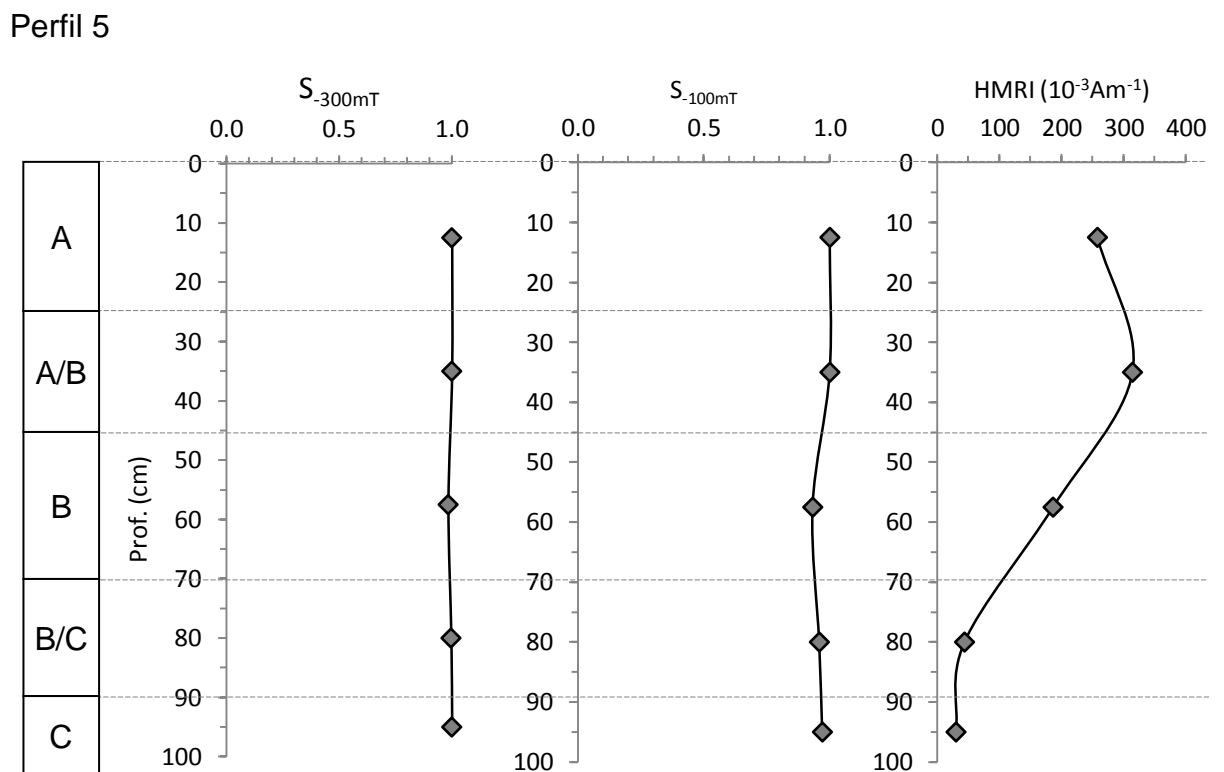
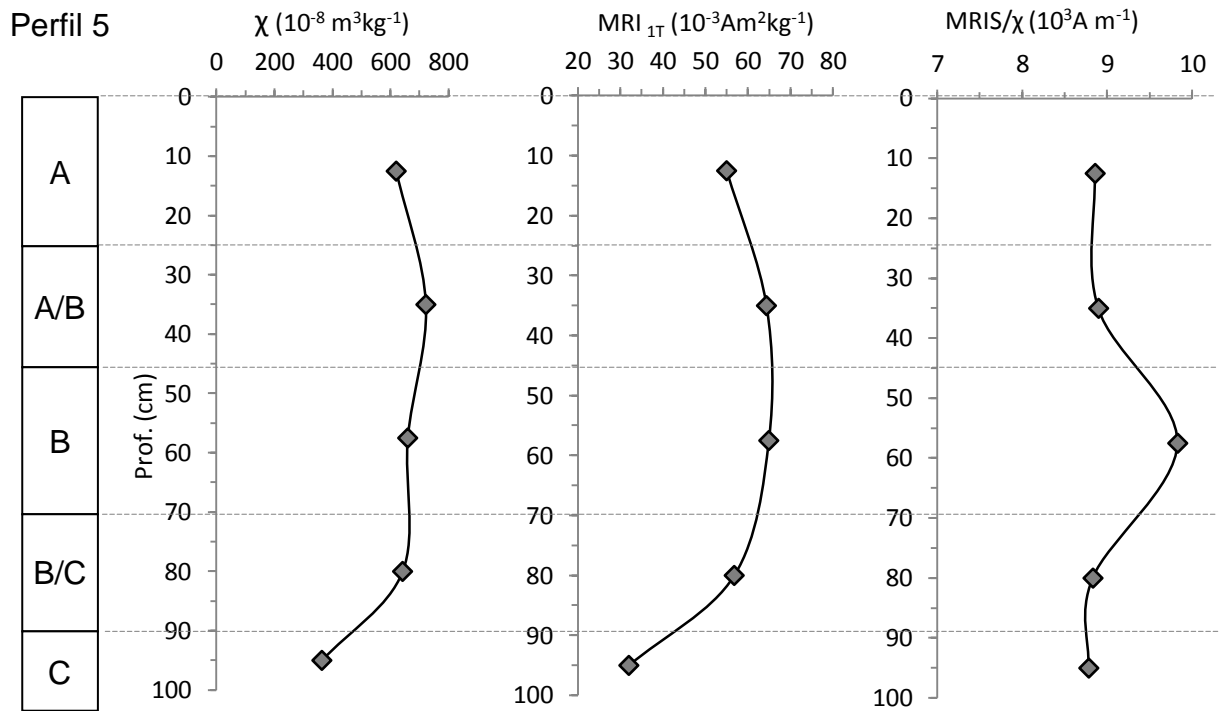


Fig. VI. 44 – Variação dos parâmetros magnéticos no perfil 5.

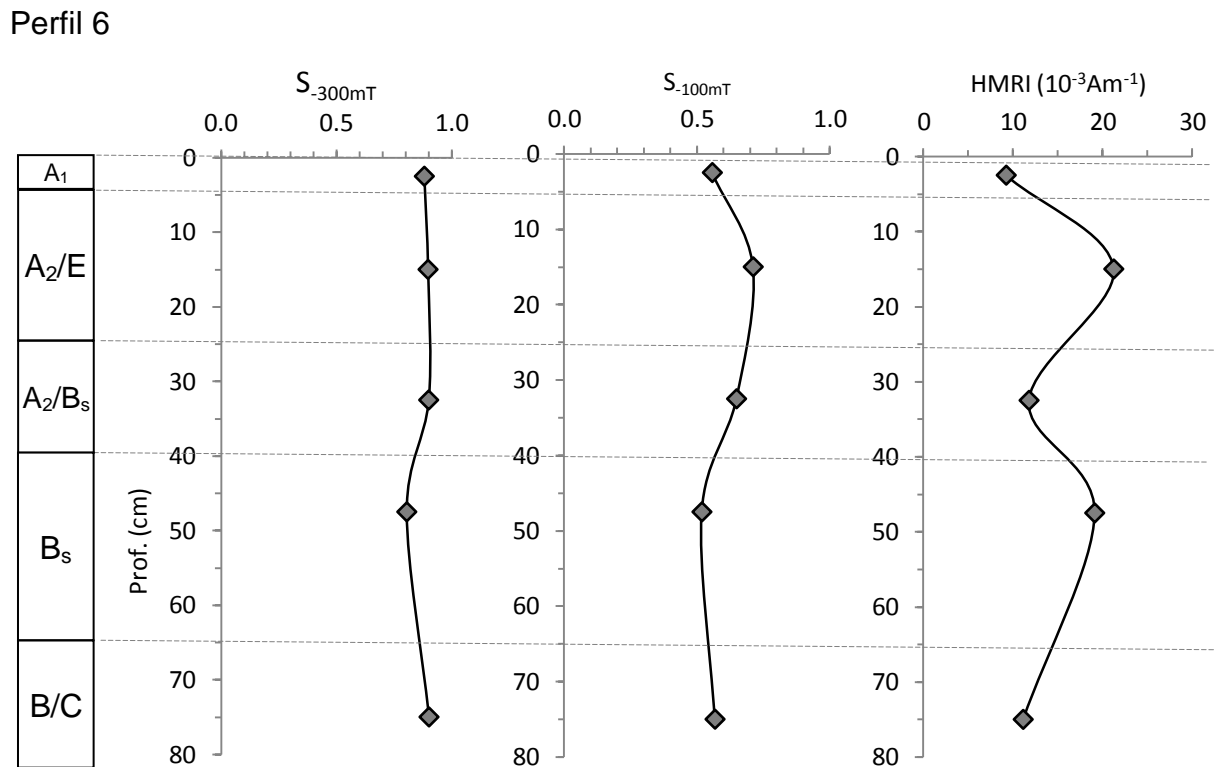
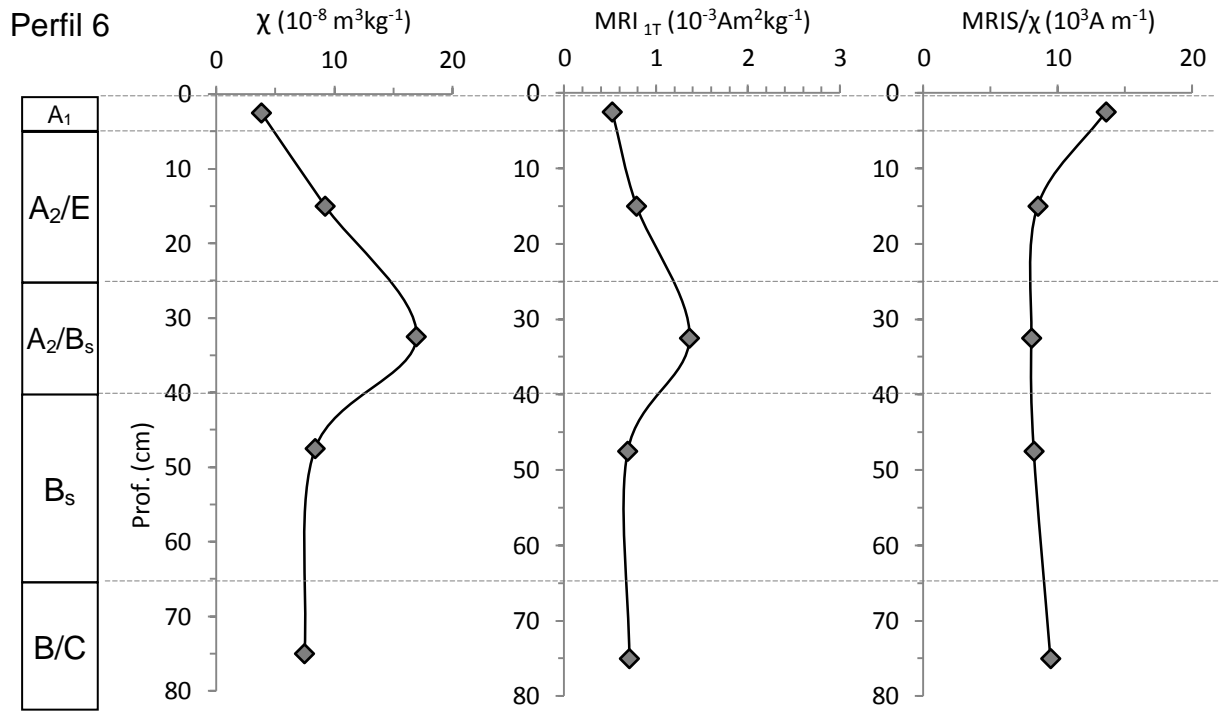


Fig. VI. 45 – Variação dos parâmetros magnéticos no perfil 6.



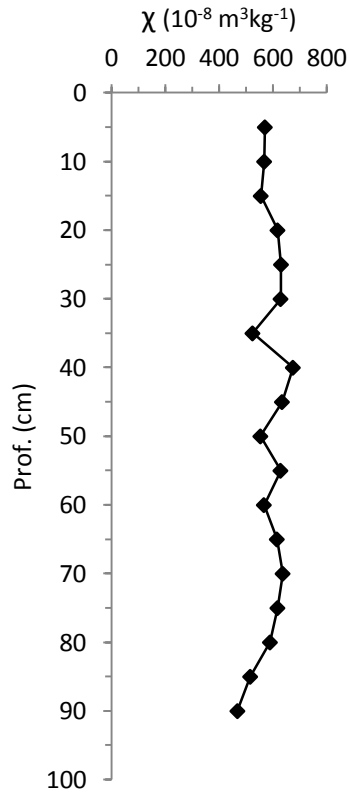


Fig. VI. 46 – Variação da  $\chi$  no perfil 5 (amostragem de pormenor).

Tabela VI.13 – Valores médios dos parâmetros magnéticos nos perfis de solo.

Perfil	K ( $10^{-6}$ SI)	$\chi$ ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ )	MRI/ $\chi$ ( $\text{KAm}^{-1}$ )	S <sub>-100</sub>	S <sub>-300</sub>	HMRI ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )
1	338,53	55,51	856,86	1,72	4,31	0,62	0,74	89,61
2	215,53	47,36	2343,99	6,17	9,57	0,55	0,52	116,54
3	104,43	18,96	957,08	2,17	13,82	0,32	0,49	197,80
4	136,09	22,76	784,71	1,61	7,52	0,52	0,86	49,73
5	2879,11	601,81	21226,32	54,55	9,04	0,97	1,00	166,57
6	33,08	8,98	240,51	0,80	9,51	0,59	0,87	14,85

Mais acima, no perfil, forma-se um horizonte álbico (de cor clara), resultante do empobrecimento em óxidos. Neste perfil, este processo encontra-se ainda numa fase inicial, não se tendo observado o horizonte típico de um podzol com a presença de surraipa (crosta ferruginosa) bem desenvolvida. De acordo com Maher (1998), estes solos apresentam no geral valores muito baixos para a  $\chi$ : os valores mais elevados deste parâmetro, bem como os da MRIs ocorrem associados ao horizonte B espódico (situação reportada também por Kapička *et al.* 2003).

---

### VI.6.3.2 MRI, quocientes S e HMRI

A MRI<sub>1T</sub> apresenta uma variação, em profundidade, idêntica à da  $\chi$  em todos os perfis. Relativamente aos quocientes S, estes decrescem em profundidade, de um modo regular nos perfis 1, 2 e 3 e mantêm-se praticamente constantes nos perfis 4, 5 e 6. No perfil 3, os valores dos quocientes S são  $\approx < 0.5$ , na zona mais profunda, o que reflecte uma contribuição antiferromagnética predominante nestes horizontes. Este perfil foi aberto num local cujo substrato geológico é constituído por rochas gresosas (*Formação de Castelo Viegas, Grupo de Silves, Soares et al., 2007*). A hematite é o mineral de ferro dominante ou, por vezes, exclusivo, nas “red-beds”, sendo o principal responsável pelas propriedades magnéticas destes sedimentos (Collinson, 1983) e pela cor vermelha típica, à semelhança do que acontece no Grupo de Silves (Gomes, 1996). No perfil 1, os quocientes S apresentam igualmente valores  $< 0.5$  nas amostras colhidas na parte mais profunda do perfil. De acordo com Lecoanet *et al.* (2003), os valores baixos para estes quocientes podem dever-se, também, a uma quantidade muito pequena de material magnético, razão que também consideramos ser a mais plausível para o presente caso, tendo em conta que o material parental deste perfil é constituído por rochas carbonatadas (*Formação de Coimbra, Soares et al., 2007*). No perfil 2, estes quocientes também apresentam valores baixos pela mesma razão. No perfil 6, são comuns valores  $\approx 0.5$  para o quociente S<sub>100</sub>, mas próximos de 1 para o quociente S<sub>300</sub>. Esta diferença está relacionada com o tipo de magnetite presente. Embora esta seja o mineral predominante, trata-se de magnetite do tipo “hard”, ou seja, exibe um comportamento mais duro.

A HMRI baseia-se na quantidade de magnetização que uma amostra saturada mantém, depois de sujeita a um campo inverso de 300 mT, e é aproximadamente proporcional à concentração de minerais antiferromagnéticos imperfeitos (*e.g.* Walden e Ballantyne, 2002). As amostras colhidas nos perfis 3 e 5 exibem os valores mais elevados para este parâmetro o que indica um comportamento magneticamente mais duro (“harder”), devido a uma maior concentração de minerais de alta coercividade (hematite/goethite).

### VI.6.3.3 Relação magnetização remanescente isotérmica - susceptibilidade

A relação  $MRIs/\chi$  (tabela VI.13) é comumente utilizada para obter informação sobre a granulometria das partículas magnéticas (e.g. Lecoanet *et al.*, 2003). Esta relação depende da granulometria e da composição das partículas.

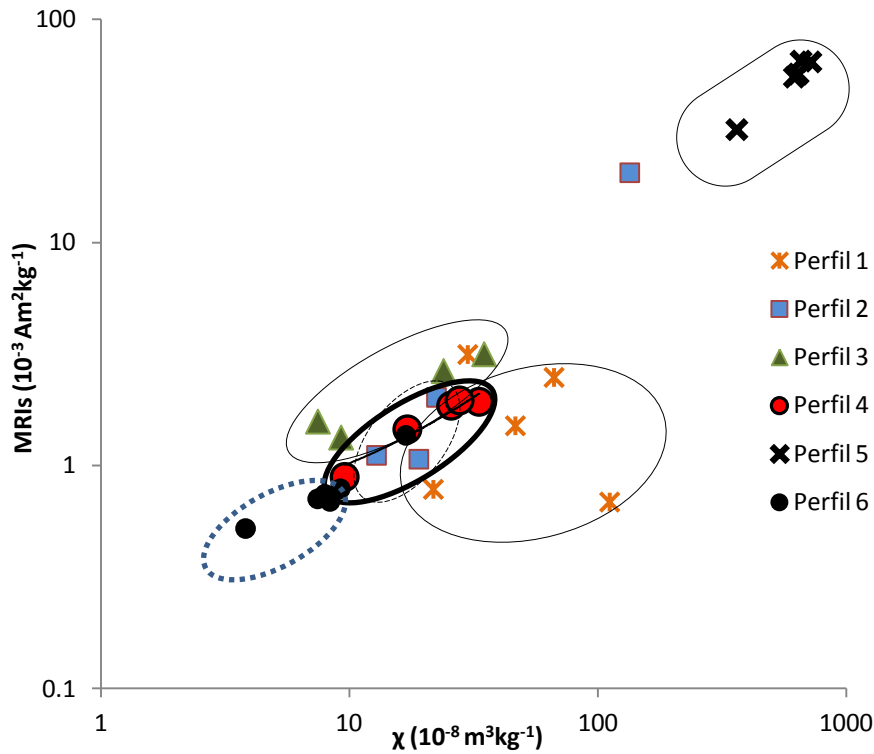


Fig. VI.47 – Variação da MRIs em função da  $\chi$ .

Os valores médios de  $MRIs/\chi$  para os solos analisados, com exceção do perfil 3, são inferiores aos que Hay *et al.* (1997) registou para solos poluídos ( $12,5 \text{ kAm}^{-1}$ ). Estes valores mantêm uma certa uniformidade ao longo dos perfis o que, de acordo com Chaparro *et al.* (2003), resulta da predominância de um mineral magnético comum (magnetite). De acordo com Wang *et al.* (2009), os valores da razão  $MRIs/\chi < 20 \text{ kAm}^{-1}$ , não reflectem a formação de greigite. No perfil 3, registaram-se valores médios de  $13,8 \text{ kAm}^{-1}$  que Moreno *et al.* (2003) interpretaram como sendo devidos a grãos de magnetite multidomínio (MD), comuns em cinzas volantes de origem industrial. Esta não nos parece ser a origem destas partículas, uma vez que este perfil foi aberto numa zona florestal (Mata do Mosteiro de S. Jorge de Milréu) (figura VI.34). De acordo com Dearing (1999), a magnetite de origem primária pode ser composta por

grãos multi-domínio. Hanesh e Petersen (1999) assinalaram a presença de partículas MD de magnetite nos horizontes B e C de um cambissolo, excluindo-se, neste caso, outra origem que não a primária. Nos perfis 2, 5 e 6, os valores da razão  $MRI/\chi$  aproximam-se dos 10 kAm<sup>-1</sup>. De acordo com Thompson e Oldfield (1986), estes valores são característicos de partículas de magnetite com granulometrias na ordem dos 5  $\mu\text{m}$  (os autores basearam-se num estudo que envolveu cerca de 1000 amostras naturais).

No gráfico da figura VI.47, é possível discriminar os grupos de amostras colhidas nos diferentes perfis, e é também visível a correspondência entre a MRI e a  $\chi$ , bem como o facto das amostras do perfil 5 se destacarem das restantes. Estas amostras, que aparecem projectadas na parte superior direita do gráfico, exibem valores elevados para a  $\chi$  e a MRI, o que se deve provavelmente à contribuição litogénica; não é provável que a deposição de partículas de origem antrópica seja responsável por esses valores, dada a localização do perfil e, também, ao facto de não se ter detectado esse tipo de partículas nas análises de SEM. As amostras do perfil 6, na parte inferior esquerda do gráfico, caracterizam-se por valores baixos da MRI e  $\chi$ , o que se deve provavelmente ao conteúdo paramagnético predominante, estando de acordo com observações semelhantes feitas por Lecoanet *et al.* (2003).

#### **VI.6.3.4 Relação entre parâmetros pedológicos e parâmetros magnéticos**

Esta relação foi analisada por autores como Maher (1998), Hanesh *et al.* (2005) e Jordanova *et al.* (2010), mas nem sempre se registaram correlações positivas e significativas entre estes dois tipos de parâmetros.

Os parâmetros magnéticos, que apresentam correlações significativas com os parâmetros pedológicos, são os quocientes S (com a M.O. e com o K<sup>+</sup>) e a HMRI (com o Na<sup>+</sup>) (tabela VI.14). O quociente  $S_{300}$  apresenta uma correlação negativa e significativa com o pH (95% de probabilidade). A  $\chi$  e a MRI apresentam correlação baixa (não significativa), mas positiva, com a M.O. e com algumas bases de troca, à semelhança do observado por Maher (1998), para amostras de solos colhidas em perfis de cambissolos. A autora também registou correlações positivas entre a  $\chi$  e MRI com a capacidade de troca catiónica, em podzois. No entanto, apesar da fraca correlação, a M.O. e a  $\chi$  têm uma variação idêntica ao longo dos perfis de solo, com os valores mais elevados nos horizontes mais superficiais e decrescendo em profundidade (figura VI.48), verificando-se uma correspondência elevada entre estes dois parâmetros no perfil 3. De acordo com Chaparro *et al.* (2002), muitos autores relacionam o aumento da susceptibilidade com a quantidade de matéria orgânica no

solo. O principal papel da M.O. parece ser o de fornecer o substrato para os microorganismos heterotróficos, que criam as condições redutoras necessárias para retirar o ferro em solução, em primeiro lugar. A intensidade e a persistência dessas condições redutoras, são função da quantidade e do tipo de matéria orgânica e microorganismos associados, bem como da temperatura do solo e do regime de água.

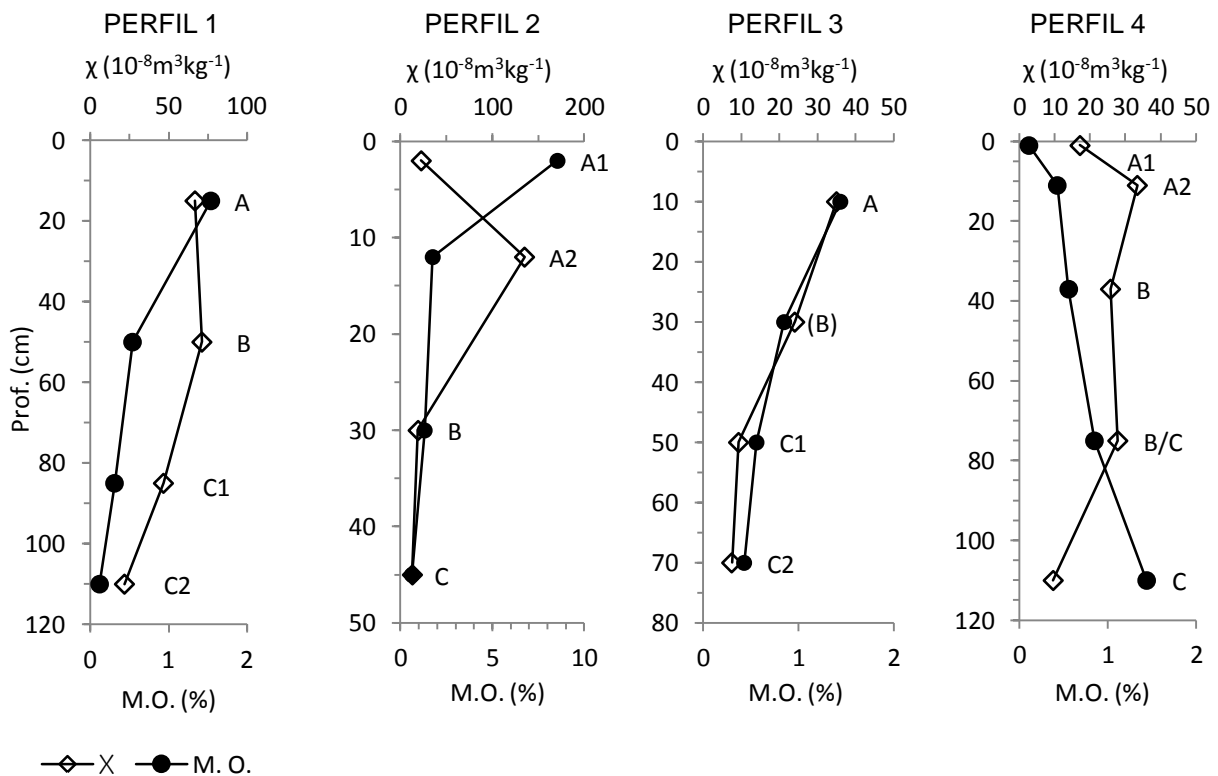
Tabela VI.14 – Coeficientes de correlação entre as análises de solo convencionais e as análises magnéticas, para n=18.

		$\chi$ ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ )	HMRI ( $10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ )	S <sub>100</sub>	S <sub>300</sub>
Correlação de Spearman	M.O.	0,453	0,406	-0,263	0,525*	0,393
	pH	0,088	-0,264	0,286	-0,058	-0,496*
	K <sub>2</sub> O	0,097	0,004	0,038	0,071	-0,138
	K <sup>+</sup>	0,455	0,074	-0,156	0,469*	0,059
	Na <sup>+</sup>	-0,069	0,055	0,505*	-0,045	-0,448
	Ca <sup>+</sup>	0,319	-0,226	-0,036	0,286	-0,162
	Mg <sup>+</sup>	0,427	-0,109	-0,023	0,419	-0,081

\*. Correlação significativa para o nível 0,05

\*\*. Correlação significativa para o nível 0,01

Fig. VI.48 – Variação em profundidade da  $\chi$  e da M.O.



#### VI. 6. 4 Variação em profundidade do teor em metais pesados

As figuras VI.49, VI.50 e VI.51 mostram a distribuição vertical do teor em metais pesados em três perfis seleccionados. No perfil 1 (situado em zona urbana) é visível o aumento, nos horizontes A e B relativamente ao horizonte C, do teor de todos os metais pesados. Este aumento está relacionado com as actividades antrópicas/poluição urbana, o que está de acordo com as observações de Blaha *et al.* (2008). O aumento do teor em metais pesados, nos horizontes superficiais do perfil 1, está claramente relacionado com o aumento dos valores da  $\chi$  (figura VI.52 a)), evidenciando assim a forte associação dos metais pesados com os óxidos de ferro ferrimagnéticos, de origem antrópica. Na imagem de SEM, da amostra colhida no horizonte A deste perfil, eram visíveis numerosas partículas de forma esférica (figura VI.22 b)). As amostras colhidas nos horizontes A e B deste perfil exibem os teores mais elevados para o As, Cd e Zn, relativamente a todo o conjunto de amostras que foram sujeitas a análise química. No caso do Zn e As, o teor encontrado nestas amostras ( $165 \text{ mgkg}^{-1}$ , para o As, e  $543 \text{ mgkg}^{-1}$  para o Zn, no horizonte A) excede os AV's ("Action Values") estabelecidos por Inácio *et al.* (2008) (tabela VI.6). Os restantes metais pesados exibem também valores muito elevados nestas amostras; no caso do Pb ( $150 \text{ mgkg}^{-1}$  no horizonte A), o teor observado só é excedido pela amostra 93 e no caso do Ni ( $53,8 \text{ mgkg}^{-1}$  no horizonte A), apenas a amostra 48 apresenta valores mais elevados. No perfil 2, aberto numa zona mais afastada do centro urbano (Planalto de S.<sup>ta</sup> Clara), também se verificam valores mais elevados para os teores em metais pesados nos horizontes superficiais (figura VI.50 e 52 b)), mas o aumento, em relação aos horizontes mais profundos, é mais atenuado, relativamente ao observado no perfil 1. As amostras, colhidas nos horizontes superficiais deste perfil, continham um número muito reduzido de partículas esféricas, de acordo com a análise das imagens de SEM (figuras VI.24 c) e VI.27 b)). No perfil 3 (Mata do Mosteiro de S. Jorge de Milréu), verifica-se que o teor nos diversos metais analisados é sensivelmente constante ao longo do perfil (figura VI.51 e VI.53), excluindo-se, neste caso, uma influência pronunciada da poluição urbana, e podendo este considerar-se como um solo "limpo". Os valores mais baixos, obtidos para os teores dos diferentes metais pesados, pertencem a este conjunto de amostras. Este solo poderá, eventualmente, servir como referência para considerações sobre o background magnético e químico em estudos futuros, nesta área.

No gráfico da figura VI.54, pode analisar-se a variação da  $\chi$  e do teor em metais pesados, para os 3 perfis atrás referidos, em função da distância ao centro da cidade, tendo sido escolhido como ponto de referência a Universidade de Coimbra



---

(Polo 1). Para a execução do gráfico, foram considerados os valores médios da  $\chi$  e do teor em metais pesados, para cada conjunto de amostras colhidas em cada um dos perfis. Estes valores diminuem em função da distância ao centro urbano. Estas observações estão de acordo com Lu *et al.* (2008), em que verificou que as concentrações em metais pesados e os valores da susceptibilidade, para amostras colhidas em perfis, variavam significativamente ao longo da transição de um meio urbano para um meio rural (“gradiente urbano-rural”), com os valores mais elevados nas áreas urbanas e diminuindo com a distância a essas áreas.

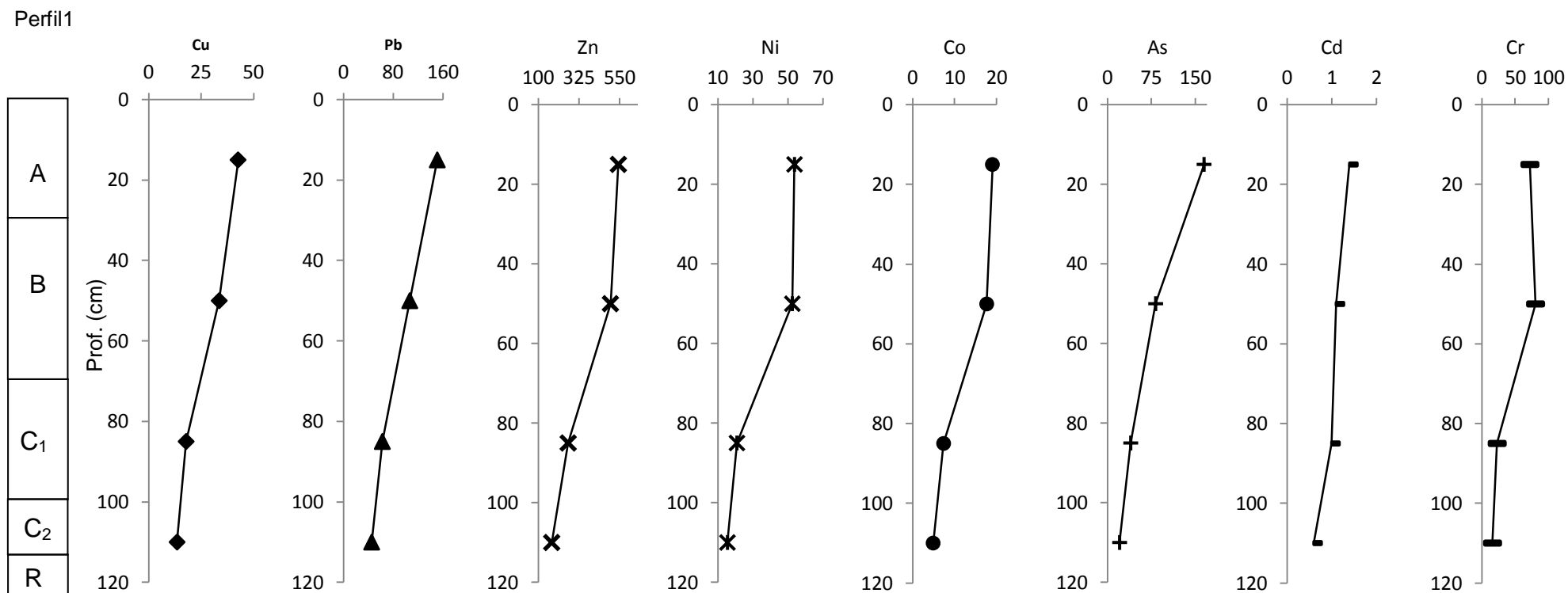


Fig. VI.49 – Variação do teor em metais pesados (mgkg<sup>-1</sup>) no perfil 1.

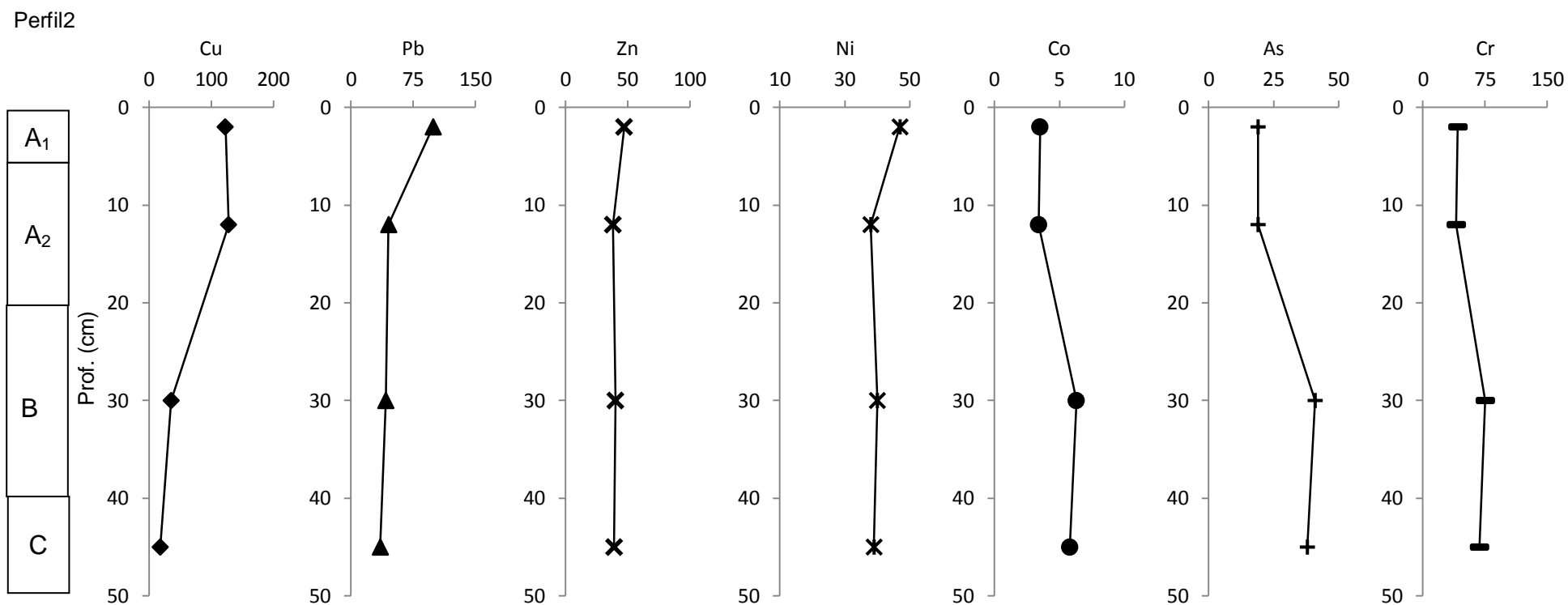


Fig. VI.50 – Variação do teor em metais pesados ( $\text{mgkg}^{-1}$ ) no perfil 2.

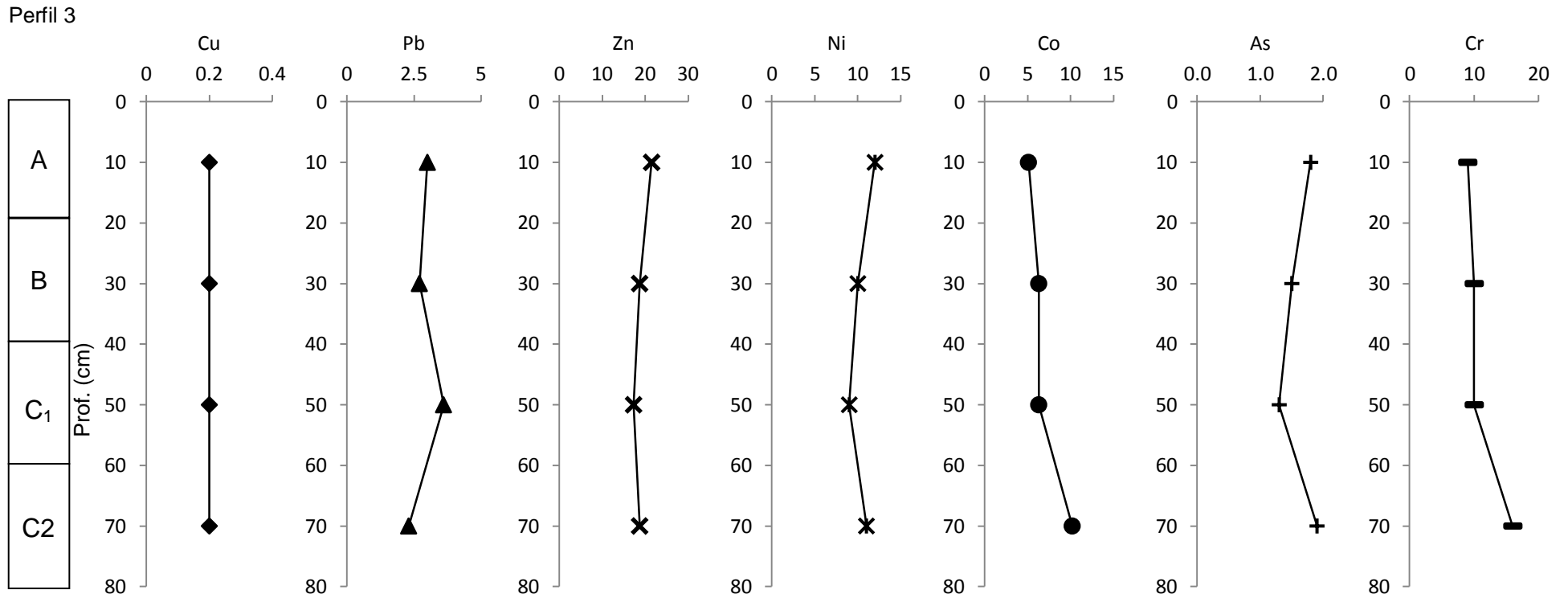


Fig. VI.51 – Variação do teor em metais pesados (mgkg<sup>-1</sup>) no perfil 3.

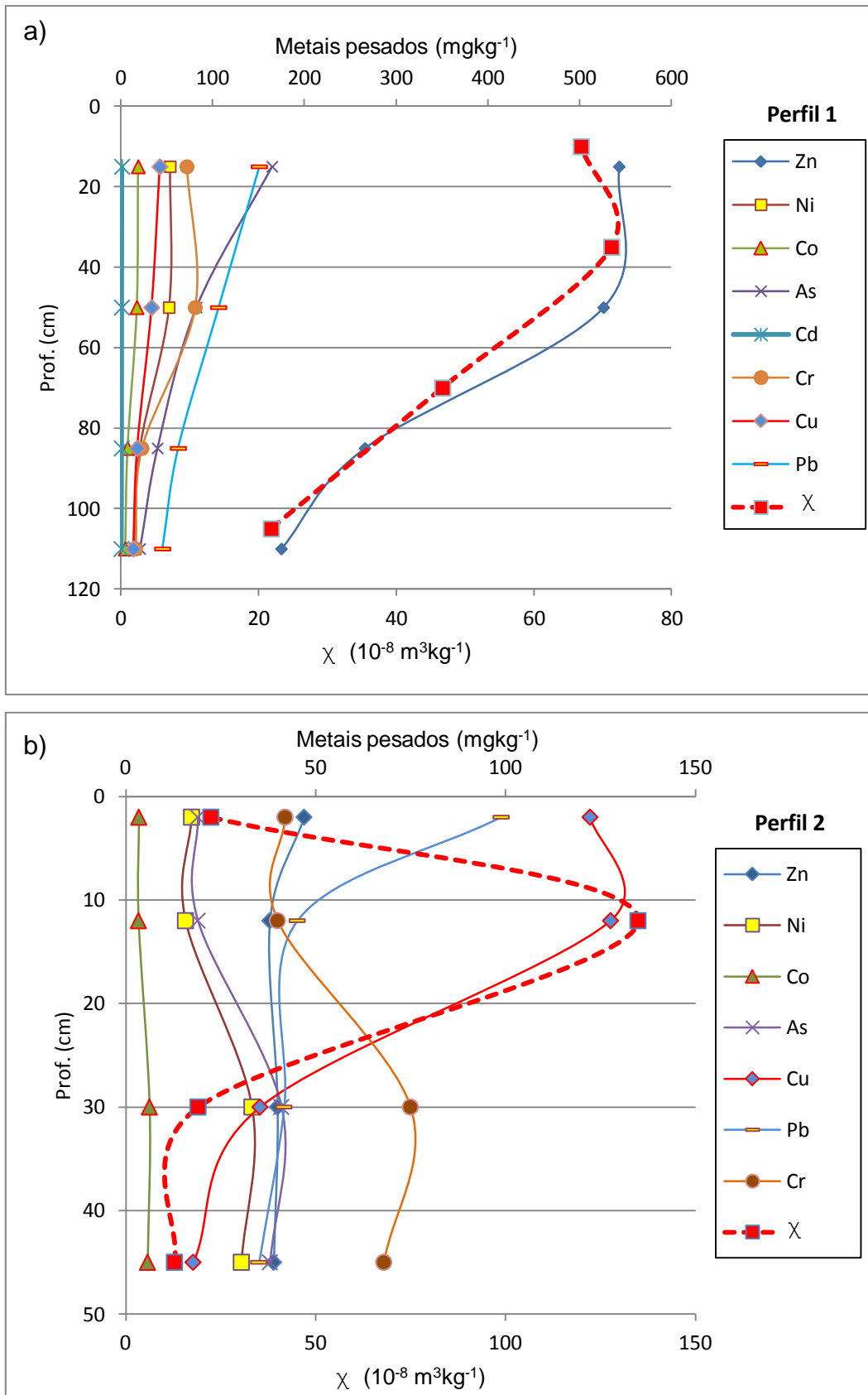


Fig. VI.52 – Variação da  $\chi$  e dos teores em metais pesados no perfil 1 a) e 2 b).

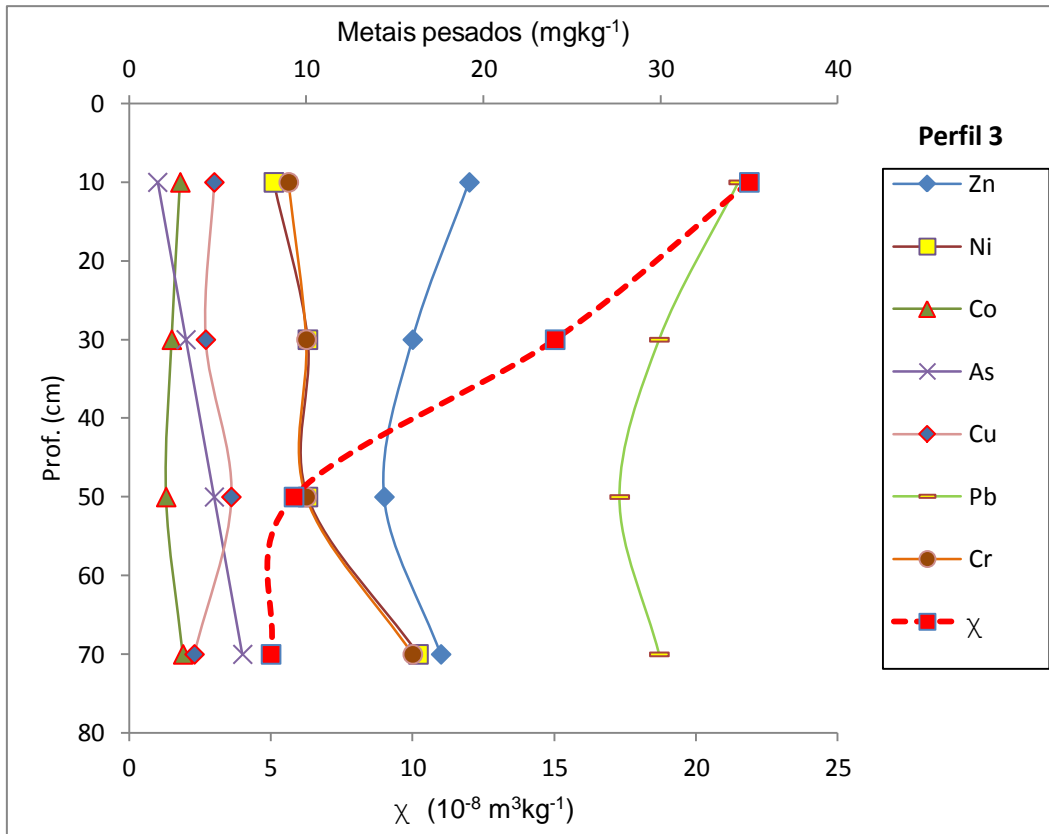


Fig. VI.53 – Variação da  $\chi$  e dos teores em metais pesados no perfil 3.

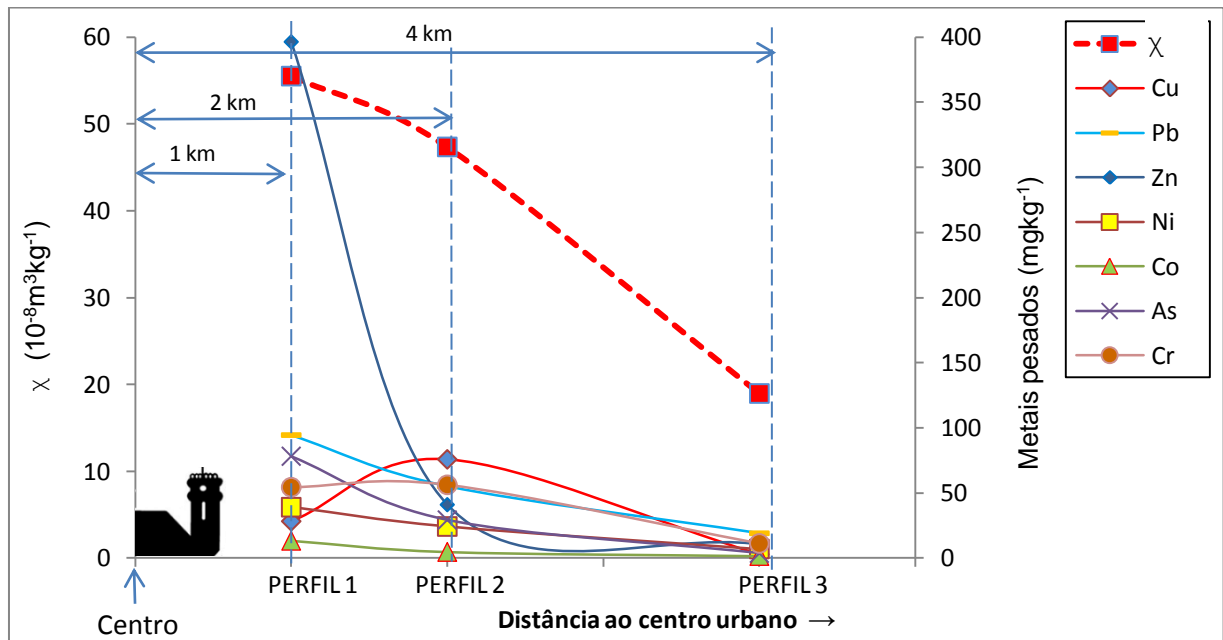


Fig. VI.54 – Variação da  $\chi$  e metais pesados (valores médios), nos perfis de solo, em função da distância ao centro urbano.



**Capítulo VII**  
**CONCLUSÕES**

## VII. CONCLUSÕES

No presente trabalho estabeleceu-se como objectivo principal caracterizar os solos numa área com cerca de 400 km<sup>2</sup> entre a cidade de Coimbra e a vila de Montemor-o-Velho quanto às suas propriedades magnéticas, mineralógicas, geoquímicas e pedológicas. Para tal, foram colhidas 213 amostras, à superfície (em malha quadrada e outros locais seleccionados) e em profundidade, através da abertura de perfis de solo. Estas amostras foram sujeitas a análises magnéticas, químicas, mineralógicas e de microscopia electrónica de varrimento. Os resultados do conjunto de análises foram interpretados e correlacionados entre si, de modo a caracterizar os solos e a obter informação sobre as fontes de poluição na área de estudo e sua área de influência, quer superficialmente, quer em profundidade.

As propriedades magnéticas das amostras de solo foram estudadas a partir da medição da sua susceptibilidade magnética, magnetização remanescente natural e da magnetização remanescente isotérmica. Com base nestas medições, calcularam-se o parâmetro HMRI e os coeficientes S e L.

A susceptibilidade magnética apresentou valores entre  $0,04 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$  e  $12,49 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ , semelhantes aos encontrados por Hanesh e Sholger (2002). Esta é uma variação ampla, que pode estar relacionada com diferenças no substrato geológico, nos tipos de solos e na contribuição antrópica de material ferrimagnético. Os valores mais elevados, para este parâmetro, foram observados na proximidade dos centros urbanos, vias de comunicação e de uma unidade fabril. As amostras que foram colhidas na proximidade de estaleiros de obras de construção civil também revelaram valores elevados. Em áreas florestais, afastadas dos centros urbanos e de vias de comunicação obtiveram-se os valores mais baixos para a  $\chi$ .

A variação da  $\chi$  em função do tipo de solo foi também analisada. Verificou-se que os valores médios para este parâmetro são mais elevados para os Leptossolos, mais baixos para os Fluvissolos, e apresentam valores intermédios para os Cambissolos. Os Cambissolos apresentaram valores médios ( $0,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ) semelhantes aos observados para o mesmo tipo de solos em Maher (1998) ( $0,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ).

Nos perfis de solo, a  $\chi$  apresenta, de um modo geral, os valores mais elevados para as amostras colhidas nos horizontes superficiais, o que está relacionado com a contribuição de partículas ferrimagnéticas de origem antrópica, cuja

---

presença foi corroborada pelas observações feitas em imagens obtidas por microscopia electrónica de varrimento. Em zonas florestais, não poluídas, as amostras colhidas em profundidade revelaram os valores mais elevados para a  $\chi$ , em relação às amostras superficiais, traduzindo neste caso, a influência do material parental. Em solos podzolizados (caso do perfil 6), os valores mais elevados da  $\chi$  foram observados em profundidade, no horizonte Bs (horizonte espódico, iluvial e férrico).

De acordo com as observações feitas e ponderando os factores envolvidos, concluímos que a  $\chi$  pode ser utilizada como indicador (“proxy”) do grau de poluição, à superfície e em profundidade, como auxiliar na cartografia de solos e, ainda, como indicador do grau e tipo dos processos pedogenéticos.

A MRI  $_{1T}$  tem o valor mínimo de  $0,28 \times 10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$  e máximo de  $107,40 \times 10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ , apresentando o mesmo padrão de variação que a  $\chi$ . Estes dois parâmetros apresentam uma correlação muito elevada. Este parâmetro pode, assim, ser interpretado do mesmo modo que a  $\chi$  e utilizado como “proxy” para as mesmas finalidades.

A partir da análise das curvas de aquisição de MRI, conclui-se que as principais fases magnéticas, na maioria das amostras, são estruturas ferrimagnéticas (magnetites/maghemites). Os valores médios dos quocientes S calculados ( $S_{100} = 0,7$  e  $S_{300} = 0,9$ ) permitem concluir do mesmo modo.

A projecção dos valores a MRIs em função dos valores da  $\chi$  (gráfico de Thompson) permite obter informação sobre a granulometria das partículas. De acordo com a leitura do gráfico obtido, as granulometrias, de um modo geral, situam-se entre os 4 e os 16  $\mu\text{m}$ . Os gráficos interparamétricos permitiram ainda discriminar entre grupos de amostras, com diferentes proveniências. Estes resultados poderão ser, também, particularmente úteis, por exemplo, em estudos forenses.

Os valores de HMRI variam entre 1,00 e  $1042,70 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$  com um valor médio de  $88,79 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ . Este parâmetro, que permite estimar a contribuição dos minerais antiferromagnéticos, apresentou os valores mais elevados em amostras colhidas em locais mais afastados do centro urbano e em amostras colhidas em profundidade, nos perfis de solos. Os valores da HMRI permitem-nos concluir que nestas amostras existe uma maior contribuição de óxidos de ferro antiferromagnéticos (hematite/goethite) e que a fracção ferrimagnética tem maior contribuição nas amostras colhidas à superfície e na proximidade de fontes de poluição antrópica.

A realização de análises químicas permitiu obter informação sobre a concentração de vários elementos, entre os quais se incluem os metais pesados,

considerados tóxicos, para a área em apreço, e comparar estes dados com os disponíveis na legislação em vigor que estabelece valores-limite de metais pesados nos solos (Portaria nº 26/2006). Permitiu também que fossem analisados, em função dos dados obtidos nas análises magnéticas, com o objectivo de se estudarem possíveis relações entre ambos.

Verificou-se que os teores dos metais pesados analisados no presente estudo são inferiores aos estabelecidos na Portaria nº 26/2006, para qualquer dos valores de pH considerados. Fez-se também a comparação com os valores considerados como médios para os solos do território de Portugal continental, para os elementos Al, As, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, L, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sr, Th, V e Zn, disponibilizados no Atlas Geoquímico dos Solos de Portugal (Inácio *et al.*, 2008). Com excepção do Co, que apresenta um valor médio mais baixo e do Fe, Ni e P, com teores médios na mesma ordem de grandeza, todos os elementos analisados exibem valores médios mais elevados na área de estudo, em relação aos valores considerados no trabalho acima referido. Nos solos agrícolas, os valores elevados podem estar relacionados com a utilização intensiva de produtos químicos, por exemplo, herbicidas, fungicidas e fertilizantes. Junto às estradas, os valores elevados podem resultar, principalmente, da circulação automóvel (queima de combustíveis fósseis, desgaste das carroçarias e pavimentos). No estudo acima referido são propostos padrões de qualidade (Valores de Referência) para nove elementos potencialmente perigosos para a saúde humana (As, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Zn). São apresentados, além dos Valores de Referência, Valores de Intervenção, que indicam concentrações acima das quais existe um risco considerável para a saúde humana. No presente estudo, apenas algumas amostras colhidas em contexto urbano excedem aqueles valores, relativamente ao As e Zn.

Os dados obtidos nas análises químicas também permitiram avaliar o grau de poluição/contaminação em metais pesados, através do cálculo do PLI (“pollution load index”), e tomando como referência os valores disponibilizados em Inácio *et al.*, 2008, mais adequados à realidade portuguesa. Os valores para este índice apresentam uma variação de 0,104 a 2,458 (média: 0,604), com os valores mais elevados observados em amostras colhidas no centro urbano e na periferia da fábrica de cimento de Souselas. A  $\chi$  é um parâmetro bastante eficiente para ser utilizado como proxy da poluição por metais pesados, pois exhibe um elevado número de correlações positivas com níveis de significância elevados, com os metais pesados. Este parâmetro também tem correlação positiva, muito significativa, com os elementos Al, As, Ba, Ce, Co, Cr,

---

Cu, Fe, Hf, La, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Sr, V, Y, Zn, Zr. A  $S_{-100}$  e a  $MRI_{1T}$  apresentam também um bom nível de correlações positivas e significativas (31 e 22, respectivamente). O quociente L pode também ser utilizado como proxy da concentração de um conjunto de 34 elementos nos solos, pois embora a correlação seja negativa, é significativa.

O PLI apresenta uma correlação muito significativa com a  $\chi$ , com a  $MRI_{1T}$ , o que indica que metais pesados e partículas magnéticas têm provavelmente uma fonte comum e que estes parâmetros constituem um bom indicador da poluição/contaminação dos solos para esta área.

Através de uma ACP, levada a cabo sobre um grupo de elementos e parâmetros magnéticos selecionados, foram individualizadas 4 componentes principais que explicam 88 % da variância total. A 1ª componente, em que aparecem agrupados os elementos Al, Co, Cr, Cu, Ni, Fe, Ti, e Sc, pode ser utilizada como marcador da poluição automóvel. As componentes 2 e 3 são também indicadoras de uma fonte antrópica comum, relacionada com a queima de combustíveis fósseis, na qual podem estar também englobadas as emissões do tráfego automóvel. A componente 4 está relacionada com fontes naturais (material parental, por exemplo).

As análises magnéticas e químicas foram complementadas com análises de SEM/EDS que permitiram obter informação sobre a morfologia, a dimensão e a composição química das partículas magnéticas. Este tipo de análise revelou a presença de partículas com forma esférica, típicas de emissões industriais, que envolvem a queima de combustíveis fósseis. A dimensão das partículas detectadas varia entre 1  $\mu\text{m}$  a  $\approx 100 \mu\text{m}$ , apresentando diferentes estruturas superficiais, incluindo a típica “casca de laranja”, documentada em vários trabalhos do âmbito do magnetismo ambiental. Porém, este tipo de partículas foi detectado apenas nas amostras colhidas à superfície, como seria de esperar. Nas amostras colhidas em profundidade, nos perfis de solo, não foram observadas partículas magnéticas com esta morfologia. A deposição a partir da atmosfera é, assim, o principal processo responsável pela presença destas partículas nas camadas superficiais dos solos. As amostras mais afastadas do centro urbano não revelaram a presença deste tipo de partículas. Numa amostra, colhida junto da linha de caminho-de-ferro, a SEM revelou a presença de partículas angulosas resultantes, provavelmente, do desgaste dos carris e dos materiais das composições ferroviárias. Os valores elevados da  $\chi$  que esta amostra apresentou podem estar, também, relacionados com a presença deste tipo de partículas.

As análises de EDS mostraram que as partículas de morfologia esférica são compostas principalmente por Fe e O, tratando-se provavelmente de partículas de magnetite/maghemite. A análise da composição revelou ainda a presença de Al, C, K, Mg e Si. O C poderá ter origem na queima de combustíveis fósseis e os restantes elementos estarão, provavelmente, relacionados com a contribuição litogénica.

Os resultados das análises mineralógicas, por difracção de raio-X, mostraram que os minerais mais abundantes são quartzo, filossilicatos, feldspatos potássicos, plagioclasas, calcite e dolomite. Também confirmaram a presença de magnetite/maghemite em concentrações  $\approx 2\%$ . Nalgumas amostras foi detectada a presença de plumbogumite. Na natureza, a plumbogumite foi encontrada em vários locais como um mineral secundário em zonas oxidadas relacionadas com depósitos de chumbo. No presente caso, este mineral pode estar relacionado com uma antiga mina de chumbo existente na zona do Zorro. Na fracção argilosa, as análises de DRX mostraram que ilite, caulinite, clorite e inter-estratificados irregulares de ilite-esmectite são os principais minerais de argila presentes nas amostras. Não foram encontradas correlações significativas entre os dados da mineralogia e os dos parâmetros magnéticos.

As análises convencionais das amostras de solos revelaram que apresentam textura areno-franca a limosa com os valores de pH a variar entre 4,8 e 8,7. A percentagem de M.O. é baixa, como é comum nos solos de Portugal, diminuindo em profundidade. Fogos florestais ou más práticas agrícolas, como lavouras sucessivas, podem estar na origem da destruição da matéria orgânica. Particularmente, no perfil aberto na Mata do Mosteiro de S. Jorge de Milréu, a M.O. apresentou valores ainda mais baixos, provavelmente devido aos fogos florestais que ocorreram em 2005.

Foi estudada a relação entre parâmetros pedológicos e parâmetros magnéticos, concluindo-se que os parâmetros magnéticos que melhor se correlacionam com os parâmetros pedológicos são os quocientes S e a HMRI. O quociente  $S_{-300}$  correlacionou-se com o pH (embora significativa essa correlação é negativa). A  $\chi$  e a  $MRI_{1T}$  apresentaram correlação baixa, mas positiva, com a M.O.

Os valores medidos, quer para as propriedades magnéticas, quer para as concentrações em metais pesados, em amostras colhidas em perfis de solo, revelaram que, de um modo geral, existe um aumento superficial relacionado com as actividades antrópicas. No perfil aberto em zona florestal (perfil 3), o aumento dos parâmetros magnéticos em profundidade, nomeadamente da susceptibilidade, permite concluir que a principal influência é o material parental. Este solo poderá, eventualmente, servir



---

como referência para considerações sobre o “background” magnético e químico nesta área, em estudos futuros. O estudo da variação em profundidade dos parâmetros magnéticos permite também tirar ilações sobre os processos pedogenéticos em curso, nomeadamente a podzolização, servido assim como apoio na cartografia de solos. A análise conjunta da variação em profundidade destes parâmetros, coadjuvada com informação sobre os teores dos metais pesados, permite estabelecer o limite entre solo “limpo” e solo poluído que, neste estudo, não ultrapassa o horizonte A, ou seja, 20-25 cm de profundidade.

Os valores médios de MRIs/ $\chi$  para os solos analisados mantêm uma certa uniformidade ao longo dos perfis o que resulta, provavelmente, da predominância de um mineral magnético comum (magnetite), embora os quocientes S indiquem, por vezes, uma maior contribuição antiferromagnética na zona mais profunda. A variação da HMRI permite concluir do mesmo modo.

A determinação das propriedades magnéticas, mineralógicas, químicas e pedológicas e a integração dos respectivos resultados, permite obter informação sobre os solos, sobre os processos pedogenéticos, e, ainda sobre a extensão da contaminação/poluição, suas fontes e comportamento. Este tipo de estudo permite acautelar possíveis situações de utilização indevida de solos muito poluídos, em especial, para produção em áreas urbanas, periurbanas e em zonas próximas de fontes poluidoras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrantes, I., Rocha, F., 2007. Sedimentary Dynamics of the Aveiro Shelf (Portugal). Jour. Coast. Res., SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), Gold Coast, Australia, 1005 – 1009.
- Agência Portuguesa do Ambiente, 2007. Atlas do Ambiente (<http://www.iambiente.pt/atlas/>)
- Alagarsamy, R., 2009. Environmental magnetism and application in the continental shelf sediments of India. Mar. Env. Res., 68 (2), 49-58.
- Alves, E.I., Azevedo, J.M., Alte da Veiga, N.M., Fernandes, V.A., 2003. Um projecto de prospecção magnética em Marte. Magiber II, Livro de Comunicações, Coimbra, Portugal.
- Angulo, E., 1996. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal, “Mussel-Watch” data: a useful index to assess coastal pollution. Sci. Tot. Env., 187, 19-56.
- Ao, H., Deng, C., Dekkers, M.J., Liu, Q., 2010. Magnetic mineral dissolution in Pleistocene fluvio-lacustrine sediments, Nihewan Basin (North China). Earth Plan. Sc. Letts., 292, 191–200.
- Balbino, L.R., 1968. O método de Egnér-Riehm na determinação do fósforo e do potássio “assimiláveis” em solos de Portugal. Rev. Agron., 51, 46-56.
- Banerjee, K.S., 1971. New grain size limits for paleomagnetic stability in hematite. Nat. Phys. Sci., 232, 15-16.
- Barbosa, B.P., Soares, A.F., Rocha, R.B., Manuppella, G., Henriques, M.H., 1988. Carta Geológica de Portugal, esc. 1/50 000, 19-A, Cantanhede. Not. Explic., Serv. Geol. Portugal, Lisboa.
- Batista, M.J., 2003. Comportamento de Elementos Químicos no Sistema Rocha-Solo-Sedimento-Planta na Área Mineira de Neves Corvo: Implicações Ambientais. Dissert. Dout., Univ. Aveiro, 393p.
- Bitjukova, L., Scholger, R., Birke, M., 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. Phys. Chem. Earth, 24, 829-835.
- Blaha, U., Appel, E., Stanjek, H., 2008. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility. Env. Pollut., 156, 278-289.
- Boer, C.B., 1999. Rock-Magnetic Studies on Hematite, Maghemite and Combustion-Metamorphic Rocks. Geol. Ultra., 177, 245p.
- Boer, C.B., Dekkers, M.J., 1996. Grain-size dependence of the rock magnetic properties for a natural maghemite. Geoph. Res. Letts., 23, 2815-2818.

Boyko, T., Scholger, R., Stanjek, H., MAGPROX Team, 2004. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. *J. App. Geoph.*, 55, 249-259.

Brilhante, O., Daly, L., Trabuc, P., 1989. Application of magnetism to detect pollution caused by heavy metals in the environment. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309, II, 2005-2012.

Butler, R.F., 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to geological Terranes*. Blackwell Scientific, 319p.

Carvalho, G.S., 1951. A Geologia do Baixo Mondego nos Arredores de Coimbra (estado actual do conhecimento). *Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 29, 1-36.

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. *Mar. Poll. Bull.*, 7 (42), 569-583.

Chaparro, M.A.E., Bidegain, J.C., Sinito, A.M., Gogorza, C.S.G., Jurado, S., 2003. Preliminary results of magnetic measurements on stream-sediments from Buenos Aires province, Argentina. *Stud. Geoph. Geod.*, 47, 121-145.

Chaparro, M.A.E., Bidegain, J.C., Sinito, A.M., Jurado, S., Gogorza, C.S.G., 2004. Relevant magnetic parameters and heavy metals from relatively polluted stream sediments – vertical and longitudinal distribution along a cross-city stream in Buenos Aires province, Argentina. *Stud. Geoph. Geod.*, 48, 615-636.

Chaparro, M.A.E., Chaparro, M.A.E., Rajkumar, P., Ramasamy, V., Sinito, A.M., 2011. Magnetic parameters, trace elements, and multivariate statistical studies of river sediments from southeastern India: a case study from the Vellar River. *Env. Earth Sci.*, 63, 297-310.

Chaparro, M.A.E., Gogorza, C.S.G., Chaparro, M.A.E., Irurzun, M.A., Sinito, A.M., 2006. Review of magnetism and heavy metal pollution studies of various environments in Argentina. *Earth Plan. Space*, 58, 1411-1422.

Chaparro, M.A.E., Gogorza, C.S.G., Lavat, A., Pazos, S., Sinito, A.M., 2002. Preliminary results of magnetic characterisation of different soils in the Tandil region (Argentina) affected by pollution by a metallurgical factory. *Eur. J. Env. Eng. Geoph.*, 7, 35-58.

Chaparro, M.A.E., Sinito, A.M., Ramasamy, V., Marinelli, C., Chaparro, M.A.E., Mullainathan, S., Murugesan, S., 2008. Magnetic measurements and pollutants of sediments from Cauvery and Palaru River, India. *Env. Geol.*, 56, 425-437.

Chen, M., 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. *For. Sci. Int.*, 187, 29-33.

Choffat, P., 1880. Etude stratigraphique et paléontologique des terrains jurassiques du Portugal. Première livraison: Le Lias et le Dogger au Nord du Tage. *Mem. Sec. Trab. Géol.*, XXII, 72p.

- Choffat, P., 1894. Notice stratigraphique sur les gisements de végétaux fossiles dans le Mésozoïque du Portugal. Mem. Dir. Trab. Geol. Portugal, 229-288.
- Collinson, D.W., 1983. Methods in rock magnetism and palaeomagnetism. Techniques and instrumentation. Chapman and Hall, 503p.
- Comissão Nacional do Ambiente, 1985. Notícia Explicativa do Atlas do Ambiente (I.2, I.4.1, I.4.2, I.6, I.7), I. N. M. G, Lisboa.
- Costa, J.B., 1999. Caracterização e constituição do solo, 6º ed., Fund. Cal. Gulbenkian, 527p.
- Cunha, L., 1990. As Serras Calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere. Estudo de Geomorfologia. Geografia Física 1, Inst. Nac. Inv. Cient., Coimbra.
- Cunha, L., Soares, A. F., 1997. Alguns problemas geomorfológicos no sector oriental do Baixo Mondego. Actas do Seminário “O Baixo Mondego: Organização geossistemática e recursos naturais”, Coimbra, 41-49.
- Cunha, L., Soares, A. F., Tavares, A., Marques, J. F., 1996. O “julgamento geomorfológico” de Coimbra. O testemunho dos depósitos quaternários. Actas 1º Colóquio de Geografia de Coimbra. Cad. Geog., nº especial, 15-26.
- D. G. A. D. R. - Direcção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, 2002. Notícia explicativa da Carta de Solos de Portugal 1/25 000, Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, 17p.
- D. G. O. T. D. U. - Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano, 2011. Contributo para o projecto da nova lei do solo. Painel de Orientação Técnica. Nota Técnica 3/DGOTDU/LdS, 12p.
- Dankoub, Z., Ayoubi, S., Khademi, H., Lu, S. -G., 2012. Spatial Distribution of Magnetic Properties and Selected Heavy Metals in Calcareous Soils as Affected by Land Use in the Isfahan Region, Cent. Iran. Ped., 22, 33–47.
- Daveau, S., Birrot, P., Ribeiro, O., 1985/1986. Les bassins de Lousã et Arganil. Recherches géomorphologiques et sédimentologiques, sur le massif ancien et sa couverture à l'Est de Coimbra. Mem. Cent. Est. Geog., 8, 19-32.
- Davis, J.C., 1986. Statistics and data analysis in geology. 2 Ed, Wiley, 646 p.
- D'Emilio, M., Chianese, D., Coppola, R., Macchiato, M., Ragosta, M., 2007. Magnetic susceptibility measurements as proxy method to monitor soil pollution: development of experimental protocols for field surveys. Env. Monit. Ass., 125, 137–146.
- de Jong, E., Nestor, P.A., Pennock, D.J., 1998. The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution. Catena, 32, 23–35.
- Dearing, J.A., 1999. Environmental Magnetic Susceptibility. Using the Bartington MS2 System. Chi Publishing, Kenilworth, England, 52p.

Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., O'Grady, K., 1996. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geoph. J. Int.*, 124, 228-240.

Dekkers, M.J., 1989a. Magnetic properties of natural pyrrhotite. II. High and low temperature behaviors of Jrs and TRM as a function of grain size. *Phys. Earth Plan. Int.*, 57, 266-283.

Dekkers, M.J., 1989b. Magnetic properties of natural goethite. I. Grain-size dependence of some low and high field related rock magnetic parameters measured at room temperature. *Geop. J.*, 97, 323-340.

Dekkers, M.J., 1997. Environmental Magnetism: an introduction. *Geol. Mijnb.*, 76, 163-182.

Dekkers, M.J., Mattéi, J.-L., Fillion, G., Rochette, P., 1989. Grain-size dependence of the magnetic behaviour of pyrrhotite during its low-temperature transition at 34K. *Geoph. Res. Letts.*, 16, 855-858.

Dinis, P.A., 2004. Evolução Pliocénica e Quaternária do Vale do Cértima. *Dissert. Dout.*, F.C.T, Univ. Coimbra, 351p.

Domingues, H., Balsa, M.E., Sequeira, E.M., Oliveira, J.S., 1989. Mobilidade de alguns metais pesados no solo. *Geonovas* (nº especial 1), 169-181.

Dunlop, D.J., 1995. Magnetism in rocks. *J. Geoph. Res.* 100, 2161-2174.

Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 1997. *Rock magnetism: fundamentals and frontiers.* Cambridge University Press, 573p.

Đurža, O., 1999. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. *Phys. Chem. Earth*, 24 (6), 541- 543.

El Baghdadi, M., Barakat, A., Sajieddine, M., Nadem, S., 2011. Heavy metal pollution and soil magnetic susceptibility in urban soil of Beni Mellal City (Morocco). *Env. Earth Sci.*, 66 (1), 141-155.

E.S.R.I. - Environmental Systems Research Institute, 2007. *Manual ArcGis 9.3.*

Evans, M.E., Heller, F., 2003. *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics.* Academic Press, Elsevier, Amsterdam, 299p.

F.A.O.- Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2006. *World reference base for soil resources. World Soil Resources Reports*, Rome, 133p.

Fassbinder, J.E., Stanjek, H., 1994. Magnetic properties of biogenic soil greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). *Geoph. Res. Letts.*, 21, 2349-2352.

Fergusson, J., 1990. *The heavy elements: Chemistry, environment impact and health effects.* Pergamon, 614p.

Ferreira, A., 2000. Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional. Dissert. Dout. Univer. Aveiro, Vol. I, 226p.

Fialová, H., Maier, G., Petrovský, E., Kapička, A., Boyko, T., Scholger, R., MAGPROX Team, 2006. Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *J. Appl. Geoph.*, 59, 273-283.

Flanders, P.J., 1994. Collection, measurements and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment. *J. Appl. Phys.*, 75, 5931-5936.

Flanders, P.J., 1999. Identifying fly ash at a distance from fossil fuel power stations. *Env. Sci. Tech.*, 33, 528- 532.

Fonseca, M.S., Marado, M.O.B., 1991. Carta de Solos de Portugal. Enquadramento das Unidades Taxonómicas da Classificação do C.N.R.O.A. na Legenda da F.A.O. (1ª aproximação), 75p.

Frank, U., Nowaczyk, N., 2008. Mineral magnetic properties of artificial samples systematically mixed from haematite and magnetite. *Geoph. J. Int.*, 175, 449–461.

Gautam, P., Blaha, U., Appel, E., 2005a. Integration of magnetism and heavy metal chemistry of soils to quantify the environmental pollution in Kathmandu, Nepal. *The Island Arc*, 14, 424-435.

Gautam, P., Blaha, U., Appel, E., 2005b. Magnetic susceptibility of dust-loaded leaves as a proxy of traffic-related heavy metal pollution in Kathmandu city, Nepal. *Atm. Env.*, 39, 2201-2211.

Gautam, P., Blaha, U., Appel, E., Neupane, G., 2004. Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal. *Phys. Chem. Earth*, 29, 973-984.

Goddu, S.R., Appel, E., Jordanova, D., Wehland, F., 2004. Magnetic properties of road dust from Visakhapatnam (India)-relationship to industrial pollution and road traffic. *Phys. Chem. Earth*, 29, 985-995.

Gołuchowska, B.J., 2001. Some factors affecting an increase in magnetic susceptibility of cement dusts. *J. Appl. Geoph.*, 48, 103-112.

Gomes, C.R., 1996. Observações Paleomagnéticas no Quadro da Bacia Lusitaniana. 1ª Fase de Rifting. Estudo da Estabilidade da Magnetização Remanescente Natural. Dissert. Dout., F.C.T, Univ. Coimbra, 254p.

Gomes, C.R., Dias, J., Neves, L., Rocha, A., Gomes, E., 2007. Relationships between magnetic properties and heavy metals in Nerium oleander leaves and soils (Viseu, Central Portugal). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 (15), A340-A340. Suppl. S AUG 2007.

Gomes, C.R., Dinis, A.M., Rocha, A., Gomes, E., Neves, L., 2008. Magnetic properties and size of microscopic pollutant particles in the urban area of Coimbra. *INCOMAN'07-International Conference on Microscopy and Microanalysis*, 14 (3), 144-145.



Gomes, C.R., Rey, D., Rocha, A.R., 2003. Propriedades magnéticas de folhas de árvores e níveis de poluição em Coimbra. Magiber II, Livro de Comunicações, Coimbra, Portugal.

Gomes, C.R., Rocha, A., Lourenço, A., Sant'Ovaia, H., Gomes, E., Pereira, A., 2012a. Partículas com origem no tráfego automóvel em Coimbra e na Lousã, Portugal central. Um estudo de magnetismo ambiental. I Congresso Internacional "Geociências na CPLP", 12-16 de Maio, Coimbra.

Gomes, C.R., Rocha, A., Lourenço, A., Pereira, A., Sant'Ovaia, H., 2012b. Níveis de poluição por partículas nas áreas urbanas de Coimbra e da Lousã, Portugal central. Um estudo de magnetismo ambiental. 46º Congresso Brasileiro de Geologia, 30 Setembro a 5 Outubro, Santos, S. Paulo, Brasil.

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 2006, Braga, Portugal.

Haan, F.A.M., Zwerman, P.J., 1976. Pollution of soil. Em: G.H. Bolt e M.G.M. Bruggenwert (Ed.s). Soil Chemistry. A. Basic Elements. Elsevier, 192-271.

Hanesh, M., Petersen, N., 1999. Magnetic properties of a recent parabrown-earth from Southern Germany. Earth Plan. Sci. Lett., 169, 85–97.

Hanesch, M., Rantitsch, G., Hemetsberger, S., Scholger, R., 2007. Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping. Sci. Tot. Env., 382, 351-363.

Hanesch, M., Scholger, R., 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. Env. Geol., 42, 857-870.

Hanesch, M., Scholger, R., 2005. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. Geoph. J. Int. 161, 50-55.

Hanesch, M., Scholger, R., Rey, D., 2003. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring parameters of tree leaves. Atmos. Env., 37, 5125-5133.

Hay K., Dearing J., Baban S., Loveland P., 1997. A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements. Phys. Chem. Earth, 22, 207-210.

Hoffmann, V., Knab, M., Appel, E., 1999. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution., 66, 313-326.

Horng, C.-S., Huh, C.-A., Chen, K.-H., Huang, P.-R., Hsiung, K.-H., Lin, H.-L., 2008. Air pollution history elucidated from anthropogenic spherules and their magnetic signatures in marine sediments offshore of Southwestern Taiwan, J. Mar. Sys., 76, (4), 468-478.

Hunt, C.P., Moskowitz, B.M., Banerjee, S.K., 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals. Em: Handbook of Physical Constants, T. J. Ahrens (Ed.), A. G. U., 189-204.

Inácio, M., Pereira, V., Pinto, M., 2008. The Soil Geochemical Atlas of Portugal: Overview and applications. *J. Geoch. Expl.*, 98, 22-33.

ISO 10390, 2005. Soil quality – Determination of pH. Second edition, Geneva. 7 p.

Jackson, T.A., 1998. The biogeochemical and ecological significance of interactions between colloidal minerals and trace elements. Em: Parker, A., Rae, J.E. (Eds.), *Environmental Interactions of Clays*. Springer, Berlin, 93-205.

Johnston, W.R., Harrison, R.M., 1984. Deposition of metallic pollutants alongside the M& motorway. *Sci. Tot. Env.*, 33, 119-127.

Jordanova, D., Jordanova, N., Petrov, P., Tsacheva, Ts., 2010. Soil development of Chernozem-like profiles from North Bulgaria revealed by magnetic studies. *Catena*, 83, 158-169.

Jordanova D., Petrovský E., Jordanova N., Evlogiev J., Butchvarova V., 1997. Rock magnetic properties of recent soils from northeastern Bulgaria. *Geoph. J. Int.*, 128, 474-488.

Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in Soils and Plants. CRC Press., Boca Raton, Florida, 520p.

Kapička, A., Petrovský, E., Fialová, H., Podrázský, V., Dvořák, I., 2008. High resolution mapping of anthropogenic pollution In the Giant Mountains National Park using soil magnetometry. *Stud. Geoph. Geod.*, 52, 271-284.

Kapička, A., Jordanova, N., Petrovský, E., Podrázský, V., 2003. Magnetic study of weakly contaminated forest soils. *Water Air Soil Pollut.* 148, 31-44.

Kapička, A., Petrovský, E., Ustjak, S., Macháčková, K., 1999. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: a case study in the Czech Republic. *J. Geoch. Explor.*, 66, 291-297.

Karimi, R., Ayoubi, S., Jalalian, A., Sheikh-Hosseini, A. R., Afyuni, M., 2011. Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. *J. Appl. Geoph.*, 74, 1-7.

Khan, A., Soltanpour, P.N., 1978. Effect of wetting and drying on DTPA-extractable Fe, Zn, Mn and Cu in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 9, 193-202.

Kim, W., Doh, S., Park, Y., Yun, S., 2007. Two-year magnetic monitoring in conjunction with geochemical and electron microscopic data of roadside dust in Seoul, Korea. *Atm. Env.*, 41, 7627–7641.

Kim, W., Doh, S., Yu, Y., 2009. Anthropogenic contribution of magnetic particulates in urban roadside dust. *Atm. Env.*, 43, 3137–3144.

Knab, M., Appel, E., Hoffmann, V., 2001. Separation of the anthropogenic portion of heavy metal contents along a highway by means of magnetic susceptibility and fuzzy c-means cluster analysis. *Eur. J. Env. Eng. Geoph.*, 6, 125- 140.

Knab, M., Hoffmann, V., Appel, E., Jordanova, N., Beck, R., 1998. Magnetic Mapping of Road-Side Pollution and Correlation With Heavy Metals. *Geol. Carp.*, 49, p237.

L.Q.A.R.S. - Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva, 1977. Sector de Fertilidade do Solo, DGSA - Ministério da Agricultura. Lisboa, Portugal, 39 p.

Lagroix, F., Banerjee, S.K., 2002. Paleowind directions from the magnetic fabric of loess profiles in central Alaska. *Earth Plan. Sci. Letts.*, 195, 99-112.

Lapa, M.L.R., 1993. Noções gerais de Pedologia. Dep.<sup>to</sup> Ciências da Terra, F.C.T., Univ. de Coimbra, 62 p. Não publicado.

Lapa, M., Reis, R., 1977. Contribuição para o estudo dos minerais argilosos em formações sedimentares da Orla Meso-Cenozóica Ocidental. *Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 83, 3-35.

Le Borgne, E., 1955. Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Ann. Geoph.*, 11, 399-419.

Le Borgne, E., 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétique du sol et sur celles du schiste et du granit. *Ann. Geoph.*, 16, 159-195.

LECO<sup>®</sup>, 1997. Instruction Manual SC-144DR Dual Range Sulfur and Carbon Analysis System. LECO Corporation, St. Joseph, MI, E.U.A.

Lecoanet, H., Lévêque, F., Ambrosi, J.P., 2001. Magnetic properties of salt-marsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France). *J. Appl. Geoph.*, 48, 67-81.

Lecoanet, H., Lévêque, F., Ambrosi, J.P., 2003. Combination of magnetic parameters: an efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France). *Env. Pollut.*, 122, 229-234.

Lecoanet, H., Lévêque, F., Seguna, S., 1999. Magnetic susceptibility in environmental applications: comparison of field probes. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 115, 191-204.

Lencastre, A., Franco F.M., 2003. Lições de Hidrologia. Ed. Fund. Armando Lencastre, Lisboa, 451p.

Liu, Q., Roberts, A., Torrent, J., Horng, C., Larrasoña, J., 2007. What do the HIRM and S-ratio really measure in environmental magnetism? *Geoch. Geoph. Geosyst.*, 8, Q09011, doi:10.1029/2007GC001717.

Locke, G., Bertine, K.K., 1986. Magnetite in sediments as an indicator of coal combustion. *Appl. Geoch.*, 1, 345-356.

Lourenço, A.M., 2003. Parâmetros magnéticos de solos na periferia da área urbana de Coimbra. *Dissert. Mest. F.C.T., Univ. Coimbra*, 154p.

Lourenço, A., Gomes, C., Pratas, J., Rey, D., 2003. Parâmetros magnéticos de solos na periferia de Coimbra. *Magiber II, Livro de Comunicações, Coimbra*.

Lourenço, A.M., Gomes, C.R., 2010. Caracterização de solos superficiais na região de Coimbra: um estudo de magnetismo ambiental. VIII Congresso Nacional de Geologia, 9-16 Julho, Braga, Portugal.

Lourenço, A.M., Gomes, C.R., Rey, D., Pratas, J., 2004. Parámetros magnéticos de los suelos de la periferia de Coimbra (Portugal). VI Congreso Geológico de Espanha, 12-15 Julho, Zaragoza, Espanha.

Lourenço, A.M., Sant'Ovaia, H., Gomes, C.R., 2011a. Magnetic parameters of soils developed on different geologic backgrounds, Central Portugal. Goldschmidt Conference Abstracts, Min. Mag., 75 (3), 1358-1358.

Lourenço, A.M., Santa'Ovaia, H., Sequeira, E.M., Gomes, C.R., 2011b. Caracterização magnética, pedológica e geoquímica de solos na periferia de Coimbra, Portugal central. Livro de Actas do VIII Congresso Ibérico de Geoquímica, 24-28 Setembro, Castelo Branco, Portugal, 407-410.

Lourenço, A.M., Sequeira, E., Sant'Ovaia, H., Gomes, C.R., 2010. Caracterização magnética e pedológica dos solos entre Coimbra e Montemor-o-Velho, Portugal central. MAGIBER VI-Reunión de la Comisión de Paleomagnetismo de la Sociedad Geológica de España, 23-26 Setembro, Puigcerdà, Espanha.

Lourenço, A.M., Rocha, F., Gomes, C.R., 2012. Relationships between magnetic parameters, chemical composition and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 12, 2545-2555.

Lu, S.-G., Bai, S.Q., Cai, J.B., Xu, C., 2005. Magnetic properties and heavy metal contents of automobile emission particulates. J. Zhejiang Univ. Sci. B, 6 (8), 731-735.

Lu, S.-G., Bai, S.Q., Xue, Q.F., 2007. Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China. Geoph. J. Int., 171, 568-580.

Lu, S.-G., Wang, H.Y., Bai, S.Q., 2008. Heavy metal contents and magnetic susceptibility of soils along an urban-rural gradient in rapidly growing city of eastern China. Env. Monit. Ass., 155, 91-101.

Lygren, E., Gjessing, E., Berglind, L., 1984. Pollution Transport from a Highway. Sci. Tot. Env., 33, 147-159.

Magiera, T., Kapička, A., Petrovský, E., Strzyszczyk, Z., Fialová, H., Rachwał, M., 2008. Magnetic anomalies of forest soils in the Upper Silesia-Northern Moravia region. Env. Pollut., 156, 618-627.

Magiera, T., Strzyszczyk, Z., Kapička, A., Petrovský, E., MAGPROX Team, 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influence on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. Geoderma, 130, 299-311.

Magiera, T., Strzyszczyk, Z., Petrovský, E., Kapička, A., Smolka, D., 1998. Ferrimagnetic minerals and heavy metal distribution within different granulometric fraction of fly ashes. Geol. Carp., 49, p.238.

Maher, B.A., 1986. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. Phys. Earth Plan. Int., 42, 76-92.

Maher, B.A., 1988. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. Geoph. J., 94, 83-96.

- Maher, B.A., 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Paleog. Paleocl. Paleoec.*, 137, 25-54.
- Maher, B.A., 2011. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance. *Aeol. Res.*, 3 (2), 87–144.
- Maher, B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T., 2003. Magnetic mineralogy across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Paleog. Paleocl. Paleoec.*, 201. 321-341.
- Maher, B.A., Taylor, R.M., 1988. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, 336, 368-370.
- Maher, B.A., Thompson, R., Hounslow, M.W., 1999. Introduction. Em: Quaternary climates, Environments and Magnetism, Maher, B. e Thompson, R. (Eds.), Cambridge Univ. Press, 1-48.
- Maier, G., Scholger, R., 2004. Demonstration of connection between pollutant dispersal and atmospheric boundary layers by use of magnetic susceptibility mapping, St. Jacob (Austria). *Phys. Chem. Earth*, 29, 997-1009.
- Martins, V., Dubert, J., Jouanneau, J., Weber, O., Silva, E., Patinha, C., Dias, J., Rocha, F., 2007. A multiproxy approach of the Holocene evolution of shelf–slope circulation on the NW Iberian Continental Shelf. *Mar. Geol.*, 239, 1-18.
- Matschullat, J., Ottenstein, R., Reimann, C., 2000. Geochemical background – can we calculate it? *Env. Geol.*, 39 (9), 990-1000.
- Matýsek, D., Raclavská, H., Raclavský, K., 2008. Correlation Between Magnetic Susceptibility and Heavy Metal Concentrations in Forest Soils of the Eastern Czech Republic. *J. Env. Eng. Geoph.*, 13, 13-26.
- McElhinny, M.W., McFadden, P.L., 2000. *Paleomagnetism. Continents and Oceans.* Academic Press, 386p.
- Mcintosh, G., Paccard, M., Osete, M.L., 2001. The magnetic properties of trees leaves: a measure of urban pollution. *Magiber I, Livro de Comunicações, Burgos, Espanha.*
- Miguel, E., Llamas, J.F., Chacon, E., Berg, T., Larssen, S., Røyset, O., Vadset, M., 1997. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead. *Atm. Env.*, 31, 2733–2740.
- Mohamed, K.J., Rey, D., Rubio, B., Vilas, J., 2001. Aplicación de las propiedades magnéticas en el estudio de la diagénesis temprana en sedimentos marinos de la Rías Baixas. *Magiber I, Livro de Comunicações, Burgos, Espanha.*
- Morel, J.L., 1997. Bioavailability of Trace Elements to Terrestrial Plants. Em: Tarradellas, J., Bitton, G., Rossel, D. (Eds.): *Soil Ecotoxicology.* Lewis Publishers, 141-167.

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. *Atmos. Env.*, 37, 2967-77.

Munsell Color Company Inc., 1954. *Munsell Soil Color Charts*, Baltimore, USA.

Ng, S.L., Chan, L.S., Lam, K.C., Chan, W.K., 2003. Heavy metal contents and magnetic properties of playground dust in Hong Kong. *Env. Monit. Ass.*, 89, 221–232.

O'Reilly, W., 1984. *Rock and Mineral Magnetism*. Blackie, 220p.

Oldfield, F., Crowther, J., 2007. Establishing fire incidence in temperate soils using magnetic measurements. *Paleog. Paleocl. Paleoec.*, 249, 362–369.

Oliveira, A., Rocha, F., Rodrigues, A., Jouanneau, J., Dias, A., Weber, O., Gomes, C., 2002. Clay minerals from the sedimentary cover from the Northwest Iberian shelf. *Prog. Ocean.*, 52, 233-247.

Özdemir, Ö., Dunlop, D.J., 1993. The effect of oxidation on the Verwey transition in magnetite. *Geoph. Res. Letts.*, 20, 1671-1674.

Palain, C., 1976. Une série détritique terrigène les "Grés de Silves". Trias et Lias inférieur du Portugal. *Mem. Serv. Geol. Portugal*, 25, 377p.

Pereira, G., Sousa, A.J. 1991. Análise de dados para o tratamento de quadros multidimensionais. *Textos de Apoio ao curso Intensivo de Análise de Dados*, IST, 105p.

Peters, C., Dekkers, M.J., 2003. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Phys. Chem. Earth*, 28, 659-667.

Petrovský, E., Ellwood, B.B., 1999. Magnetic monitoring of air-, land-, and waterpollution. Em: Maher, B.A., Thompson, R. (Eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press, 279-322.

Petrovský, E., Kapička, A., Jordanova, N., Borůvka, L., 2001. Magnetic properties of alluvial soils contaminated with lead, zinc and cadmium. *J. Appl. Geoph.*, 48, 127-136.

Petrovský, E., Kapička, A., Jordanova, N., Knab, M., Hoffmann, V., 2000. Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Env. Geol.*, 39, 312-318.

Piper, J.A., 1987. *Paleomagnetism and the Continental Crust*. Halsted Press, 434p.

Póvoas, I., Barral, M.F., 1992. Métodos de análise de solos. *Comunicações – Instituto de Investigação Científica Tropical. Série de Ciências Agrárias*, Lisboa, 61 p.

Rebelo, F.M., 1881. A acção humana como causa de desabamentos e deslizamentos. *Biblos*, LVII, Coimbra, 629-644.

Rebelo, F.M., 1985. Nota sobre o conhecimento geomorfológico da área de Coimbra (Portugal). *Mem. e Not., Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 100, 193-202.

Rebello, M., Rocha, F., Silva, E., 2010. Mineralogical and physicochemical characterization of selected Portuguese Mesozoic-Cenozoic muddy/clayey raw materials to be potentially used as healing clays. *Clay Min.*, 45, 229-240.

Reimann, C., Caritat, P., 1998. *Chemical elements in the environment*. Springer-Verlag, 398p.

Reimann, C., Caritat, P., 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Sci. Tot. Env.*, 337, 91– 107.

Reinman, C., Filzmoser, F., Garrett, R., Dutter, R., 2008. *Statistical Analysis Explained*. Willey & Sons, Lda., 343p.

Ribeiro, C., Guedes, A., Valentim, B., Sant’Ovaia, H., Ribeiro, H., Noronha, F., 2011. Variação da susceptibilidade magnética com a granulometria. Suas implicações nos estudos forenses. VIII Congresso Ibérico de Geoquímica, 24-28 Setembro, Castelo Branco, Portugal, 421-424.

Roberts, A.P., 1995. Magnetic properties of sedimentary greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). *Earth Plan. Sci. Letts.*, 134, 227-236.

Rocha, F., 1993. *Argilas Aplicadas a Estudos Litoestratigráficos e Paleoambientais na Bacia Sedimentar de Aveiro*. Dissert. Dout., Univ. Aveiro, 399p.

Rocha, F., Lourenço A.M., Gomes C.R., 2009. Relationships between magnetic parameters, toxic elements content and clay minerals of topsoil of an area near Coimbra, Central Portugal. *Clays, clay minerals and layered materials – CMLM2009*, 21-25 September, Zvenigorod, Moscow.

Rocha, R., Manuppella, G., Mouterde, R., Ruget, C., Zbyszewski, G., 1981. *Carta Geológica de Portugal, esc. 1/50 000, 19-C, Fig. da Foz. Not. Explic., Serv. Geol. Portugal, Lisboa*.

Rocha, R.B., Marques, B., Kullberg, J.C., Caetano, P., Lopes, C., Soares, A.F., Duarte, L.V., Marques, J., Gomes, C., 1996. The 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> rifting phases of the Lusitanian basin: stratigraphy, sequences analysis and sedimentary evolution. Final Report C. E. C. Proj. MILUPOBAS, Lisboa.

Rocha, F., Vidinha, J., 2011. Influence of Clay Minerals crystallochemistry on Metals distribution in Beach and Dune sediments – Assessment on Aveiro littoral (Portugal). *J. Coast. Res.*, 937-940.

Rochette, P., Fillion, G., Mattei, J.-L., Dekkers, M.J., 1990. Magnetic transition at 30-34 kelvin in pyrrhotite: Insight into a widespread occurrence of this mineral in rocks. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 98, 319-328.



- Rosowiecka, O., Nawrocki, J., 2010. Assessment of soils pollution extent in surroundings of ironworks based on magnetic analysis. *Stud. Geoph. Geod.*, 54, 185-194.
- Rubio, B., Pye, K., Rae, E., Rey, D., 2001. Sedimentological characteristics, heavy metal distribution and magnetic properties in subtidal sediments, Ria de Pontevedra, NW Spain. *Sedimentology*, 48, 1277-1296.
- Rummery, T. A., Bloemendal, J., Dearing, J., Oldfield, F., 1979. The persistence of fire-induced magnetic oxides in soils and lake sediments. *Ann. Géoph.*, 35, 103-107.
- Santos, J.A., 2009. Geomorfologia Fluvial e Evolução Quaternária da Bacia do Mondego. Dissert. Dout., I.E.G.,F.L., Univ. Coimbra, 310p.
- Santos, J.G., 1996. A depressão marginal. Elementos para a caracterização geomorfológica do sector Coimbra-Penela e análise de movimentos de riscos de movimentos de terrenos. Diss. Mest., Fac. Letras, Univ. Coimbra, 214p.
- Santos, L., 2004. Caracterização Sócio-Económica dos Concelhos. Concelho de Coimbra. D.G.O.T.D.U., 45p.
- Sant' Ovaia, H., 1993. Características Magnéticas dos Granitóides Pós-Tectónicos de Vila Pouca de Aguiar. Provas Apt. Ped. Capac. Cient. Fac. Ciências, Univ. Porto, 130p.
- Sant' Ovaia, H., Lacerda, M.J., Gomes, C.R., 2012. Particle pollution - An environmental magnetism study using biocollectors located in northern Portugal. *Atm. Env.*, 61(2012), 340-349.
- Schibler, L., Boyko, T., Ferdyn, M., Gajda, B., Höll, S., Jordanova, N., Rösler, W., MAGPROX Team, 2002. Topsoil magnetic susceptibility mapping: Data reproducibility and compatibility, measurement strategy. *Stud. Geoph. Geod.*, 46, 43-57.
- Scholger, R., 1998. Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applied to sediments of the river Mur (Styria, Austria). *Eur. J. Env. Eng. Geoph.*, 3, 25-37.
- Selinus, O., 2005. Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health. Elsevier Academic Press, 812p.
- Shu, J., Dearing, J.A., Morse, A.P., Yu, L.Z., Yuan, N., 2001. Determining the source of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties. *Atmos. Env.*, 35, 2615-2625.
- Shuman, L.M., 1980. Effects of soil temperature, moisture and airdrying on extractable manganese, iron, copper, and zinc. *Soil Sci.*, 130, 336-343.
- Silva, A., 1980. Metodologia de caracterização dos solos. Estação Agronómica Nacional, Oeiras.
- Silva, N., 1998. O clima urbano de Coimbra: estudo de climatologia local aplicada ao ordenamento urbano. Dissert. Dout., Univ. Coimbra, 551 p.

- Snowball, I., Thompson, R., 1990. A stable chemical remanence in Holocene sediments. *J. Geoph. Res.*, 95, 4471-4479.
- Soares, A.F., 1966. Estudo das formações pós-Jurássicas da região de entre Sargento-Mor e Montemor-o-Velho (margem direita do rio Mondego). *Mem. Not., Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 62, 343p.
- Soares, A.F., Gomes, C.R., 1997. A Geologia do Baixo Mondego (Organização do Mesozóico). *Actas do Seminário "O Baixo Mondego: Organização geossistemática e recursos naturais"*, Coimbra, 5-20.
- Soares, A.F., Marques, J.F., Rocha, R.B., 1985. Contribuição para o conhecimento geológico de Coimbra. *Mem. Not. Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*, 100, 41-71.
- Soares, A.F., Marques, J.F., Sequeira, A.J., 2007. Carta Geológica de Portugal, esc. 1/50000, 19-D, Coimbra-Lousã. *Not. Explic., I.N.E.T.I., Lisboa*.
- Spenders, M., Coey, J., Morrish, A., 1972. The magnetic properties and Mössbauer spectra of synthetic samples of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. *Can. J. Phys.*, 50, 2313-2326.
- Spiteri, C., Kalinski, V., Rösler, W., Hoffmann, V., Appel, E., Magprox Team, 2005. Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils. *Env. Geol.*, 49 (1), 1-9.
- Strzyszcz, Z., Ferdyn, M., 2005. Magnetic susceptibility and heavy metal content of soil around the coking plants in Silesia. *Mitt. Deut. Boden. Ges.*, 107, 557-558.
- Strzyszcz, Z., Magiera, T., 1998. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of southern Poland. *Phys. Chem. Earth*, 23, 1127-1131.
- Tauxe, L., 1998. *Paleomagnetic principles and practice*. Kluwer Academic Press, 299p.
- Tavares, A.S., 1999. *Condicionantes Físicas ao Planeamento. Análise da susceptibilidade no espaço do concelho de Coimbra*. Dissert. Dout., F.C.T, Univ. Coimbra, 346p.
- Taylor, R.M., Maher, B., Self, P.G., 1987. Magnetite in soils: I. The synthesis of single-domain and superparamagnetic magnetite. *Clay Min.*, 22, 411-422.
- Teja, A.S., Koh, P., 2008. Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, 55, 22-45.
- Thompson, R., Bloemendal, J.A., Dearing, J., Oldfield, F., Rummery, T.A., Stober, J. C., Turner, G.M., 1980. *Environmental Applications of Magnetic Measurements*. *Science*, 207, 481-486.
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. *Environmental Magnetism*. George Allen and Unwin, London, 140p.

Thornthwaite, C. W., Mather, J. R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Inst. of Tecnol., Vol. 10, 3, 254p.

Tite, M., Linington, R.E., 1975. Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils. *Nature*, 256, 565-566.

Veneva, L., Hoffmann, V., Jordanova, D., Jordanova, N., Fehr, T., 2004. Rock magnetic, mineralogical and microstructural characterization of fly ashes from Bulgarian power plants and the nearby anthropogenic soils. *Phys. Chem. Earth*, 29, 1011-1023.

Verosub, K.L., Roberts, A.P., 1995. Environmental Magnetism: Past, Present, and Future. *J. Geoph. Res.*, 100, 2175-2192.

Vidinha, J., Rocha, F., Andrade, C., Gomes, C., Freitas, C., 2007. Clay minerals – a mineralogical tool to distinguish beach from dune sediments. *J. Coast. Res.*, 216 – 220.

Walden, J., Ballantyne, C.K., 2002. Use of environmental magnetic measurements to validate the vertical extent of ice masses at the Last Glacial Maximum. *J. Quat. Sci.*, 17, 193-200.

Walden, J., Oldfield, F., Smith, J., 1999. Environmental magnetism. A practical guide. Technical Guide, 6. Quatern. Research Assoc., Londres, 240p.

Wang, G., Oldfield, F., Xia, D., Chen, F., Liu, X., Zhang, W., 2012. Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: A case study from the city of Lanzhou, China. *Atm. Env.*, 46, 289-298.

Wang, X.S., Qin, Y., 2005. Correlation between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoil: a case study from the city of Xuzhou, China. *Env. Geol.*, 49, 10-18.

Wang, X.S., Qin, Y., 2006. Use of multivariate statistical analysis to determine the relationship between the magnetic properties of urban topsoil and its metal, S, and Br content. *Environ Geol.*, 51, 509–516.

Wang, X.S., Qin, Y., Sang, S.X., 2005. Accumulation and sources of heavy metals in urban topsoils: a case study from the city of Xuzhou, China. *Envi. Geol.*, 48, 101–107.

Wang, Y., Yu, Z., Li, G., Oguchi, T., He, H., Shen, H., 2009. Discrimination in magnetic properties of different-sized sediments from the Changjiang and Huanghe Estuaries of China and its implication for provenance of sediment on the shelf. *Mar. Geol.*, 260, 121-129.

Xia, D.S., Yu, Y., Tian, S.L., Wang, B., Wang, L., 2011. Use of environmental magnetic techniques to monitor urban pollution origins in Lanzhou, Northwest China. *Env. Earth Sci.*, 64, 1943–1949.

Xie, S., Dearing, J.A., Boyle, J.F., Bloemendal, J., Morse, A.P., 2001. Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications. *J. Appl. Geoph.*, 48, 83-92.

Yan, H.T., Hu, S.Y., Blaha, U., Rösler, W., Duan, X.M., Appel, E., 2011. Paddy soil — A suitable target for monitoring heavy metal pollution by magnetic proxies. *J. Appl. Geoph.*, 75, 211–219.

Yang, T., Liu, Q., Zeng, Q., Chan, L., 2011. Relationship between magnetic properties and heavy metals of urban soils with different soil types and environmental settings: implications for magnetic mapping. *Env. Earth Sci.*, 66 (2), 409-420.

Zhang, C., Qiao, Q., Appel, E., Huang, B., 2012. Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods. *J. Geoch. Expl.*, 119–120, 60–75.

### **Referências cartográficas**

Folhas nºs 229, 230, 240 e 241 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000 do IGE-Instituto Geográfico do Exército.

Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000, folhas nºs 19-A e 19-C dos Serviços Geológicos de Portugal e folha 19-D do INETI-Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial.

Folha Norte da Carta Geológica de Portugal na escala 1/500 000 do LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

Folhas nºs 229, 230, 240 e 241 da Carta de Solos de Portugal na escala 1/25 000 da Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural.

### **Legislação**

Dec.-Lei nº 276/2009 de 2 de Outubro, Diário da República, 1.ª série, N.º 192.

Portaria nº 26/2006 de 23 de Março, Jornal Oficial Região Autónoma dos Açores, 1ª Série, N.º 12.

### **Páginas da Internet consultadas**

<http://rbrebello.wordpress.com/2008/12> (acedido em 05/07/2009)

<http://www.iambiente.pt/atlas/> (acedido em 18/10/2009)

<http://censos.ine.pt/xportal/> (acedido em 02/08/2010)

<http://www.bartington.com/> (acedido em 16/03/2009)

<http://paleomag.geology.ucdavis.edu/> (acedido em 16/03/2009)

<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/> (acedido em 20/06/2009)

<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/> (acedido em 20/09/2012)

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

Principais minerais magnéticos e suas propriedades (Tauxe, 1998).

<b>Magnetite</b>	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Densidade = $5197 \text{ kgm}^{-3}$ Temperatura de Curie = $580 \text{ }^\circ\text{C}$ Magnetização de saturação = $92 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ Constante de anisotropia = $-2,6 \text{ Jkg}^{-1}$ Susceptibilidade = $\sim 1 \text{ SI}$ Coercividades: “dezenas de mT” Transição de Verwey: $110 - 120 \text{ K}$ Dimensão da célula unitária = $83,96 \text{ nm}$	Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) O'Reilly (1984) Dunlop e Özdemir (1997) O'Reilly (1984) O'Reilly (1984) Özdemir e Dunlop (1993) Dunlop e Özdemir (1997)
<b>Maghemite</b>	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$
Densidade = $5074 \text{ kgm}^{-3}$ Temperatura de Curie = $590 - 675 \text{ }^\circ\text{C}$ Magnetização de saturação = $74 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ Constante de anisotropia = $0,92 \text{ Jkg}^{-1}$ Inverte para $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ : entre $250 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$	Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997)
<b>TM60</b>	$\text{Fe}_{2,4}\text{Ti}_{0,6}\text{O}_4$
Densidade = $4939 \text{ kgm}^{-3}$ Temperatura de Curie = $150 \text{ }^\circ\text{C}$ Magnetização de saturação = $24 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ Constante de anisotropia = $-0,41 \text{ Jkg}^{-1}$ Coercividade $\sim 8 \text{ mT}$ Transição de Verwey: inexistente Dimensão da célula unitária = $84,82 \text{ nm}$	Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997) Dunlop e Özdemir (1997)
<b>Hematite</b>	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$
Densidade = $5271 \text{ kgm}^{-3}$ Temperatura de Néel = $675 \text{ }^\circ\text{C}$ Magnetização de saturação = $0,4 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ Constante de anisotropia = $228 \text{ Jkg}^{-1}$ Susceptibilidade = $\sim 1,3 \times 10^{-3} \text{ SI}$ Coercividades bastante variadas, na ordem das dezenas de mT Transição de Morin: $\sim 250 - 260 \text{ K}$ (para $> 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ )	Dunlop e Özdemir (1997) O'Reilly (1984) O'Reilly (1984) Dunlop e Özdemir (1997) O'Reilly (1984) Banerjee (1971) O'Reilly (1984)

Principais minerais magnéticos e suas propriedades (Tauxe, 1998) (continuação).

<b>Goethite</b>	$\alpha\text{FeOOH}$
<p>Densidade = <math>4264 \text{ kgm}^{-3}</math>                      Temperatura de Néel = <math>70 - 125 \text{ }^\circ\text{C}</math>                      Magnetização de saturação = <math>10^{-3} - 1 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}</math>                      Constante de anisotropia = <math>0,25 - 2 \text{ Jkg}^{-1}</math>                      Susceptibilidade = <math>\sim 1 \times 10^{-3} \text{ SI}</math>                      Coercividades na ordem das dezenas de mT                      Inverte para hematite: <math>250 - 400 \text{ }^\circ\text{C}</math></p>	<p>Dunlop e Özdemir (1997)                      O'Reilly (1984)                      O'Reilly (1984)                      Dekkers (1989b)                      Dekkers (1989b)</p>
<b>Pirrotite</b>	$\text{Fe}_7\text{S}_8$
<p>Densidade = <math>4662 \text{ kgm}^{-3}</math>                      Temperatura de Curie = <math>\sim 325 \text{ }^\circ\text{C}</math>                      Magnetização de saturação = <math>0,4 - \sim 20 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}</math>                      Susceptibilidade = <math>\sim 1 \times 10^{-3} \text{ SI}</math>                      Constante de anisotropia = <math>20 \text{ Jkg}^{-1}</math>                      Coercividades bastante variadas, podem chegar a centenas de mT                      Tem uma transição a <math>\sim 34\text{K}</math>                      Inverte para magnetite: <math>\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}</math></p>	<p>Dunlop e Özdemir (1997)                      Dekkers (1989a)                      Worm <i>et al.</i> (1993)                      Collinson (1983);                      O'Reilly (1984)                      O'Reilly (1984)                        Dekkers <i>et al.</i> (1989)                      Rochette <i>et al.</i> (1990)                      Dunlop e Özdemir (1997)</p>
<b>Greigite</b>	$\text{Fe}_3\text{S}_4$
<p>Densidade = <math>4079 \text{ kgm}^{-3}</math>                      Temperatura de desbloqueio máxima = <math>\sim 330 \text{ }^\circ\text{C}</math>                      Magnetização de saturação = <math>\sim 25 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}</math>                      Constante de anisotropia = <math>0,25 \text{ JKg}^{-1}</math>                      Coercividade <math>60 - &gt;100\text{mT}</math>                      Exibe relações <math>M_{ri}/\chi \sim 70 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}</math>                      Inverte para magnetite: <math>\sim 270 - 350 \text{ }^\circ\text{C}</math></p>	<p>Dunlop e Özdemir (1997)                      Roberts (1995)                      Spender <i>et al.</i> (1972)                      Dunlop e Özdemir (1997)                      Roberts (1995)                      Snowball e Thompson (1990)                      Roberts (1995)</p>



## ANEXO 2

Unidades e factores de conversão utilizados em magnetismo (Butler, 1992).

	Sistema cgs (emu)		Sistema Internacional (SI)		Conversão
	Unidades fundamentais	Unidades	Unidades fundamentais	Unidades	
<b>Energia</b>		erg		joule (J)	1 erg = $10^{-7}$ joule
<b>Força (F)</b>	gm cm s <sup>-2</sup>	dyne	kg m s <sup>-2</sup>	newton (N)	1 dyne = $10^{-5}$ newton
<b>Corrente (I)</b>	10 C s <sup>-1</sup>	abampere	C s <sup>-1</sup>	ampere (A)	1 abampere = 10 ampere
<b>Indução magnética (B)</b>	0,1 gm s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	gauss (G)	kg s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	tesla (T)	1 gauss = $10^{-4}$ tesla
<b>Campo magnético (H)</b>	0,1 gm s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	oersted (Oe)	C s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	ampere m <sup>-1</sup> (A/m)	1 Oe = $(1/4\pi) \times 10^3$ A/m
<b>Magnetização (J)</b>	0,1 gm s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	gauss (G) (=emu/cm <sup>-3</sup> )	kg s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	tesla (T)	1 gauss = $4\pi \times 10^{-4}$ tesla
<b>Momento dipolar magnético/ /unidade de volume</b>	0,1 gm s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> cm <sup>-3</sup>	gauss (G) (=emu/cm <sup>-3</sup> )	C s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	A/m	1 gauss = $10^3$ A/m
<b>Momento magnético (M)</b>	0,1 gm s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	gauss cm <sup>-3</sup> (G cm <sup>-3</sup> = emu)	C s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	A m <sup>2</sup>	1 gauss cm <sup>3</sup> = $10^{-3}$ Am <sup>2</sup>
<b>Susceptibilidade magnética (K)</b>		Adimensional		Adimensional	K (cgs) = $4\pi \times$ (SI)

# ANEXO 3

## S.R. DA AGRICULTURA E FLORESTAS

### Portaria n.º 26/2006 de 23 de Março de 2006

Considerando o Decreto Legislativo Regional n.º 16/2005/A, de 20 de Julho, que transpõe a Directiva n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho de 1986, referente à utilização de lamas de depuração na agricultura;

Considerando que, nos termos do disposto nos artigos 4.º, 7.º, 8.º e 9.º deste diploma, são atribuídas competências regulamentares de determinadas matérias aos membros do Governo Regional com competência em matéria de ambiente e de agricultura, mediante portaria conjunta;

Assim, o Secretário Regional da Agricultura e Florestas e a Secretária Regional do Ambiente e do Mar, ao abrigo do disposto nos artigos 4.º, 7.º, 8.º e 9.º do Decreto Legislativo Regional n.º 16/2005/A, de 20 de Julho, determinam o seguinte:

#### Artigo 1.º

##### **Objecto**

A presente portaria regulamenta o Decreto Legislativo Regional n.º 16/2005/A, de 20 de Julho.

#### Artigo 2.º

##### **Características das lamas e dos solos receptores**

Os valores limite de composição das lamas destinadas à aplicação agrícola e dos solos receptores, são os que constam dos quadros que compõem o anexo I à presente portaria e que dela faz parte integrante.

#### Artigo 3.º

##### **Licenciamento**

1. O pedido de licenciamento para aplicação de lamas em solos agrícolas deve ser instruído pelo requerente que pretenda efectuar essa aplicação, nos termos da alínea f) do artigo 2.º do Decreto Legislativo Regional n.º 16/2005/A, de 20 de Julho, de acordo com o modelo de requerimento constante do anexo II à presente portaria e que dela faz parte integrante, devendo ser acompanhado de todos os documentos nele exigidos.

2. A tramitação dos processos de licenciamento de aplicação de lamas em solos agrícolas, obedece às seguintes regras:

- a) O pedido deve ser apresentado, em triplicado, na Direcção Regional competente em matéria de resíduos;
- b) Esta Direcção Regional dispõe de um prazo de 10 dias úteis, a contar da data da recepção do requerimento, para solicitar elementos adicionais ao requerente ou remeter um exemplar do processo às Direcções Regionais competentes em matéria de recursos hídricos e de agricultura;
- c) O requerente dispõe do prazo de 10 dias úteis para juntar ao processo os elementos solicitados, findo o qual, caso estes não sejam apresentados, nem seja apresentada qualquer justificação para o efeito, o processo será arquivado;
- d) Apresentados os elementos referidos na alínea anterior, o processo é remetido, no prazo de 5 dias úteis, às Direcções Regionais competentes em matéria de recursos hídricos e de agricultura;
- e) As Direcções Regionais competentes em matéria de recursos hídricos e de agricultura emitirão parecer vinculativo no prazo máximo de 15 dias úteis após a recepção do processo, remetendo-o à Direcção Regional competente em matéria de resíduos;

- 
- f) A Direcção Regional competente em matéria de resíduos emitirá a decisão final que comunicará ao requerente, no prazo máximo de 10 dias úteis contados da data de recepção do processo por parte das Direcções Regionais, a qual integrará, obrigatoriamente, as condições vinculativas estabelecidas nos pareceres das Direcções Regionais competentes em matéria de recursos hídricos e de agricultura;
3. No caso de a Direcção Regional competente em matéria de resíduos não emitir a decisão final referida na alínea f) do número anterior no prazo de 60 dias úteis contados da data de recepção do pedido de licenciamento devidamente instruído, o pedido considera-se deferido.
4. O licenciamento a que se refere o número 1 tem de ser obtido para cada utilização de lamas na agricultura, considerando-se como tal, a que se refere a uma única exploração agrícola e em que são utilizadas lamas de uma única origem.
5. A utilização de lamas na agricultura apenas pode realizar-se de acordo com as condições constantes da licença.
6. O não cumprimento do estipulado no ponto anterior poderá determinar a suspensão da licença de aplicação de lamas, após decisão das Direcções Regionais intervenientes no processo de licenciamento.

#### Artigo 4.º

##### **Dever de informação**

1. A entidade que efectue qualquer operação de valorização agrícola de lamas é obrigada a fornecer, semestralmente, à Direcção Regional com competência em matéria de resíduos informação sobre essa operação com base no modelo constante do Anexo III. A Direcção Regional competente em matéria de Resíduos deverá enviar a referida informação às Direcções Regionais competentes em matéria de Agricultura e de Recursos Hídricos.
2. Os produtores de lamas de depuração são obrigados a fornecer semestralmente à Direcção Regional com competência em matéria de resíduos todas as informações previstas no n.º 1 do artigo 8.º do Decreto Legislativo Regional n.º 16/2005/A, de 20 de Julho, de acordo com o modelo que consta do anexo IV à presente portaria e que dela faz parte integrante.

#### Artigo 5.º

##### **Análises**

1. As lamas e solos sobre os quais estas são aplicadas serão sujeitas a análises cuja frequência, métodos de amostragem e análise, e normas de referência constam do anexo V à presente portaria, que dela faz parte integrante.
2. As lamas de estações de tratamento de águas residuais urbanas que recebam águas residuais de outras origens para além da doméstica, destinadas à utilização agrícola, terão, igualmente, de ser sujeitas a análise de compostos orgânicos e dioxinas, de acordo com o definido no ponto 1.3 do anexo referido no número anterior.
3. As análises deverão, preferencialmente, ser realizadas por laboratórios acreditados para o efeito no âmbito do Sistema Português da Qualidade;
4. No caso de recursos a outros laboratórios, deve ser apresentada a ficha técnica da análise com a indicação do procedimento ou norma utilizada para assegurar a qualidade dos resultados obtidos;
5. As amostragens e análises referidas nos números anteriores serão realizadas com base em normas europeias (CEN) ou nacionais, caso existam;
6. Em caso de inexistência das normas referidas no número anterior, deverão aplicar-se as correspondentes normas internacionais, designadamente ISO;
7. Pode ser decidida, por razões de saúde pública ou preservação do ambiente, a realização de análises mais frequentes ou de outros parâmetros, designadamente, microrganismos patogénicos, em conformidade com o estabelecido no ponto 1.4 do anexo 4.

#### Artigo 6.º

##### **Entrada em vigor**

A presente portaria entra em vigor no dia imediato ao da sua publicação.

Secretarias Regionais da Agricultura e Florestas e do Ambiente e do Mar.

Assinada em 8 de Março de 2006.

O Secretário Regional da Agricultura e Florestas, *Noé Venceslau Pereira Rodrigues*. - A Secretária Regional do Ambiente e do Mar, *Ana Paula Pereira Marques*.

### Anexo I

(a que se refere o artigo 2.º)

**Valores-limite para a concentração de metais pesados nos solos receptores de lamas e nas lamas para utilização na agricultura, quantidades máximas que poderão ser introduzidas anualmente nos solos agrícolas e outros parâmetros a analisar em determinado tipo de lamas, designadamente compostos orgânicos e dioxinas, incluindo os respectivos valores-limite de concentração:**

**Quadro 1 – Valores-limite de concentração de metais pesados nos solos  
(mg/kg de matéria seca)**

Parâmetro	Valores-limite em solos com:		
	pH ≤ 6	6 < pH ≤ 7,0	pH > 7,0
<b>Cádmio</b>	1	3	4
<b>Cobre</b>	50	100	200
<b>Níquel</b>	30	75	110
<b>Chumbo</b>	50	300	450
<b>Zinco</b>	150	300	450
<b>Mercúrio</b>	1	1,5	2
<b>Crómio</b>	50	200	300

**Quadro 2 – Valores-limite de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à agricultura**

(mg/kg de matéria seca)

Parâmetro	Valores-limite
<b>Cádmio</b>	20
<b>Cobre</b>	1000
<b>Níquel</b>	300
<b>Chumbo</b>	750
<b>Zinco</b>	2500
<b>Mercúrio</b>	16
<b>Crómio</b>	1000

**Quadro 3 – Valores-limite para as quantidades anuais de metais pesados que podem ser introduzidos nos solos cultivados, com base numa média de 10 anos**

**(kg / Ha / ano)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores-limite</b>
<b>Cádmio</b>	0,15
<b>Cobre</b>	12
<b>Níquel</b>	3
<b>Chumbo</b>	15
<b>Zinco</b>	30
<b>Mercúrio</b>	0,1
<b>Crómio</b>	4,5

**Quadro 4 – Valores-limite de concentração de compostos orgânicos e dioxinas nas lamas destinadas à agricultura, produzidas em estações de tratamento de águas residuais urbanas que recebam águas residuais de outras origens para além da doméstica**

<b>Compostos orgânicos</b>	<b>Valores-limite mg / kg ms</b>
<b>AOX (compostos organohalogenados adsorvíveis ou haletos orgânicos adsorvíveis)</b>	500
<b>LAS (alquilo benzenossulfonatos lineares)</b>	2600
<b>DEHP (di (2-etilhexil) ftalato)</b>	100
<b>NPE (nonilfenóis e nonilfenóis etoxilados)</b>	50
<b>PAH (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos)</b>	6
<b>PCB (compostos bifenilos policlorados)</b>	0,8
<b>Dioxinas</b>	<b>Valores-limite ng TE/kg ms)</b>
<b>PCDD/F (policlorodibenzodioxinas / furanos)</b>	100

## ANEXO 4

Correspondência das denominações que constam nas folhas 19-D, 19-C e 19-A da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000, na Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000 e na Carta Geológica de Coimbra (Norte) à escala 1/25 000, para as formações geológicas que afloram na área de estudo.

<b>Folha 19-D</b> <b>Coimbra-Lousã</b> Carta Geol. de Portugal 1/50 000 <b>(Soares et al., 2007)</b>	<b>Unidade</b>	<b>Folha 19-C</b> <b>Figueira da Foz</b> Carta Geol. de Portugal 1/50 000 <b>(Rocha et al., 1981)</b>	<b>Folha 19- A</b> <b>Cantanhede</b> Carta Geol. de Portugal 1/50 000 <b>(Barbosa et al., 1988)</b>	<b>Carta Geológica</b> <b>Coimbra (Norte)</b> 1/ 25 000 <b>(Soares et al., 1985)</b>	<b>Folha Norte</b> Carta Geol. de Portugal 1/500 000
Aluviões	Holocénico			Aluviões	Aluviões
Areias Vermelhas de Estádio				Cascalheiras e Areias de Coimbra e Eiras	
Conglomerados de Taveiro	Plistocénico			Depósitos de Pedrulha	
Depósitos de Ceira		----	----	Areias Vermelhas de Ingote	Terraços e Cascalheiras
Areias Vermelhas de Ingote					
Conglomerados de Espírito Santo					
Formação de Antanho	Pliocénico	----	----	----	Formação de Aguada e Barracão
Formação de Bom Sucesso	Paleogénico	----	----	----	Formação de Bom Sucesso
Formação de Taveiro	Camp.-Maast.	Arenitos e Argilas de Taveiro	Arenitos e argilas de Viso	----	Areias e Argilas de Taveiro e Viso
Formação de Rebolia-Alencarce	Coniac.-Sant.	----	Grés de Oiã	----	Grés de Oiã
Formação de Lousões	Turoniano	Arenitos finos de Lousões	Grés de Furadouro	Grés de Furadouro	Grés de Furadouro

Formação de Trouxemil		Cenom. sup.	Calcários Apinhoados de Costa de Arnes	Calcários de Tentúgal	Calcários de Trouxemil	Calcários de Tentúgal
Formação de Figueira da Foz		Apt. inf.- Cenom. sup.	Arenitos de Carrascal	Arenitos de Carrascal	Grés de Grada-Barcouço	Arenitos de Carrascal
Formação de Póvoa da Lomba		Aal. méd.-Baj. inf.	----	Calcários Margosos de Póvoa da Lomba	Calcários Margosos de Pedrulha	Calcários de Póvoa da Lomba
Formação de S. Gião		Toarc.-Aal. inf.	----	Margas Calcárias de S.Gião	Margas e margo- Calcários de Adémia	
Formação de Lemedede		Dom. sup.-Toarc. inf.	----	Calcários Margosos de Lemedede	Calcários Margosos do Loreto	Margas e Calcários de Quiaios e S. Gião
Formação de Vale das Fontes		Carix.-Dom. inf.	----	Margas e Calcários Margosos de Vale das Fontes	Margas de Eiras	
Formação de Conraria	Grupo de Silves	Trias. sup.- méd.	----	----	Camadas de Conraria	Grés de Silves
Formação de Castelo Viegas			----	----	Camadas de Castelo Viegas	
Formação de Pereiros		Hetang.	----	----	Camadas de Pereiros	
Grupo das Beiras		Proter. Sup.	----	----	----	Xistos, grauvaques, chertes negros, vulcanitos ácidos
Série Negra		Neoprot.	----	----	Complexo Cristalofílico	Super Grupo do Douro-Beiras (Complexo Xisto-grauváquico)





# ANEXO 6

## Coordenadas das amostras

Ref. <sup>a</sup>	Coord. Militares		Ref. <sup>a</sup>	Coord. Militares		Ref. <sup>a</sup>	Coord. Militares		Ref. <sup>a</sup>	Coord. Militares	
	x	y		x	y		x	y		x	y
1	155331,1	355125,2	49	166236,3	362067,1	97	174091,5	357137,1	139	171827,0	363628,1
2	154513,4	355734,3	50	165153,2	362009,7	98	175287,7	357099,4	140	172249,2	363323,9
3	154630,2	356208,5	51	164292,9	360998,6	99	159102,9	356123,1	141	171999,6	363376,3
4	155713,1	356339,6	52	163132,4	361103,0	100	160173,3	356113,7	142	172746,2	362993,8
5	156135,4	356469,5	53	162328,5	361204,6	101	160232,9	357093,5	143	172746,2	362993,8
6	157213,7	356626,3	54	161253,7	361224,5	102	159182,2	357073,8	144	172731,5	361493,3
7	158184,8	357188,6	55	159435,1	360319,8	103	161163,3	357094,4	145	170230,7	361522,8
8	159394,4	357770,2	56	161284,4	360168,7	104	170160,0	361047,3	146	170240,8	362555,2
9	160380,7	357791,6	57	162212,3	360211,6	105	170283,6	361920,5	147	171738,4	361519,1
10	159988,3	358815,5	58	163303,8	360114,9	106	170119,3	362816,5	148	172236,4	361501,2
11	159598,4	359830,3	59	164306,4	360226,1	107	171136,2	363164,7	149	171235,9	362008,2
12	158714,1	359391,1	60	165209,0	360346,4	108	172199,4	363037,2	150	170769,3	362989,2
13	157777,5	359118,6	61	166400,2	361033,0	109	172015,8	361962,5	151	Coord. média 173645,8;361835,6	
14	161921,3	357425,8	62	167175,9	361068,5	110	171095,1	362132,6	152		
15	158751,5	358618,2	63	167177,6	362155,9	111	169126,1	361914,8	153		
16	159725,7	358995,2	64	168435,8	361636,2	112	176482,9	368205,5	154		
17	160260,4	358053,1	65	169337,1	361189,4	113	176298,7	367069,9	155		
18	161213,3	358460,6	66	168270,7	360996,7	114	175441,6	367103,3	156		
19	162246,6	358747,7	67	177186,2	355944,4	115	175379,0	368064,3	157		
20	163258,1	359054,9	68	176136,3	354868,2	116	174387,3	367013,5	158		
21	170246,5	358788,5	69	176118,0	355970,8	117	154194,6	357245,6	159		
22	169996,6	357257,9	70	178300,7	355121,1	118	154368,8	358288,4	160		
23	169988,1	357096,8	71	179341,6	356093,4	119	154111,4	359074,3	161		
24	170386,9	360000,3	72	180024,4	356964,1	120	154310,2	360172,9	162		
25	173221,5	361112,4	73	178096,6	355945,5	121	155330,6	360162,9	163	171595,7	364010,5
26	172376,1	361155,7	74	179271,1	356969,4	122	156231,1	359143,6	164	172257,9	364003,1
27	171179,2	361022,3	75	179036,0	357890,1	123	156211,1	360174,3	165	171274,6	364019,7
28	171526,8	360450,0	76	178289,4	357754,4	124	157200,5	360164,6	166	170762,4	364017,7
29	172318,3	359645,0	77	178122,1	356908,6	125	158311,7	360133,7			
30	164130,3	356955,4	78	179228,2	360965,6	126	158322,4	361224,1			
31	163308,1	357067,5	79	179282,5	362020,5	Perfil 1	175169,9	361045,4			
32	162137,5	358085,4	80	179266,1	362897,0	Perfil 2	176659,8	359932,2			
33	163316,2	358613,1	81	178240,2	362947,1	Perfil 3	176333,8	356304,5			
34	164264,0	358859,9	82	176227,0	362715,7	Perfil 4	160076,4	358016,7			
35	164969,7	358900,1	83	178245,9	361996,6	Perfil 5	179754,8	356063,8			

Coordenadas das amostras (continuação).

Ref.ª	Coord. Militares		Ref.ª	Coord. Militares		Ref.ª	Coord. Militares		Ref.ª	Coord. Militares			
	x	y		x	y		x	y		x	y		
36	168205,9	359073,5	84	177292,4	361992,9	Perfil 6	160654,1	361571,5					
37	167237,8	359107,3	85	177282,4	362909,4	127	Coord. Média 173639,1;361915,1						
38	166133,0	358974,7	86	176332,3	362025,3	128							
39	165266,8	358077,8	87	175355,1	361944,9	129							
40	164274,4	357974,4	88	175256,0	362962,3	130							
41	168197,7	358037,1	89	174281,7	362969,8	132							
42	169180,0	358022,5	90	174293,0	362082,3	133							
43	169206,8	359124,7	91	173158,1	362966,8	134							
44	170194,2	358095,6	92	173421,8	361897,8	135							
45	171068,5	356965,6	93	174309,9	357979,4	131						170201,0	363594,0
46	172168,2	358011,3	94	173311,0	358040,1	136						168244,7	363037,9
47	172290,9	358996,5	95	173085,5	357073,9	137	173835,3	361832,7					
48	173184,5	359017,8	96	172143,0	357063,1	138	171750,8	363503,8					

## ANEXO 7

### Nomenclatura dos horizontes nos perfis de solo

De um modo geral, designam-se por horizontes **A** os horizontes superiores, em que se verificam processos de deslocação e migração de substâncias lixiviadas pelas águas de infiltração. Também se denominam como *horizontes lixiviados* ou *eluviais*. Os horizontes inferiores são enriquecidos em elementos vindos da superfície e são chamados *horizontes de acumulação* ou *iluviais*. Designam-se pela letra **B**.

Em geral, designam-se por *solum* ou *solo verdadeiro*, no sentido pedológico, o conjunto de horizontes A e B (ou o horizonte A, no caso de não de existir horizonte B) (Costa, 1999).

A letra **C** refere-se aos materiais não consolidados, resultantes da desagregação da rocha-mãe *in situ*, mas não suficientemente modificada para se poder considerar como fazendo parte do *solum*\*. Para designar a rocha consolidada utiliza-se a letra R.

Qualquer destes horizontes pode subdividir-se ou pode faltar num perfil.

Segue-se um resumo da nomenclatura e designação internacional dos horizontes (Costa, 1999; Lapa, 1993).

**A** – Horizonte de superfície, contendo matéria orgânica, muitas vezes empobrecido em elementos finos, ou em ferro, por lixiviação. É o horizonte mais sujeito às influências do clima, plantas e animais. Podem ainda distinguir-se os sub-horizontes A1, A2 e A3. A1 é o horizonte superficial dos solos minerais, contendo matéria orgânica mais ou menos humificada, intimamente misturada com a matéria mineral; A2 é um horizonte mais claro que o anterior, devido à eluviação de argila, ferro e alumínio, sendo tipicamente um horizonte eluvial. A3 é um horizonte de transição para B, mais parecido com A do que com B.

**(A)** - Esta designação é adoptada para solos incipientes, em que não se distingue, à simples vista, um horizonte de acumulação de matéria orgânica (isto é, um A1). Nestes solos, pode existir uma zona de maior abundância de raízes, com elevada população de organismos e, ao microscópio, pode observar-se alguma formação de húmus\*\*.

---

\*a letra C foi utilizada, inicialmente, para indicar a rocha-mãe que, em nível superior, deu origem ao *solum*. Os autores americanos designam por *horizonte C* ou *material originário do solo*, correspondendo a: 1) material desagregado *in loco* a partir da rocha-mãe consolidada, mas ainda não suficientemente modificada para se poder considerar como fazendo parte do *solum*; ou 2) rocha de sua natureza não consolidada, a partir da qual, em nível superior, se diferenciou o *solum* (Costa, 1999).

\*\*a palavra “húmus” pode empregar-se com dois sentidos diferentes (Lapa, 1993):

linguagem científica – designa a fracção humificada, transformada por via biológica e de natureza coloidal;

linguagem corrente – significa a matéria orgânica global – neste sentido deverá falar-se de “húmus bruto”.

---

**B** – Horizonte enriquecido por iluviação em elementos finos ou amorfos; argilas, óxidos de ferro e de alumínio e, por vezes, húmus.

**(B)** – Adopta-se este símbolo, quando o horizonte B resulta da alteração do material *in situ*, com obliteração da textura original da rocha e com formação de minerais de argila e/ou óxidos.

**C** – Material original a partir do qual se formaram A e B.

**G** - Horizonte de cor cinzenta esverdeada, rico em ferro ferroso, com manchas vermelhas formadas no seio ou no limite superior de uma toalha de água permanente.

**R** – Rocha bruta subjacente.

Subdivisões dos horizontes principais:

utilizam-se letras minúsculas, em índice, para designar as subdivisões dos horizontes principais, letras essas que são escolhidas de modo a aludir à natureza do componente essencial; também se utilizam índices numéricos, que se referem à variação quantitativa desse componente.

Horizontes **A**:

**A<sub>00</sub>** (ou **L**) – Manta morta ou liteira, restos de vegetais identificáveis.

**A<sub>0</sub>** (ou **0**) – Horizonte orgânico com estrutura original modificada ou destruída (mais de 30% de matéria orgânica).

**A<sub>1</sub>** ou **A<sub>h</sub>** – Horizonte misto contendo uma mistura de matéria orgânica (menos de 30%) e de matéria mineral.

**A<sub>p</sub>** – Horizonte húmifero trabalhado, portanto homogeneizado e com limite inferior nítido.

**A<sub>2</sub>** (ou **A<sub>e</sub>**, **E**) - horizonte pobre em matéria orgânica, muitas vezes lixiviado em argila e em sesquióxidos, cor clara (horizonte dito eluvial).

**A/B** – Horizonte de transição entre os horizontes eluvial e iluvial marcando um princípio de acumulação de elementos finos ou amorfos.

Horizontes **B**:

**B<sub>t</sub>** – Acumulação de argila (T= ton, argila em alemão)

**B<sub>h</sub>** – Acumulação húmica

**B<sub>fe</sub>** ou **B<sub>s</sub>** – Acumulação dominante de sesquióxidos

**B<sub>b</sub>** – Horizonte placique, franja de alios sinuosa.

---

**Horizontes G – Gley:**

neste tipo de horizontes verifica-se uma permanente, ou quase permanente, saturação em água. A renovação de oxigénio é nula ou quase nula, propiciando a redução dos óxidos de ferro.

**G<sub>o</sub>** – Gley oxidado – é um horizonte permanentemente, ou quase, saturado em água e caracterizado pela precipitação de óxidos férricos, sob a forma de manchas ou pequenas concreções vermelhas sobre fundo cinzento; este horizonte corresponde à zona de oscilação do nível de água.

**G<sub>r</sub>** – Gley reduzido – é um horizonte permanentemente saturado em água onde dominam os fenómenos de redução. Tom uniforme cinzento esverdeado pela acumulação de ferro ferroso, por vezes com pequenas concreções avermelhadas.

Utilizam-se ainda certos índices que se aplicam, segundo os casos, aos horizontes A, B e C:

**g** – indica gleização pouco pronunciada (horizontes temporariamente saturados em água)

**ca** – indica enriquecimento em carbonato de cálcio

**cs** – indica enriquecimento em sulfato de cálcio

**sa** – horizonte enriquecido em sais (diferentes os acima indicados).

## ANEXO 8

Medições magnéticas.

Amostra	K ( $10^{-6}$ SI)	MRN ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>100</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>300</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )
1	278,97	3,77	1415,58		1294,46
2	310,60	3,61	1374,71		1258,01
3	311,80	4,15	1592,84		1503,89
4	156,23	1,75	689,52		589,27
5	127,83	1,22	556,86		453,65
6	96,87	1,07	407,69		303,10
7	67,03	2,97	365,01		301,48
8	117,03	1,14	723,27		697,70
9	90,03	0,65	425,62		352,06
10	133,90	1,46	603,89		526,99
11	113,13	2,21	512,15		441,64
12	58,00	0,82	267,23		211,66
13	75,97	1,19	327,25		301,29
14	56,13	2,87	571,46		463,38
15	145,67	2,76	701,18		634,32
16	90,73	1,72	390,35		293,84
17	160,83	2,63	737,23		641,32
18	115,07	1,69	552,92		487,79
19	77,63	1,62	377,66		291,63
20	68,63	0,51	414,37		338,14
21	171,17	3,26	1279,85	829,08	1145,99
22	279,53	4,39	1617,26	1182,18	1482,63
23	95,57	8,77	964,76	651,57	897,28
24	252,60	7,12	2664,14	2081,82	2652,22
25	328,53	313,63	1985,93	1838,43	1978,33
26	209,00	312,28	1552,66	1263,73	1550,65
27	349,27	310,41	3296,93	2859,35	3149,86
28	328,70	313,29	2707,08	2135,18	2434,40
29	30,33	312,16	568,78	436,86	526,82
30	38,63	313,43	566,20	318,60	566,91
31	177,50	2,13	1099,80	581,66	963,81
32	125,57	15,73	816,25	650,99	737,78
33	122,13	4,90	1151,81	892,35	1109,06
34	76,20	2,48	462,54	377,03	426,39
35	206,63	5,62	1425,21	1340,57	1370,60
36	234,83	1,71	1720,77	1419,24	1627,52
37	69,73	1,56	476,27	231,39	373,34
38	80,23	0,35	562,68	397,75	492,76
39	23,90	1,49	213,84	127,92	189,52
40	99,73	1,09	504,45	55,93	244,83



Medições magnéticas (continuação).

Amostra	K ( $10^{-6}$ SI)	MRN ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>100</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>300</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )
41	42,03	1,54	379,76	25,87	266,11
42	481,47	1,68	3227,56	2673,35	3058,55
43	390,70	1,20	2232,48	1757,66	2059,24
44	19,43	2,41	187,39	108,50	160,52
45	178,70	12,75	1227,55	1079,60	1183,86
46	63,10	2,71	357,14	244,13	318,42
47	86,53	2,26	633,19	481,87	583,96
48	762,83	11,34	3517,73	3167,85	3382,97
49	137,90	1,11	862,63	645,45	814,09
50	80,17	3,02	588,93	390,95	543,90
51	105,93	3,64	730,29	542,43	644,30
52	234,37	3,10	1357,38	1028,08	1227,94
53	48,83	2,10	400,54	262,89	352,32
54	71,57	1,02	826,59	589,91	785,00
55	73,90	2,62	402,47	284,00	346,19
56	31,03	1,35	128,94	50,69	95,24
57	74,00	1,72	352,50	255,01	310,42
58	149,30	1,58	802,83	683,85	751,74
59	204,17	3,40	1436,64	1263,60	1361,78
60	78,63	2,15	372,76	259,37	328,46
61	106,50	1,44	589,60	494,11	546,70
62	420,00	5,24	1952,31	1684,04	1851,66
63	89,67	3,64	800,55	565,31	674,01
64	187,17	3,71	1049,68	892,01	989,84
65	143,57	2,91	777,04	623,25	719,32
66	58,30	0,93	279,57	161,01	223,35
67	556,97	2,64	3160,71	2732,59	2980,33
68	88,97	0,62	749,64	490,96	621,34
69	34,00	1,14	187,23	100,04	138,39
70	794,80	6,72	13279,11	12038,93	13010,53
71	875,53	53,82	9385,57	8569,58	9338,44
72	477,10	2,07	4018,45	2941,45	3781,44
73	458,33	5,01	3993,66	3296,01	3876,57
74	1451,47	47,10	14541,52	14008,38	14140,34
75	757,23	52,76	8073,25	5717,84	5851,13
76	872,40	48,33	13467,58	12716,12	13063,82
77	1803,33	21,90	14793,45	14324,13	14608,86
78	238,03	2,82	2702,57	1730,83	2072,02
79	365,83	143,10	4860,36	3649,45	4190,70
80	66,73	2,26	879,28	337,33	418,21
81	423,57	45,67	10905,04	9766,79	10394,75
82	76,70	0,91	654,21	353,33	466,32
83	337,87	9,54	3871,70	3470,40	3730,91

## Medições magnéticas (continuação).

Amostra	K ( $10^{-6}$ SI)	MRN ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>100</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>300</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )
84	187,00	3,13	4261,18	1181,93	2176,77
85	115,53	1,01	1101,00	808,24	1010,10
86	63,13	0,80	631,70	14,35	152,31
87	581,00	2,69	2470,38	2101,59	2349,04
88	156,87	8,98	2060,42	1772,23	1876,20
89	270,20	2,07	868,89	734,75	799,17
90	139,67	2,50	980,84	797,12	926,99
91	150,00	1,32	1068,50	903,83	1046,40
92	359,03	70,12	5839,17	3309,71	4624,14
93	2713,23	15,01	19597,09	18834,93	19018,75
94	331,50	2,03	2226,36	2077,88	2174,53
95	187,90	4,29	2412,84	1708,47	2382,33
96	37,07	2,36	329,09	208,10	282,42
97	189,20	10,48	970,41	786,55	909,24
98	89,47	0,93	509,11	488,93	500,92
99	38,77	0,75	350,57	157,16	290,83
100	109,83	2,38	818,10	449,64	713,38
101	73,70	6,60	719,26	272,23	514,40
102	222,23	3,24	1205,50	964,92	1181,42
103	109,70	4,79	819,03	524,28	723,59
104	138,33	2,57	647,05	459,69	569,84
105	110,00	1,57	484,47	357,90	435,23
106	482,83	4,93	1365,49	1025,00	1127,11
107	318,97	3,98	1711,81	1502,68	1646,96
108	278,13	3,10	1459,34	1211,62	1372,09
109	178,30	2,50	779,70	617,90	728,91
110	219,03	1,68	956,27	802,27	905,53
111	86,37	4,19	463,31	343,78	411,87
112	2389,83	22,15	8865,90	8439,03	8531,23
113	217,27	1,68	746,81	632,72	695,15
114	246,33	1,54	1524,97	1142,78	1414,42
115	55,27	0,73	254,99	203,98	234,28
116	661,50	9,54	5309,15	4940,29	5261,98
117	75,47	1,13	688,21	438,43	608,64
118	54,07	1,30	463,80	188,82	282,75
119	56,13	0,90	170,39	101,32	130,96
120	82,43	1,50	490,13	407,05	470,18
121	54,47	1,38	522,83	330,91	443,91
122	53,63	1,03	280,30	190,11	254,35
123	47,77	1,09	415,63	253,18	345,06
124	142,57	2,03	865,09	669,73	813,41
125	251,87	2,94	2602,18	2089,96	2502,63
126	47,13	1,45	434,90	254,22	363,24
127	320,83	2,99	2068,49	1694,98	1969,67

Medições magnéticas (continuação).

Amostra	K ( $10^{-6}$ SI)	MRN ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>100</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>300</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )
128	346,70	1,54	3400,53	2485,66	3222,06
129	401,90	4,49	3673,98	2639,60	3468,92
130	434,13	2,73	4575,62	3389,85	4430,08
131	229,03	2,04	1572,94	1157,07	1330,84
132	266,73	7,15	1709,29	1702,67	1706,51
133	373,97	1,94	1971,33	1671,80	1858,18
134	291,60	1,26	1618,76	1385,95	1536,38
135	294,03	2,15	1711,49	1359,74	1610,55
136	300,67	2,40	1668,87	1552,84	1598,30
137	2593,27	2479,21	21470,46	15202,55	20886,00
138	144,20	0,20	827,31	567,32	713,55
139	198,30	3,04	867,83	670,39	804,85
140	257,93	2,28	1387,53	1117,95	1313,97
141	281,70	2,32	1335,59	1079,39	1260,17
142	241,67	2,10	1260,52	1089,63	1231,59
143	369,33	5,41	1897,67	1723,48	1855,77
144	300,23	1,34	1576,89	1335,32	1517,99
145	62,67	1,66	229,36	95,71	174,60
146	259,90	2,28	1218,63	996,88	1141,49
147	256,50	11,77	1386,70	1216,72	1336,01
148	317,60	2,95	1777,44	1599,91	1702,34
149	40,27	1,87	153,64	51,68	114,68
150	337,53	4,43	1875,17	1646,65	1804,75
151	296,83	2,46	2660,67	1967,80	2487,92
152	349,47	8,51	3964,48	2825,34	3684,79
153	210,03	4,92	1197,22	908,54	1065,31
154	261,70	2,76	1435,31	1199,18	1339,26
155	178,07	2,98	925,82	782,66	893,95
156	238,80	2,28	1228,75	1033,62	1157,38
157	249,37	2,38	1303,60	1082,95	1240,24
158	261,10	1,78	1487,25	1071,50	1395,80
159	223,23	0,69	1300,54	1075,39	1216,46
160	241,67	1,61	1325,14	1057,30	1235,97
161	190,53	2,05	1301,02	735,26	966,07
162	139,30	0,93	961,64	400,94	635,17
163	140,50	0,59	658,86	476,00	578,81
164	185,63	2,24	789,33	619,06	725,72
165	215,63	3,07	857,10	723,33	839,52
166	234,03	1,41	966,82	777,17	893,01
P1A	443,03	0,34	1336,78	1061,19	1152,80
P1Bc	189,03	7,76	1488,65	1117,73	1236,21
P1Bb	652,37	2,23	350,62	211,44	272,91
P1C1	274,50	2,35	719,38	437,39	527,27

## Medições magnéticas (continuação).

Amostra	K ( $10^{-6}\text{SI}$ )	MRN ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>1T</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>100</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )	MRI <sub>300</sub> ( $\text{mAm}^{-1}$ )
P1C2	133,73	2,35	388,88	125,53	199,06
P2A1	71,57	1,49	522,55	325,96	364,07
P2A2	654,60	30,69	8096,26	7141,09	7931,26
P2B	79,00	1,39	358,90	31,88	56,94
P2C	56,93	1,57	398,27	234,29	291,42
P3A	201,43	3,34	1475,64	1021,37	1199,87
P3B	135,20	2,26	1212,43	510,34	748,53
P3C1	45,13	1,27	526,89	20,64	212,48
P3C2	35,93	0,98	613,34	72,75	85,06
P4A1	83,97	1,53	577,12	247,01	483,44
P4A2	200,67	2,78	943,96	544,69	848,73
P4B	162,13	2,59	947,88	592,45	848,06
P4B/C	167,80	4,78	958,99	543,73	843,68
P4C	65,90	1,08	495,60	190,46	402,32
P5A	3102,57	54,70	22909,62	22393,81	22519,47
P5A/B	3108,30	50,10	23166,11	22537,55	22571,32
P5B	2913,90	36,82	23335,84	21747,96	22963,06
P5B/C	3541,80	72,29	25490,22	24424,28	25402,26
P5C	1729,00	4,86	12434,73	12007,04	12374,20
P5.5	3149,17	37,31	24362,35	23778,01	23971,60
P5.10	2673,87	48,72	20361,23	19597,71	20261,10
P5.15	2636,40	23,40	19915,43	18943,34	19573,77
P5.20	2650,80	66,31	19569,95	18684,78	19320,87
P5.25	2905,43	97,20	21556,54	20656,07	21195,97
P5.30	3111,07	94,14	24167,34	23285,73	23811,62
P5.35	3228,30	23,96	24663,54	23282,10	23899,02
P5.40	3513,38	100,87	27746,85	26620,78	27191,26
P5.45	3306,70	72,38	23879,31	22487,48	22972,18
P5.50	2514,27	5,31	17416,60	15416,88	15924,65
P5.55	3447,70	96,85	30999,44	29204,80	30296,13
P5.60	2800,13	56,53	19890,72	19187,51	19559,00
P5.65	3659,17	69,73	27112,01	25751,01	26622,83
P5.70	3571,33	36,92	24296,43	23847,42	24200,74
P5.75	3120,73	40,10	21631,65	21014,03	21504,81
P5.80	3262,30	41,31	26634,86	24939,12	26348,55
P5.85	3040,57	30,70	21971,68	21265,36	21846,60
P5.90	2412,10	33,93	16463,92	15430,27	16055,18
P6A1	14,03	1,33	155,31	86,55	136,88
P6A2/E	34,03	1,21	235,91	152,99	212,39
P6A2/B	63,20	2,61	413,81	294,31	371,38
P6B	29,30	1,77	196,14	101,60	157,96
P6B/C	29,30	1,07	225,72	128,06	203,51
P6R	28,60	1,17	216,19	113,57	182,69