

# São os Podzóis dominantes nas formações arenosas do litoral português? O caso da Mata Nacional de Leiria

## Are Podzols dominant in sand formations of the Portuguese Litoral? The case of the Leiria National Forest

Fernando Monteiro\*, Paulo Marques e Manuel Madeira

Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia - Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, E-mail: \*fgmonteiro@isa.ulisboa.pt, autor para correspondência

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA15135>

Recebido/Received: 2015.07.02  
Aceite/Accepted: 2015.09.30

### RESUMO

O conhecimento sobre os *Podzóis* que ocorrem em Portugal é escasso. Além de insuficientemente caracterizados, a sua verdadeira extensão e distribuição geográfica não é conhecida e o seu enquadramento taxonómico é controverso. Assim, foi desenvolvido um estudo visando aprofundar o conhecimento sobre tais solos. Estudaram-se as características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas de 22 pédones seleccionados na Mata Nacional de Leiria, formados em condições consideradas representativas daquelas em que os *Podzóis* ocorrem maioritariamente no País. Os solos formados em tais condições compreendem tanto *Podzóis* como *Arenossolos sensu* WRB 2006, sendo os últimos claramente dominantes. Os *Podzóis* apresentam horizontes alvícos muito espessos e horizontes espódicos relativamente incipientes, bastante escuros, com teores de matéria orgânica (MO) pouco acima do mínimo definido como diagnóstico, e com baixos teores de Al e especialmente de Fe. Os *Arenossolos* incluem, por um lado, solos com morfologia semelhante à dos *Podzóis* (mas com menor expressão de acumulação iluvial de MO e de Fe e Al) e, por outro, *Arenossolos* que não apresentam aquelas características (os dominantes), mas em que podem ocorrer horizontes alvícos bem expressos. Os primeiros destes *Arenossolos* constituem *intergrades* para os *Podzóis* e não são satisfatoriamente enquadráveis no sistema da WRB. As características dos *Podzóis* estão fortemente associadas à fraca alterabilidade e elevada permeabilidade do substrato litológico (sedimentos quartzosos não consolidados).

**Palavras-chave:** *Arenossolos*, carbono orgânico, classificação de solos, horizonte espódico, ferro e alumínio livres.

### ABSTRACT

The knowledge on the *Podzols* which occur in Portugal is scarce. Besides its morphological characterization, their actual extension and distribution are unknown, and its taxonomy is controversial. Therefore, 22 pedons formed under conditions considered representative of those in which *Podzols* mostly occur in the country were selected in the Mata Nacional de Leiria, and their morphological, physical, chemical and mineralogical characteristics were studied. Soils developed in such conditions are both *Podzols* and *Arenossolos sensu* WRB 2006, but the latter are clearly predominant. The *Podzols* frequently show thick albic horizons and incipient spodic horizons; the latter are dusky, but show organic matter (OM) contents close the minimum threshold considered as diagnostic criteria for spodic horizons, and low content in Al and Fe. A wide spectrum of characteristics is observed in the *Arenossols*. Some of them present profiles with morphology close to that of the *Podzols*, but with a low illuvial accumulation of OM (and Fe e Al components), and the others (the predominant *Arenossols* in the study area) do not present intergrade characteristics, although they can show expressed albic horizons. The former *Arenossols* correspond to *intergrades* of *Podzols* which are not satisfactorily fit into the recent WRB versions. The characteristics of *Podzols* are strongly dependent on the low weatherability and high permeability of the lithological substrate (non consolidated quartzeous sediments).

**Keywords:** *Arenossols*, free aluminium and iron, organic carbon, soil classification, spodic horizon.

## Introdução

Os *Podzóis* ocorrem quase exclusivamente em regiões de clima húmido e muito particularmente nas regiões boreais (Duchaufour, 1977). Todavia, a ocorrência destes solos não é condicionada em absoluto pelo regime de temperatura, pois encontram-se também em regiões temperadas e mesmo tropicais (*Podzóis intrazonais*), em especial sobre rochas siliciosas muito permeáveis e pobres em catiões não ácidos (Driessen *et al.*, 2001). Em Portugal, os *Podzóis* foram reconhecidos quase exclusivamente na orla litoral do País, em correspondência com formações do Cenozóico recente, a Sul do Tejo, em sedimentos arenáceos consolidados e não consolidados mio-pliocénicos e pliocénicos (que incluem grande parte das bacias do Tejo e do Sado) e, no centro do país, em formações dunares e outros sedimentos miocénicos e plio-pliocénicos (Cardoso, 1965; Cardoso *et al.*, 1973). A extensão que os *Podzóis* ocupam em Portugal Continental nunca foi, no entanto, cabalmente esclarecida, mas afirma-se que os mesmos ocorrem em cerca de 7% da área do território.

O conhecimento sobre os *Podzóis* que ocorrem em Portugal é escasso, desconhecendo-se a sua verdadeira extensão e distribuição geográfica; além disso, pouco se conhece sobre as suas características físicas, químicas e biológicas (SPCS, 2004), bem como sobre os factores determinantes do processo da sua formação. A caracterização disponível sobre estes solos assenta num reduzidíssimo número de pédones reconhecidos em áreas restritas e não inclui os parâmetros suficientes para o seu enquadramento taxonómico nos actuais sistemas de classificação de solos de índole universal – WRB (IUSS Working Group WRB, 2006) e *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2014).

De acordo com a WRB 2006, *Podzóis* são solos com um horizonte espódico cujo topo está a menos de 2 m da superfície mineral do solo. Na *Soil Taxonomy*, os *Espodossolos* são solos que têm um horizonte subsuperficial (espódico), ou um horizonte Ap, constituídos por, pelo menos, 85% de *materiais espódicos* (Soil Survey Staff, 2014). Salvo diferenças de pormenor, estes materiais são definidos de forma semelhante à do horizonte espódico considerado na WRB 2006. Embora se considere que os *Solos Podzolizados* da Classificação dos Solos de Portugal apresentam um horizonte deste tipo (Cardoso, 1965 e 1974) e que, portanto, serão correlacionáveis com

os *Podzóis* (WRB) e os *Espodossolos* (*Soil Taxonomy*), a caracterização que deles é feita na Carta dos Solos de Portugal apenas inclui a distribuição em profundidade do carbono orgânico e do “ferro livre”. Dos outros estudos realizados sobre estes solos avultam os respeitantes à Mata Nacional de Leiria (Azevedo, 1944; Cabrita, 1956; Oliveira, 1967; Cardoso *et al.*, 1973), nos quais, de uma forma geral, foram classificados como *Solos Podzolizados*, ou *Podzóis - sensu* FAO (1974). Porém, estes estudos privilegiaram sobretudo características morfológicas do perfil e não são elucidativos quanto às características físicas e químicas.

Num estudo mais detalhado sobre a distribuição no perfil das diferentes formas de carbono orgânico, ferro e alumínio em pédones representativos de diversas unidades dos *Solos Podzolizados*, Gushima e Madeira (1986) concluíram que, à luz dos critérios vigentes à época, nem todos esses solos preenchem os requisitos para serem considerados *Podzóis*. Mais recentemente, Madeira *et al.* (2007) apontaram para conclusão semelhante e sugeriram que os *Podzóis* deverão ocupar uma extensão muito menor do que aquela que lhes foi atribuída (Cardoso *et al.*, 1973).

A extensão atribuída aos *Podzóis* em Portugal Continental e a insuficiência do conhecimento sobre os mesmos e sobre a forma como interagem nos ecossistemas recomenda o aprofundamento do seu estudo. Importa conhecer com maior detalhe as características destes solos, o espectro da respectiva variação e os factores que determinam a sua ocorrência local e regional, de forma a permitir tanto o seu correcto enquadramento taxonómico, como a compreensão da sua distribuição geográfica e das suas funções nos ecossistemas. A Mata Nacional de Leiria é particularmente apropriada a um estudo desta índole, visto ser representativa das condições em que se considera que os *Podzóis* ocorrem maioritariamente em Portugal, quer quanto à natureza do substrato geológico, quer à da cobertura vegetal, constituída por povoamentos de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton), espécie que se admite estar presente na região litoral-centro desde a última glaciação (Aguiar *et al.*, 2007). Por outro lado, os povoamentos de pinheiro bravo são ecossistemas sensíveis às práticas de gestão (Madeira *et al.*, 2009), devendo estas estar fundamentadas no conhecimento dos solos em que os mesmos estão instalados.

Neste contexto, estudaram-se diversos pédones da Mata Nacional de Leiria com o objectivo de i) conhecer detalhadamente as suas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, bem como o teor e a distribuição em profundidade das diferentes formas de ferro, alumínio e silício, ii) compreender a forma como a natureza do material originário e o relevo local influenciam as características e a formação destes solos no País e iii) esclarecer se os *Solos Podzolizados* são de facto susceptíveis de enquadramento nos *Podzóis* (IUSS Working Group WRB, 2006) e nos *Espodosolos* (Soil Survey Staff, 2014). O esclarecimento destas questões será também um contributo para a realização de uma síntese cartográfica nacional.

## Material e métodos

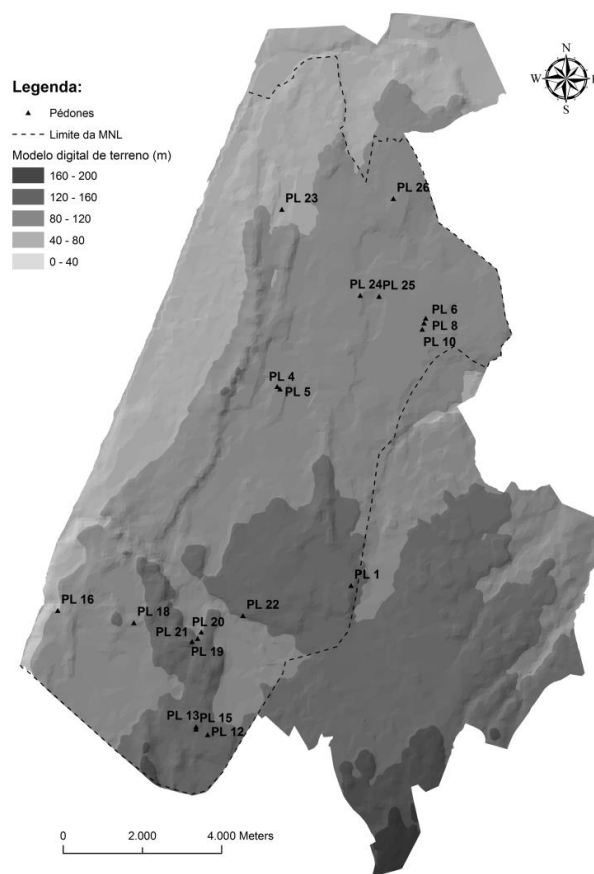
### Área de estudo

A Mata Nacional de Leiria (MNL) ocupa uma área aproximada de 11 000 ha e situa-se no concelho da Marinha Grande. Esta área insere-se numa bacia sedimentar detrítica situada no bordo oeste da Orla Mesoceno-zóica Ocidental, ou Bacia Lusitaniana, e é constituída essencialmente por sedimentos quaternários e neogénicos (siltes, areias e areolas), assentes em discordância sobre formações jurássicas e cretácicas (Zbyszewski, 1965; Zbyszewski e Torre de Assunção, 1965). Pela extensão que ocupam destacam-se as areias de duna (quaternárias) e, na parte mais oriental da Mata, afloramentos pliocénicos constituídos por areias de granulometria variável, que incluem frequentemente intercalações de diversa natureza – conglomeráticas, argilosas, siltíticas, areias micáceas e outras (Zbyszewski e Torre de Assunção, 1965). O relevo apresenta-se plano a ondulado em função da expressão das dunas, as quais formam três cordões principais sensivelmente paralelos à costa.

Segundo a classificação de Köppen o clima é do tipo Csb. A temperatura média anual do ar é de 14,1-14,2°C, registando-se os valores médios mensais mais elevados nos meses de Julho e Agosto (17,8 e 19,2°C, respectivamente em S. Pedro de Moel e Marinha Grande) e os mais baixos em Janeiro (9,9°C). A precipitação média anual varia entre 710 mm (S. Pedro de Moel) e 909 mm (Marinha Grande); o período de maior precipitação ocorre entre Outubro e Maio, com um máximo mensal em Janeiro (respectivamente 113 e 133 mm); a precipitação entre Junho e Setembro é escassa, ocorrendo os valores

mínimos em Julho (6,3 mm na Marinha Grande) e em Agosto (7,1 mm em S. Pedro de Muel). A humidade relativa média anual do ar às 9 horas é de 81% em S. Pedro de Muel e de 84% na Marinha Grande (INMG, 1991).

A MNL é constituída por povoamentos ordenados de *Pinus pinaster* Aiton, com diversas classes de idade. A vegetação sob coberto compreende um elevado número de espécies arbustivas e herbáceas, cuja distribuição e abundância relativa são muito afectadas pelas operações de gestão do pinhal. As espécies *Simethis mattiazzi* (Vand.) Sacc., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn e *Scilla monophyllos* (Link in Schra) estão entre as mais abundantes nos casos em que a remoção da vegetação sob coberto tenha sido feita recentemente; com o decurso do tempo após tais intervenções tendem a tornar-se dominantes as espécies *Ulex europaeus* subsp. *latebracteatus* L., *Calluna vulgaris* (L.) Hull e *Cistus salvifolius* L..



**Figura 1** - Área da Mata Nacional de Leiria (MNL), altimetria e localização dos pédones estudados (Pédones PL2 e PL3 na vizinhança de PL1; Pédone PL14 na vizinhança de PL15).

### Seleção e amostragem dos solos

O presente estudo incidiu sobre 22 pédones, distribuídos sensivelmente ao longo de dois transectos com orientação ENE-WSW e SE-NW (Figura 1), definidos de forma a englobar situações representativas das diferentes condições naturais, da antiguidade das formações dunares e da sua fixação, bem como da idade dos povoamentos instalados. Segundo Marques (2010), seis destes pédones classificam-se como *Podzóis Ortsteinicos*

*Álbicos* e doze como *Arenossolos Háplicos* ou *Álbicos* (IUSS Working Group WRB, 2006), tendo os restantes sido considerados *intergrades* entre *Arenossolos* e *Podzóis* (Quadro 1).

Todos os perfis foram descritos morfologicamente segundo as normas descritas em FAO (2006) e a totalidade dos respectivos horizontes foram amostrados para caracterização física, química e mineralógica.

**Quadro 1** - Pédones estudados, classes de idade (CL) dos povoamentos de *Pinus pinaster* em que se inserem, relevo e altitude em que se localizam e classificação

Pédone	CL (anos)	Altitude (m)	Relevo	Classificação (WRB 2006)
<i>Podzóis</i>				
PL2	60-79	83	Aplanado	Podzol Ortsteinico Álbico
PL6	40-59	54	Plano	Podzol Ortsteinico Álbico
PL8	40-59	54	Plano	Podzol Ortsteinico Álbico
PL10	40-59	54	Plano	Podzol Ortsteinico Álbico
PL25	40-59	49	Aplanado	Podzol Ortsteinico Álbico
PL26	*	49	Plano	Podzol Ortsteinico Álbico
<i>Intergrades Arenossolos/Podzóis</i>				
PL1	60-79	83	Aplanado	Arenossolo Álbico [Protoespódico] (Hiperdístico)
PL3	60-79	83	Plano	Arenossolo Álbico [Protoespódico] (Hiperdístico)
PL20	60-79	78	Ondulado	Arenossolo Álbico [Protoespódico] (Hiperdístico)
PL21	60-79	78	Ondulado	Arenossolo Álbico [Protoespódico] (Hiperdístico)
<i>Arenossolos</i>				
PL4	10-19	62	Ondulado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL5	10-19	59	Aplanado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL12	60-79	87	Ondulado	Arenossolo Álbico (Hiperdístico)
PL13	60-79	87	Aplanado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL14	60-79	87	Ondulado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL15	60-79	87	Ondulado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL16	10-19	46	Aplanado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL18	10-19	73	Ondulado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL19	10-19	123	Ondulado	Arenossolo Álbico (Hiperdístico)
PL22	60-79	79	Plano	Arenossolo Álbico (Hiperdístico)
PL23	10-19	34	Aplanado	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)
PL24	20-39	55	Plano	Arenossolo Háplico (Hiperdístico)

\*- Em área ardida em Agosto de 2003



## Metodologia analítica

As amostras foram secas ao ar e passadas por um crivo de 2 mm para quantificação da fracção grosseira. A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (argila, <2 µm e limo, 2-20 µm), por sedimentação e decantação (areia fina, 0,02-0,2 mm) e crivagem (areia grossa, 0,2-2 mm), após destruição da matéria orgânica com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e dispersão com uma mistura de hexametáfosfato de sódio e carbonato de sódio e agitação mecânica. O pH foi determinado em suspensões de solo em água e em KCl 1M (razão 1:2,5) por meio de um potenciómetro Metrohm 605. O C orgânico foi determinado por via húmida (De Leenheer e Van Hoven, 1958), tanto no solo como em extractos obtidos com pirofosfato de sódio. O teor de N total foi obtido pelo método de Kjeldahl. A capacidade de troca catiónica (CTC) e os catiões de troca não ácidos (CNA) foram determinados pelo método do acetato de amónio a pH 7,0 (Sumner e Miller, 1996) e quantificados por espectrofotometria de absorção atómica (EAA). A acidez de troca (Al<sup>3+</sup> e H<sup>+</sup>) foi medida por titulação e retro-titulação de um extracto obtido com KCl 1M (Rhoades, 1982).

As formas de Fe, Al e Si extraíveis foram determinadas por extracção selectiva com citrato-bicarbonato-ditionito de sódio (Mehra e Jackson, 1960) – Fe<sub>d</sub>, Al<sub>d</sub> –, com uma mistura de ácido oxálico e oxalato de amónio a pH 3,2 (Schwertmann, 1964) – Fe<sub>o</sub>, Al<sub>o</sub>, Si<sub>o</sub> –, e com pirofosfato de sódio 0,1 M (Blakemore *et al.*, 1987) – Fe<sub>p</sub>, Al<sub>p</sub>, Si<sub>p</sub>. O Al de troca foi extraído com KCl 1 M (Al<sub>k</sub>) e as formas complexadas deste elemento com LaCl<sub>3</sub> 0,33 M (Hargrove e Thomas, 1981) – Al<sub>La</sub> – e CuCl<sub>2</sub> 0,5 M (Juo e Kamprath, 1979) – Al<sub>Cu</sub>. O doseamento do Al, Fe e Si foi efectuado por EAA.

Os métodos de dissolução selectiva mencionados não extraem fracções perfeitamente definidas dos elementos em causa. Todavia, considera-se geralmente (e. g., McKeague e Day, 1966; McKeague, 1967; Mokma e Buurman, 1982; Parfitt e Childs, 1988) que os seus resultados permitem estimar com razoável aproximação as seguintes fracções:

Fe<sub>d</sub> - a totalidade das formas livres de Fe;

Al<sub>d</sub> - Al complexado pela matéria orgânica;

Fe<sub>o</sub> - formas complexadas e amorfas de Fe;

Al<sub>o</sub> - formas complexadas e amorfas de Al e subs-

tâncias sílico-aluminosas amorfas ou mal cristalizadas do tipo alofana;

Si<sub>o</sub> - silício ligado a substâncias sílico-aluminosas amorfas ou mal cristalizadas do tipo alofana ou resultante da dissolução de sílica opalina;

Fe<sub>p</sub> e Al<sub>p</sub> – respectivamente, as formas de Fe e Al complexadas pela matéria orgânica;

Al<sub>k</sub> - Al permutável, presente em complexos de esfera externa;

Al<sub>La</sub> - formas aluminosas permutáveis e as complexadas de muito baixa estabilidade; e

Al<sub>Cu</sub> – o conjunto das formas de Al extraídas pelo KCl e pelo LaCl<sub>3</sub> e a fracção do Al presente em complexos orgânicos de estabilidade média a baixa.

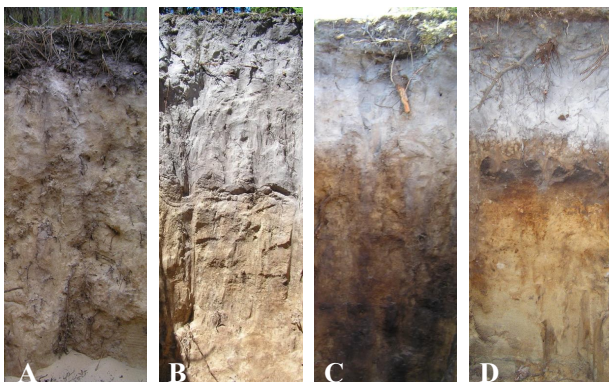
## Resultados e discussão

### Características morfológicas dos solos

Os horizontes superficiais dos solos mostram morfologia semelhante, apresentando todos eles um horizonte Ah de espessura variável, em regra de cor cinzenta a cinzenta escura e apédico, sobre o qual tende a desenvolver-se uma camada orgânica constituída por resíduos orgânicos em diversos estádios de decomposição, no máximo com cerca de 5 cm de espessura.

Nos *Podzóis*, sob o Ah existe sempre um horizonte eluvial muito nítido e quase sempre espesso (Figura 2), a exemplo do que usualmente sucede em regiões de clima temperado (Mokma e Buurman, 1982), que se desenvolve a partir de 20 - 40 cm de profundidade. Este acima horizontes iluviais do tipo Bh ou Bhs, em geral de cor parda escura a parda muito escura, quase sempre espessos (entre 35 e mais de 120 cm) e cimentados, os quais surgem a profundidades que variam entre 0,6 e 1,5 m. Nos *Arenossolos* o perfil é mais variado (Figura 2), podendo ser de tipo i) A-C ou A-(E)-C, indicando o símbolo (E) um horizonte eluvial incipiente (*Arenossolos Hápicos*), ou ii) A-E-C (*Arenossolos Álbicos*), ou ainda iii) A-E-Bh/Bhs-C, isto é, sob o horizonte eluvial existe um outro iluvial, morfologicamente análogo aos acima descritos, embora com expressão menos pronunciada, e cujo topo está também a menos de 2 m de profundidade. Estes pédones estão designados como “*Intergrades Arenossolos/Po-*

dzóis" (Quadro 1) e a sua inclusão nos *Arenossolos* será discutida adiante. Em consonância com a natureza do material originário, os solos estudados



**Figura 2** - Diferenciação morfológica dos tipos de solo identificados na Mata Nacional de Leiria:

- A - Arenossolo Háplico,
- B - Arenossolo Álbico,
- C - Intergrade Arenossolo/Podzol,
- D - Podzol Ortsteinico.

têm textura arenosa, havendo um largo predomínio da fracção areia grossa e teores insignificantes de limo e de argila (Quadro 2).

### Carbono orgânico

Os teores de Corg são em geral baixos e muito variáveis de caso para caso, em particular nos horizontes Ah (Quadro 2). Este facto pode estar relacionado tanto com a idade dos povoamentos instalados, como com as operações de gestão do pinhal, e.g., desbastes e remoção de resíduos orgânicos da superfície do solo (Madeira *et al.*, 2009). Todavia, o teor médio de Corg dos horizontes Ah é tendencialmente mais elevado nos *Podzóis* (16,9 g kg<sup>-1</sup>) do que nos *Arenossolos strictu sensu*, doravante designados apenas por *Arenossolos* (12,5 g kg<sup>-1</sup>), o mesmo acontecendo com a razão C/N, que se mostrou significativamente mais elevada nos primeiros (44,3) do que nos segundos (29,0). Estes valores são igualmente concordantes com o facto de o C extraído pelo pirofosfato (Cp), que em princípio compreende a fracção mais estável do Corg, atingir 57% deste último nos horizontes Ah dos *Arenossolos* e apenas 19% nos dos *Podzóis*. Este padrão deverá estar em conformidade com o carácter mais ácido dos últimos (Suárez Abelenda *et al.*, 2011).

A distribuição em profundidade do Corg é também muito diferente entre os solos estudados (Quadro 2). Enquanto nos horizontes iluviais dos *Podzóis* se observa um segundo máximo de Corg (8,6 g kg<sup>-1</sup>) – teor que é cerca de dez vezes superior

ao observado nos horizontes eluviais suprajacentes (0,8 g kg<sup>-1</sup>) –, na grande maioria dos *Arenossolos* o teor de Corg decresce de forma abrupta com a profundidade, podendo ou não registar-se um aumento ligeiro em camadas C bastante profundas. Nos *Arenossolos* de transição (*intergrades*) a distribuição em profundidade do Corg segue um padrão semelhante ao dos *Podzóis*, mas o seu teor nos horizontes iluviais (2,6 g kg<sup>-1</sup>) é manifestamente inferior ao observado nos últimos (Quadro 2).

Não obstante a elevada biomassa no termo da revolução dos povoamentos da MNL (Madeira *et al.*, 2009), o teor de Corg nos solos é baixo, nomeadamente nos horizontes espódicos. Para além dos possíveis efeitos atribuíveis ao sistema de gestão dos povoamentos de pinhal, este padrão poderá dever-se, por um lado, ao baixíssimo teor da fracção argilosa (textura arenosa) dos solos (Quadro 2); por outro, a amenidade das condições climáticas locais sugere a ocorrência de condições ecológicas consideradas propícias à actividade biológica e, portanto, à elevada taxa de decomposição de resíduos e compostos orgânicos, como relatam Berg *et al.* (1993) a propósito da decomposição de resíduos de *P. pinaster*.

### Complexo de troca

A capacidade de troca catiónica (CTC) dos solos em apreço é muito variável e, dado o baixíssimo teor da fracção argila, está maioritariamente dependente do teor de matéria orgânica (MO), com o qual se correlaciona fortemente ( $r^2=0,790$ ,  $p<0,01$ ). Por isso, à excepção dos *Podzóis*, a CTC é mais elevada nos horizontes Ah, nos quais raramente excede 10 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> e é frequentemente inferior a 5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Quadro 2). Nos *Podzóis*, a CTC tende a ser mais elevada nos horizontes iluviais (6,3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) do que nos Ah (4,4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) (Quadro 2). Este facto poderá ser explicado pelo mais elevado grau de humificação da MO nesses horizontes, como a mais elevada proporção de Cp no total do Corg (79%) sugere.

Os solos estudados são muito pobres em CNA, o que decorre da composição mineralógica do substrato litológico, que é constituído quase totalmente por quartzo e por quantidades ínfimas de feldspatos potássicos (Monteiro, dados não publicados). Desta forma, o somatório dos CNA (SCNA) é extremamente baixo, sendo, em média, inferior a 0,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos horizontes E e nas camadas C e em torno de 0,15 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos horizontes iluviais. Nos horizontes superficiais a decomposição dos resí-

**Quadro 2** - Concentração de areia gossa (AG), areia fina (AF), limo (LM), argila (AR), carbono orgânico total (Corg), carbono extraído pelo pirofosfato (Cp) e azoto total (N), valores de pH em água e em KCl, concentração de cálcio, magnésio potássio e sódio permutáveis e valor da capacidade de troca catiónica (CTC) dos solos estudados. Os valores são média e desvio padrão (a itálico); n = nº de casos considerados

Hori- zontes	n	Granulometria				C <sub>org</sub>	C <sub>p</sub>	N	pH		Complexo de troca					
		AG	AF	LM	AR				H <sub>2</sub> O	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	CTC	
		g kg <sup>-1</sup>							cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>							
<b>Podzóis</b>																
Ah	7	838	125	26	12	16,9	3,0	0,39	4,63	3,14	0,62	0,24	0,04	0,05	4,35	
		<i>4,85</i>	<i>4,58</i>	<i>1,46</i>	<i>1,58</i>	<i>0,83</i>	<i>1,36</i>	<i>0,19</i>	<i>0,59</i>	<i>0,61</i>	<i>0,52</i>	<i>0,12</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>2,40</i>	
E	6	847	139	9	5	0,8	0,7	0,05	5,17	3,85	0,01	0,01	0,01	0,01	0,28	
		<i>5,08</i>	<i>5,03</i>	<i>0,61</i>	<i>0,40</i>	<i>0,03</i>	<i>0,75</i>	<i>0,03</i>	<i>0,38</i>	<i>0,37</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,13</i>	
Bhs	11	810	154	16	19	9,3	7,5	0,29	4,98	4,20	0,10	0,02	0,02	0,03	6,85	
		<i>5,63</i>	<i>5,70</i>	<i>1,07</i>	<i>1,55</i>	<i>0,27</i>	<i>2,75</i>	<i>0,10</i>	<i>0,46</i>	<i>0,24</i>	<i>0,16</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,04</i>	<i>2,36</i>	
C	10	82	143	20	19	1,5	1,5	0,07	5,43	4,49	0,02	0,01	0,02	0,01	1,44	
		<i>16,77</i>	<i>14,37</i>	<i>2,51</i>	<i>1,61</i>	<i>0,09</i>	<i>1,07</i>	<i>0,05</i>	<i>0,38</i>	<i>0,24</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,62</i>	
<b>Arenossolos (Háplicos e Albicós)</b>																
A	21	872	113	9	6	12,5	3,3	0,39	5,37	3,67	1,22	0,31	0,02	0,03	4,28	
		<i>9,27</i>	<i>9,48</i>	<i>0,74</i>	<i>0,38</i>	<i>1,30</i>	<i>2,04</i>	<i>0,31</i>	<i>0,60</i>	<i>0,45</i>	<i>1,26</i>	<i>0,28</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>3,64</i>	
(E)/E	7	856	133	9	2	1,2	1,3	0,07	5,11	3,82	0,07	0,02	0,01	0,01	0,83	
		<i>6,43</i>	<i>6,93</i>	<i>1,08</i>	<i>0,17</i>	<i>0,08</i>	<i>1,44</i>	<i>0,03</i>	<i>0,45</i>	<i>0,32</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,16</i>	
C	41	877	114	5	3	0,6	1,3	0,06	5,48	4,23	0,04	0,02	0,02	0,01	0,66	
		<i>8,67</i>	<i>8,68</i>	<i>0,59</i>	<i>0,30</i>	<i>0,04</i>	<i>0,84</i>	<i>0,05</i>	<i>0,46</i>	<i>0,29</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,24</i>	
<b>Intergrades Arenossolos/Podzóis</b>																
A	7	817	148	22	13	20,7	5,3	0,64	4,71	3,12	1,70	0,42	0,07	0,07	7,47	
		<i>5,74</i>	<i>4,89</i>	<i>1,82</i>	<i>0,55</i>	<i>1,09</i>	<i>2,60</i>	<i>0,35</i>	<i>0,61</i>	<i>0,36</i>	<i>1,46</i>	<i>0,28</i>	<i>0,08</i>	<i>0,06</i>	<i>3,97</i>	
E	5	865	126	5	3	1,0	0,8	0,06	4,84	3,59	0,02	0,01	0,03	0,01	0,59	
		<i>1,83</i>	<i>1,98</i>	<i>0,66</i>	<i>0,32</i>	<i>0,05</i>	<i>0,29</i>	<i>0,03</i>	<i>0,26</i>	<i>0,16</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,13</i>	
(Bhs)/(Bh)	7	825	163	4	8	2,6	2,0	0,11	4,98	3,95	0,02	0,01	0,03	0,01	1,83	
		<i>6,25</i>	<i>6,48</i>	<i>0,42</i>	<i>0,58</i>	<i>0,08</i>	<i>1,21</i>	<i>0,04</i>	<i>0,34</i>	<i>0,15</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,68</i>	
C	3	899	94	2	6	0,6	0,7	0,05	5,37	4,22	0,02	0,01	0,02	0,01	0,76	
		<i>4,79</i>	<i>4,67</i>	<i>0,14</i>	<i>0,42</i>	<i>0,01</i>	<i>0,87</i>	<i>0,04</i>	<i>0,24</i>	<i>0,05</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,37</i>	

duos orgânicos origina o aumento do teor em ca-  
tiões não ácidos, em particular de Ca<sup>2+</sup> e de Mg<sup>2+</sup>,  
pelo que o SCNA alcança valores médios entre 1 e  
2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Quadro 2).

Os valores mais elevados do grau de saturação em  
CNA (GS) verificam-se por isso nos horizontes Ah,  
onde, apesar da diminuta CTC, se registam valo-  
res médios de apenas 22% e 37%, respectivamen-

te nos *Podzóis* e nos *Arenossolos* (Quadro 2). Todavia, em alguns pédones foram observados valores do SCNA que mais do que duplicam os referidos, devido sobretudo a teores mais elevados de Ca de troca. Nestes casos o GS é sempre mais elevado do que acima se refere, em especial nos horizontes Ah, nos quais excede 50%. Isto explica-se pela ocorrência de pequenas variações na composição mineralógica das areias da área de estudo, as quais podem incluir diminutas quantidades de plagioclases. As diferenças assinaladas no teor dos CNA não serão na totalidade atribuíveis à diferente natureza dos solos em causa, uma vez que tanto a idade das planções como a remoção das camadas orgânicas ou a perturbação da superfície do solo são susceptíveis de fazer variar tal teor (Madeira *et al.*, 2009) e, de uma forma geral, também outras características do solo correlacionadas com ele, como o pH.

À excepção dos solos mais bem providos em CNA que acima se mencionaram e nos quais os valores de pH (em água), são de aproximadamente 6 em todos os horizontes, a reacção dos solos da MNL é geralmente ácida ou mesmo muito ácida (Quadro 2). Isto decorre naturalmente da acção acidificante da MO não compensada por catiões de troca não ácidos, como é patente nos horizontes superficiais e em especial nos dos *Podzóis*. Com efeito, os horizontes Ah destes são os mais ácidos, apresentando um valor médio de pH em água (4,63) que se mostrou significativamente inferior ao dos *Arenossolos* (5,37). Ao longo do perfil dos *Podzóis*, verifica-se um aumento de pH, que é em média de cerca de meia unidade nos horizontes E (5,17), baixando depois ligeiramente nos Bh/Bhs (5,05). Nos *Arenossolos* a variação de pH em profundidade é em geral pequena e algo errática. Nas camadas C o pH em água é da mesma ordem de grandeza em todos os pédones (5,4-5,5). Os valores de pH em KCl são sempre inferiores aos medidos em água em cerca de 1,5 unidades nos horizontes Ah dos *Podzóis* e 1,7 nos dos restantes pédones, ao passo que nos horizontes Bhs essa diferença ronda em média 0,8 unidades. Contrariamente ao que sucede com o pH em água, o pH em KCl aumenta regularmente em profundidade.

Realça-se que o valor de pH do horizonte Ah dos *Podzóis* considerados é ainda mais baixo do que o observado no mesmo horizonte de *Podzóis* desenvolvidos sobre rochas quartzíticas e em condições mais pluviosas (1200-1400 mm) no País Basco (Suárez Abelenda *et al.*, 2011).

## Formas de ferro, alumínio e silício

*Formas de ferro extraídas pelo CBD e pelo oxalato e pelo pirofosfato*

As quantidades de Fe extraídas com o oxalato de amónio ( $Fe_o$ ), o CBD ( $Fe_d$ ) e o pirofosfato ( $Fe_p$ ) são muito baixas (Quadro 3). Os teores mais elevados das diversas formas extraídas ocorrem invariavelmente nos horizontes Bhs dos *Podzóis* e dos *Arenossolos* afins a estes (*intergrades*) e, nos casos em que este horizonte está subdividido, na sua parte superior. Em tais horizontes os valores de  $Fe_o$  e de  $Fe_p$  são de aproximadamente  $0,5 \text{ g kg}^{-1}$  nos *Podzóis* e de metade ou menos deste valor nos *intergrades* mencionados. Nos restantes horizontes, independentemente da classificação dos respectivos pédones, estas formas de Fe representam no máximo de  $0,2 \text{ g kg}^{-1}$  e são frequentemente inferiores a  $0,1 \text{ g kg}^{-1}$ . Os teores de  $Fe_d$  são ligeiramente mais elevados e alcançam nos horizontes iluviais dos *Podzóis* e dos *intergrades*, valores de cerca de 1 e  $0,25 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente. Nos restantes horizontes e à excepção das camadas C contíguas aos Bhs, o  $Fe_d$  é inferior a  $0,3 \text{ g kg}^{-1}$ . A forma de distribuição em profundidade (Figura 3) é pois semelhante nas fracções em causa, com os valores mais elevados a ocorrerem em correspondência com o máximo secundário de Corg no perfil (Quadro 3). As formas cristalinas de Fe (estimadas pela diferença  $Fe_d - Fe_o$ ) são geralmente maioritárias, excepto nos horizontes Bhs, nos quais as formas amorfas ligadas ou não à MO ( $Fe_o$ ) se tornam dominantes ou igualam as cristalinas. A correlação entre o  $Fe_p$  e o  $Fe_o$  é muito forte, tanto nos *Podzóis* ( $r^2=0,892$ ,  $p<0,01$ ), como na generalidade dos pédones de estudo ( $r^2=0,825$ ,  $p<0,01$ ) e sugere que o oxalato e o pirofosfato extraíram essencialmente as mesmas formas de Fe. Como a razão  $Fe_p/Fe_o$  é geralmente superior à unidade, admite-se que as formas não cristalinas de Fe presentes nos horizontes Bhs deverão ser principalmente as ligadas à MO (Bruckert, 1979; Higashi *et al.*, 1981), ainda que esta indicação possa merecer alguma reserva, uma vez que o pirofosfato pode não só peptizar partículas muito finas de hidróxidos de ferro amorfo, como também extrair formas cristalinas de reduzida dimensão (Madeira e Jeanroy, 1984; Parfitt e Childs, 1988). A saturação da MO em Fe, expressa pela razão molar Corg/ $Fe_p$  é sempre muito baixa. Nos horizontes Ah o valor médio dessa razão é, respectivamente, de quase 1 500 nos *Podzóis*, 862 nos *Arenossolos* de transição e de 648 nos *Arenossolos sensu strictu*; nos horizontes iluviais aqueles valo-



**Quadro 3** - Teores médios e desvio padrão (a itálico) de Fe, Al e Si extraídos pelo oxalato de amônio (Fe<sub>0</sub>, Al<sub>0</sub>, Si<sub>0</sub>), CBD (Fe<sub>d</sub>, Al<sub>d</sub>), pirofosfato de sódio (Fe<sub>p</sub>, Al<sub>p</sub>, Si<sub>p</sub>), KCl (Al<sub>K</sub>), LaCl<sub>3</sub> (Al<sub>La</sub>) e CuCl<sub>2</sub> (Al<sub>Cu</sub>), e razões molares C/Fe<sub>p</sub>, C/Al<sub>p</sub>, Al<sub>p</sub>/C<sub>p</sub> e C/Al<sub>Cu</sub>) nos solos estudados (n = nº de casos considerados)

Horizontes	n	Extracções selectivas											Razões molares			
		Fe <sub>0</sub>	Al <sub>0</sub>	Si <sub>0</sub>	Fe <sub>d</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>p</sub>	Al <sub>p</sub>	Si <sub>p</sub>	Al <sub>K</sub>	Al <sub>La</sub>	Al <sub>Cu</sub>	C/Fe <sub>p</sub>	C/Al <sub>p</sub>	Al <sub>p</sub> /C <sub>p</sub>	C/Al <sub>Cu</sub>
		g kg <sup>-1</sup>									cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>					
<b>Podzóis</b>																
<b>Ah</b>	7	0,06	0,03	0,37	0,26	0,09	0,09	0,08	0,22	0,12	0,35	0,92	1486	438	0,01	496
		<i>0,08</i>	<i>0,05</i>	<i>0,77</i>	<i>0,17</i>	<i>0,10</i>	<i>0,11</i>	<i>0,08</i>	<i>0,20</i>	<i>0,14</i>	<i>0,35</i>	<i>0,53</i>	<i>1046</i>	<i>185</i>	<i>0,01</i>	<i>129</i>
<b>E</b>	6	0,02	0,10	0,61	0,20	0,05	0,03	0,00	0,10	0,01	0,07	0,32				
		<i>0,02</i>	<i>0,24</i>	<i>1,38</i>	<i>0,14</i>	<i>0,06</i>	<i>0,04</i>	<i>0,00</i>	<i>0,08</i>	<i>0,01</i>	<i>0,03</i>	<i>0,65</i>				
<b>Bhs</b>	11	0,51	1,68	1,18	0,98	2,60	0,54	1,96	0,97	0,31	1,50	9,89	189	12	0,12	24
		<i>0,45</i>	<i>0,88</i>	<i>1,22</i>	<i>0,86</i>	<i>1,09</i>	<i>0,49</i>	<i>0,92</i>	<i>0,60</i>	<i>0,15</i>	<i>0,79</i>	<i>3,29</i>	<i>164</i>	<i>4,83</i>	<i>0,04</i>	<i>5,16</i>
<b>C</b>	10	0,14	0,82	1,11	0,63	0,85	0,20	0,44	0,36	0,05	0,69	1,88				
		<i>0,23</i>	<i>1,03</i>	<i>1,42</i>	<i>0,63</i>	<i>0,58</i>	<i>0,27</i>	<i>0,41</i>	<i>0,31</i>	<i>0,04</i>	<i>0,43</i>	<i>1,56</i>				
<b>Arenossolos (Háplicos e Álbicos)</b>																
<b>Ah</b>	21	0,08	0,20	0,72	0,15	0,11	0,11	0,13	0,19	0,05	0,21	0,63	648	264	0,03	408
		<i>0,07</i>	<i>0,25</i>	<i>0,68</i>	<i>0,10</i>	<i>0,07</i>	<i>0,08</i>	<i>0,08</i>	<i>0,18</i>	<i>0,04</i>	<i>0,19</i>	<i>0,30</i>	<i>397</i>	<i>246</i>	<i>0,03</i>	<i>385</i>
<b>E/(E)</b>	7	0,04	0,18	0,77	0,12	0,06	0,10	0,14	0,23	0,04	0,14	0,31				
		<i>0,05</i>	<i>0,25</i>	<i>0,76</i>	<i>0,07</i>	<i>0,08</i>	<i>0,06</i>	<i>0,11</i>	<i>0,17</i>	-	-	-				
<b>C</b>	41	0,07	0,20	0,73	0,17	0,16	0,14	0,25	0,43	0,05	0,27	0,62				
		<i>0,08</i>	<i>0,24</i>	<i>0,59</i>	<i>0,10</i>	<i>0,09</i>	<i>0,09</i>	<i>0,11</i>	<i>0,28</i>	<i>0,03</i>	<i>0,12</i>	<i>0,49</i>				
<b>Intergrades Arenossolos/Podzóis</b>																
<b>Ah</b>	7	0,10	0,07	0,53	0,16	0,19	0,13	0,24	0,15	0,16	0,62	1,64	862	185	0,02	270
		<i>0,08</i>	<i>0,05</i>	<i>0,32</i>	<i>0,12</i>	<i>0,09</i>	<i>0,07</i>	<i>0,07</i>	<i>0,12</i>	<i>0,08</i>	<i>0,27</i>	<i>0,73</i>	<i>478</i>	<i>72</i>	<i>0,01</i>	<i>55</i>
<b>E</b>	5	0,00	0,00	0,32	0,01	0,03	0,01	0,05	0,08	0,02	0,15	0,18				
		<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,26</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>	<i>0,04</i>	<i>0,11</i>	<i>0,02</i>	<i>0,09</i>	<i>0,07</i>				
<b>(Bhs)/(Bh)</b>	7	0,10	0,30	0,71	0,23	0,60	0,20	0,63	0,36	0,20	0,56	2,77	130	9	0,20	26
		<i>0,11</i>	<i>0,15</i>	<i>0,50</i>	<i>0,26</i>	<i>0,17</i>	<i>0,24</i>	<i>0,13</i>	<i>0,13</i>	<i>0,12</i>	<i>0,29</i>	<i>1,11</i>	<i>143</i>	<i>2,83</i>	<i>0,13</i>	<i>9,40</i>
<b>C</b>	3	0,01	0,14	1,12	0,07	0,39	0,06	0,41	0,19	0,04	0,49	1,25				
		<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,43</i>	<i>0,06</i>	<i>0,02</i>	<i>0,05</i>	<i>0,11</i>	<i>0,10</i>	<i>0,01</i>	<i>0,11</i>	<i>0,57</i>				

res são de 189 nos *Podzóis* e de 130 nos *intergrades* (Quadro 3).

As pequenas quantidades das diversas fracções de Fe que existem nos solos estudados e a baixa sa-

turação da MO em Fe sugerem que o papel deste elemento na dinâmica dos processos que levam à diferenciação dos horizontes iluviais é muito reduzido. Situações destas são, aliás, comuns nos *Podzóis* intrazonais das regiões temperadas (Buur-

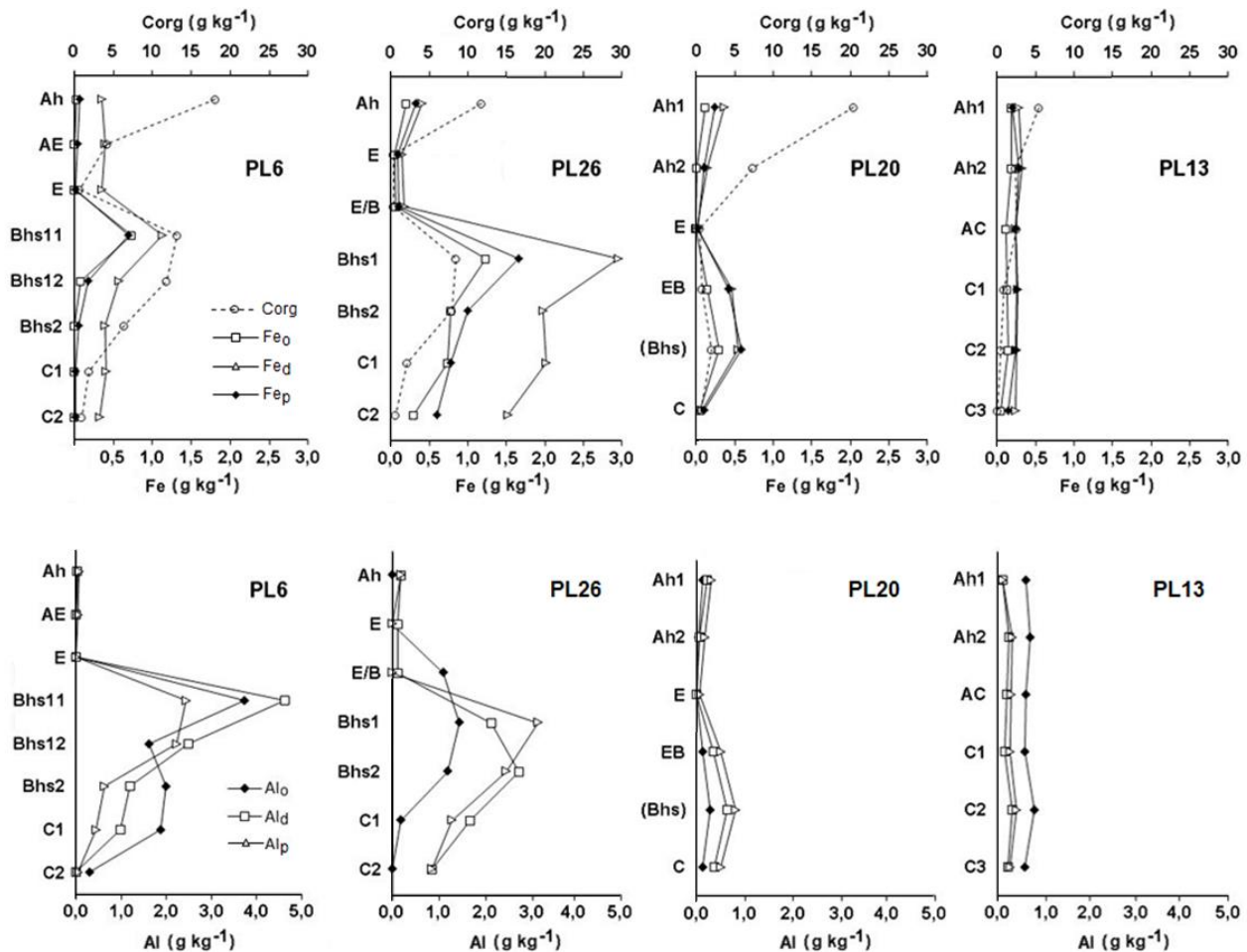
man e Jongmans, 2002), nos quais a cor geralmente muito escura dos horizontes espódicos corrobora o fraco papel deste elemento, por contraposição com o da MO, que é bastante mais importante.

*Formas de alumínio extraídas pelo CBD, pelo oxalato e pelo pirofosfato*

Os reagentes acima mencionados são igualmente utilizados para solubilizar as formas orgânicas do Al, embora a verdadeira natureza dessas fracções suscite bastantes incertezas. As quantidades por eles extraídas diferem frequentemente em razão de os diferentes valores de pH a que operam lhes conferirem diferente capacidade para solubilizarem complexos alumino-orgânicos, formas aluminosas amorfas ou de baixa cristalinidade, ou mesmo alguns minerais primários. Acresce que a solubilidade das formas complexadas de Al é susceptível de ser modificada por interacção entre estas e o Fe. Wada e Greenland (1970) e Mokma e Buurman (1982) admitem que o Al extraído pelo CBD ( $Al_d$ )

é geralmente menos afectado por essas variações e por isso consideram-no mais representativo das formas de Al ligadas à MO. No entanto, a utilização do tampão oxalato-oxálico e do pirofosfato de sódio para a diferenciação das formas de Al não cristalino é presentemente mais consensual e os seus resultados são correntemente utilizados na classificação dos solos nos modernos sistemas taxonómicos (e. g., WRB e *Soil Taxonomy*). O pirofosfato de sódio é utilizado para a extracção do Al ligado especificamente a complexos orgânicos ( $Al_p$ ), visto que a sua capacidade para solubilizar hidróxidos e formas de baixa cristalinidade é pequena. O oxalato extrai a totalidade da fracção reactiva do Al no solo (Higashi e Ikeda, 1974; McKeague e Day, 1966), isto é, as formas orgânicas, as amorfas e as de baixa cristalinidade ( $Al_o$ ), pelo que as formas inorgânicas amorfas e minerais do tipo alofana ou imogolite se podem estimar pela diferença  $Al_o - Al_p$ .

Os teores de Al extraídos por esses reagentes nos



**Figura 3** - Teor e distribuição em profundidade do carbono orgânico (Corg) e das formas de ferro e de alumínio extraídas pelo CBD ( $Fe_d$ ), tampão oxalato-oxálico ( $Fe_o$ ) e pirofosfato de sódio ( $Fe_p$ ) em Podzóis (PL6 e PL26), num Arenossolo Háplico (PL13) e num intergrade Arenossolo/Podzol (PL20) representativos dos solos da área de estudo.

pédones estudados são em geral mais elevados do que os de Fe, mas pouco diferenciados entre si, em especial nos horizontes Ah e E. Em regra, as quantidades solubilizadas seguem geralmente a ordem  $Al_d \geq Al_p \geq Al_o$ , mas, com raras exceções, o padrão de distribuição ao longo do perfil é o mesmo para todos os extractantes e semelhante ao verificado com o Fe (Figura 3). Assim, os valores mínimos (pouco acima de zero) ocorrem nos horizontes E, e os mais elevados na parte superior dos Bhs (entre 0,2 e 3,7 g kg<sup>-1</sup> de  $Al_o$ , entre 0,9 e 4,6 g kg<sup>-1</sup> de  $Al_d$  e entre 0,6 e 3,7 g kg<sup>-1</sup> de  $Al_p$ ) (Quadro 3), em linha com os máximos secundários de Corg (Figura 3). A distribuição em profundidade do Al e do Fe nos solos estudados difere, portanto, da que acontece com frequência em solos sujeitos a evolução podzolizante (Jersak *et al.*, 1995), nos quais os teores máximos daqueles elementos ocorrem a diferente profundidade. Todavia, situações análogas à observada não são incomuns (Ugolini e Dahlgren, 1987).

As razões  $Al_p/Al_o$  (ou  $Al_d/Al_o$ ) são, com raras exceções, superiores à unidade ou próximas desse valor nos horizontes Bhs, pondo em evidência que as formas de Al que neles dominam são orgânicas. A saturação da MO em Al, avaliada pela razão molar  $C/Al_p$ , aumenta abruptamente em profundidade, passando nos *Podzóis* de 438 nos horizontes Ah para 12 nos Bhs e, nos *intergrades*, de 185 nos Ah para 9 nos horizontes de tipo iluvial (Quadro 3). Todavia, estes valores são meramente indicativos, uma vez que aquela razão depende muito do grau de humificação e de outras características da MO (García-Rodeja *et al.*, 2004). A razão molar  $Al_p/C_p$ , em princípio menos afectada pela variação do grau de humificação da MO, toma, por seu turno, valores médios de 0,02 nos horizontes Ah do conjunto de pédones estudados e de 0,13 (entre 0,05 e 0,20) nos Bhs dos *Podzóis* (Quadro 3), os quais são um pouco inferiores aos valores mais elevados referidos para este índice, que se situam no intervalo 0,16-0,20 (Schintzer e Khan, 1972; Higashi *et al.*, 1981).

#### Alumínio extraído pelo KCl, pelo $LaCl_3$ e pelo $CuCl_2$

A extracção da fracção orgânica do Al por sais não tamponizados de Cu ( $CuCl_2$ ) e de La ( $LaCl_3$ ) é considerada alternativa aos acima mencionados, cuja especificidade para as diversas formas de Al nos solos é questionável (Paterson *et al.*, 1993; Kaiser e Zech, 1996). Os resultados dos métodos de extracção do Al com sais tamponizados são frequentemente utilizados em conjugação com os respeitantes ao Al permutável, extraído pelo KCl ( $Al_k$ )

para estimar fracções orgânicas específicas deste elemento. De acordo com a interpretação usual e uma vez que o  $Al_k$  representa apenas formas permutáveis, a diferença  $Al_{La} - Al_k$  corresponde a formas orgânicas muito lábeis e de muito elevada mobilidade e a diferença  $Al_{Cu} - Al_{La}$  representa o Al associado a complexos orgânicos de estabilidade média a baixa, ou seja, de mobilidade média a elevada (Hargrove e Thomas, 1984). As formas orgânicas de Al de maior estabilidade poderão, deste modo, ser estimadas pela diferença  $Al_p - Al_{Cu}$ .

Nos pédones em estudo as quantidades de Al extraídas por estes sais são também muito baixas, como se mostra no Quadro 4 (valores médios da totalidade dos pédones analisados) e na Figura 4 (teores e distribuição em profundidade do Al em pédones representativos). Globalmente, o valor médio de  $Al_k$  varia entre 0,05 e 0,12 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos horizontes Ah dos *Podzóis* e dos *Arenossolos* e é de 0,31 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos horizontes Bhs (Quadro 4). Apesar de as maiores quantidades de  $Al_k$  ocorrerem nestes horizontes, que são geralmente os mais ácidos, o  $Al_k$  não se correlaciona nem com o pH em água nem com o pH em KCl, o que está em concordância com o facto de nestes pédones a quase totalidade do Al estar ligado à MO.

O  $LaCl_3$  extraíu quantidades um pouco mais elevadas de Al do que o KCl. Nos horizontes Ah, o respectivo teor foi, em média, de 0,21 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos *Arenossolos*, de 0,35 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos *Podzóis* e de 0,62 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos *intergrades*, enquanto nos horizontes iluviais foi de 1,50 e 0,56 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente nos *intergrades* e nos *Podzóis*. Deste modo, nos horizontes Ah, o Al especificamente extraído pelo  $LaCl_3$  ( $Al_{La} - Al_k$ ) representa 20%, 19% e 8% do Al ligado à MO ( $Al_p$ ), respectivamente nos *Podzóis*, nos *intergrades* e nos *Arenossolos*, enquanto nos horizontes iluviais aquela proporção é apenas 7% nos *Podzóis* e 5% nos *intergrades* (Quadro 4). Em geral, as diferenças entre as proporções assinaladas acompanham a razão  $C_p/Corg$ . Esta é mais elevada nos horizontes Ah dos *Arenossolos* do que nos dos *Podzóis*, e é também mais elevada nos horizontes Bhs do que nos Ah. Tais diferenças também indicam que a fracção da MO com maior mobilidade é significativamente mais elevada nos horizontes Ah dos *Podzóis* (e nos dos *intergrades*) do que nos dos *Arenossolos*, porquanto se admite que a eficiência extractiva do  $LaCl_3$  é maior em solos cujos complexos alumino-orgânicos são particularmente lábeis (Hargrove e Thomas, 1984; Urrutia *et al.*,

**Quadro 4** - Razões  $(Al_{La}-Al_K)/Al_p$ ,  $Al_{Cu}/Al_p$ ,  $(Al_{Cu}-Al_{La})/Al_p$  e  $(Al_p-Al_{Cu})/Al_p$  em horizontes seleccionados dos solos estudados (n = 18 nº de casos considerados)

Horizonte	n	$(Al_{La}-Al_K)/Al_p$	$Al_{Cu}/Al_p$	$(Al_{Cu}-Al_{La})/Al_p$	$(Al_p-Al_{Cu})/Al_p$
<i>Podzóis</i>					
Ah	7	0,20	0,85	0,55	0,15
Bhs	11	0,07	0,48	0,45	0,52
<i>Intergrades Arenossolos/Podzóis</i>					
Ah	7	0,19	0,61	0,35	0,39
(Bh)/(Bhs)	7	0,05	0,41	0,33	0,59
<i>Arenossolos Hápticos e Álbicos</i>					
Ah	21	0,08	0,31	0,21	0,69

1995). Todavia, os teores de  $Al_{La}$  em análise não se correlacionaram significativamente com o pH, com o Corg, ou com o  $C_p$ , se bem que manifestem tendência para aumentar tanto com os teores de Corg, como com os de  $C_p$ .

O  $CuCl_2$  extraíu, em média, entre 0,63 e 1,64  $cmol_c Al\ kg^{-1}$  nos horizontes Ah, respectivamente dos *Arenossolos* e dos *intergrades*, e entre 9,9 e 2,8  $cmol_c Al\ kg^{-1}$  nos horizontes Bhs dos *Podzóis* e dos *intergrades*, pela mesma ordem (Quadro 4). Estes valores são mais elevados do que os obtidos com o  $LaCl_3$ , mas geralmente inferiores àqueles que o pirofosfato solubilizou. O Al extraído segue, assim, a ordem  $Al_K < Al_{La} < Al_{Cu} < Al_p$ , que é semelhante à referida por outros autores (e. g., Hargrove e Thomas, 1981 e 1984; Urrutia *et al.*, 1995; García-Rodeja *et al.*, 2004; Auxtero e Madeira, 2011). O  $Al_{Cu}$  apresenta uma correlação muito forte com o  $C_p$  ( $r^2=0,811$ ) e também com Corg, embora neste caso o ajustamento se faça segundo equações distintas para os horizontes Ah e para os Bhs (Figura 5). Nos horizontes Bhs a razão  $Al_{Cu}/Al_p$  varia entre 0,25 e 0,76 (média de 0,48), valores que apenas em parte concordam com os referidos por Dahlgren e Walker (1993) para horizontes B de *Podzóis* (0,5-0,8). Nos horizontes Ah dos *Podzóis* aquela razão apresenta valores mais elevados, situados no intervalo entre 0,36 e 1,31 (média de 0,85), os quais, por sua vez, são claramente superiores aos calculados para os *Arenossolos*, que variam entre 0,18 e 0,63 (média de 0,31) (Quadro 4).

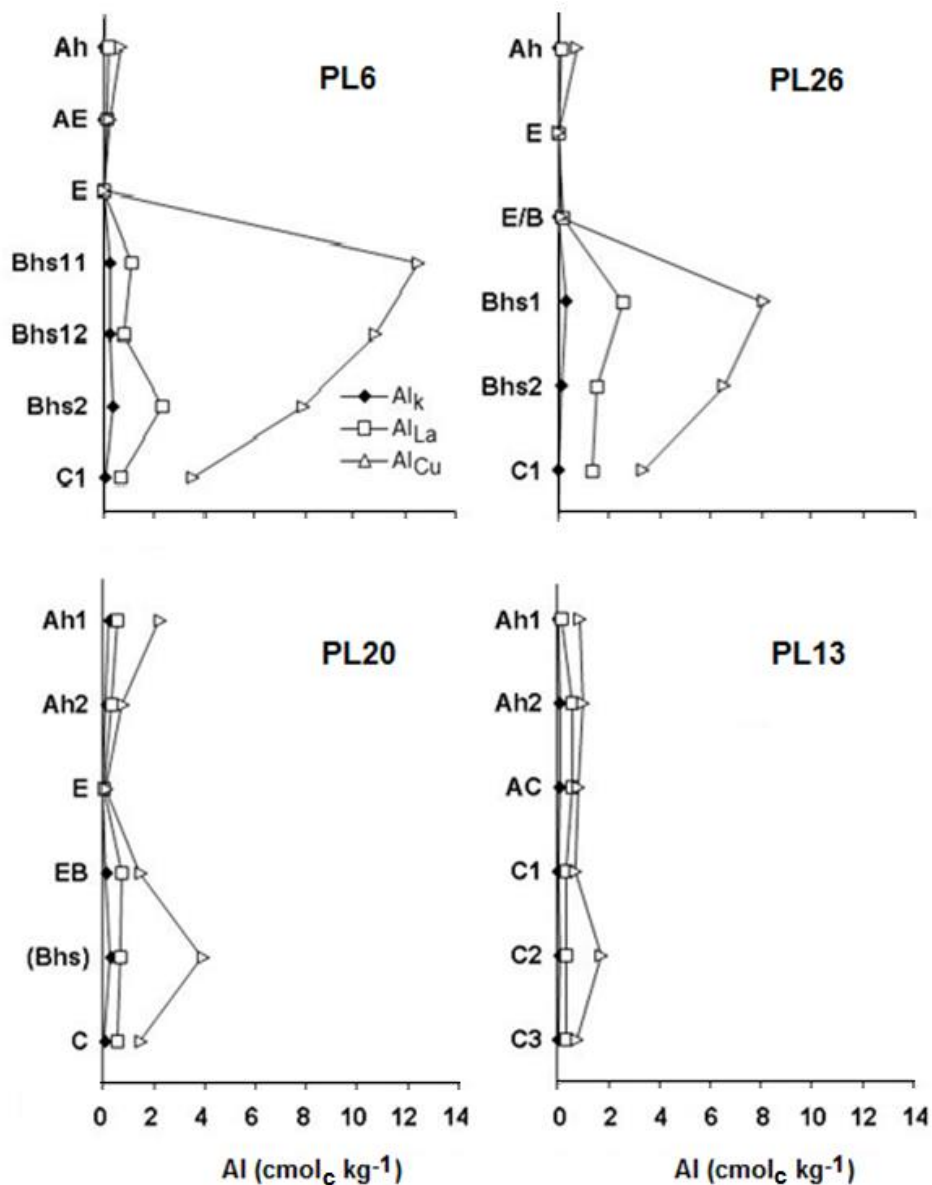
De uma forma geral, o  $Al_p$ , o  $Al_p-Al_{Cu}$ , o  $Al_{Cu}$  e mesmo a fracção especificamente extraída pelo  $CuCl_2$

$(Al_{Cu}-Al_{La})$  apresentam correlações estatisticamente significativas com o Corg e com o  $C_p$ , o que indicia que qualquer destas fracções do Al está maioritariamente relacionada com a MO do solo e, em particular, com a sua fracção humificada. A proporção relativamente ao  $Al_p$  das fracções especificamente extraídas pelo  $Al_{Cu}$  e pelo  $Al_{La}$  (Quadro 4) sugere por outro lado que os complexos alumino-orgânicos dos horizontes Ah dos *Podzóis* (e *Arenossolos* mais afins a estes) serão mais lábeis e mais móveis do que os existentes nos Ah dos *Arenossolos*. Com efeito, a fracção mais estável daqueles complexos ( $Al_p-Al_{Cu}$ ) é significativamente maior nos horizontes Ah dos *Arenossolos* (69%) do que dos *Podzóis* (15%), em concordância, aliás, com a maior saturação dos primeiros em  $Al_p$ . Todavia, tal não implica que nos horizontes Ah dos *Arenossolos* a mobilidade daqueles complexos seja necessariamente reduzida, porquanto a saturação em  $Al_{Cu}$  da MO que neles ocorre, expressa pela razão molar  $C/Al_{Cu}$ , é muito baixa e da mesma ordem de grandeza da dos *Podzóis* (superior a 400), em contraste com o que se verifica nos horizontes iluviais dos *Podzóis* e dos *Arenossolos* de transição, nos quais o valor médio daquela razão é de 24 e 26, respectivamente (Quadro 4).

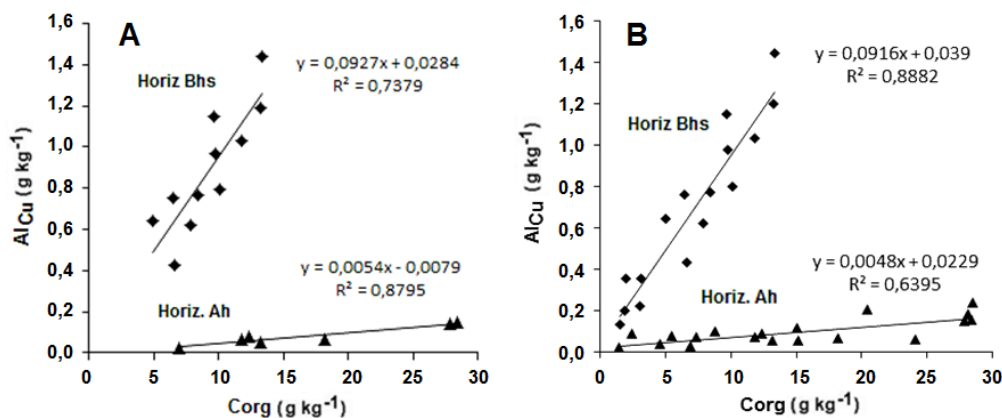
#### *Silício extraído pelo oxalato de amónio*

As formas não cristalinas de silício presentes no solo estão essencialmente combinadas com Al, em minerais do tipo alofana ou imogolite, ou com o Fe, em minerais como a hisingerite, cuja dissolução é usualmente feita com o tampão oxalato-oxálico (Higashi e Ikeda, 1974). Nos pédonos do presente estudo, o Si assim extraído ( $Si_e$ ) apresenta valores





**Figura 4** - Teores de Al<sub>K</sub>, Al<sub>La</sub> e Al<sub>Cu</sub> extraídos em pódones representativos dos solos da área de estudo - Podzóis (PL6 e PL26), intergrade 845 Arenossolo/Podzól (PL20) e Arenossolo Háplico (PL13).



**Figura 5** - Correlação entre os teores de carbono orgânico (Corg) e de alumínio extraído pelo CuCl<sub>2</sub> (Al<sub>Cu</sub>) em horizontes dos Podzóis (A) e da totalidade dos pódones estudados (B).

em geral inferiores a  $2 \text{ g kg}^{-1}$  e, mais frequentemente, a  $1 \text{ g kg}^{-1}$ , pelo que nenhuma das fases de baixa cristalinidade referidas deverá ocorrer em quantidade relevante, nos pédones estudados.

### Classificação dos solos

O presente estudo evidencia que a maior parte dos pédones da Mata Nacional de Leiria – habitualmente considerados *Solos Podzolizados* (Cardoso, 1965 e 1974) ou *Podzóis sensu* FAO (1974) – não reúne condições para ser enquadrada nos *Podzóis sensu* WRB 2006 (IUSS Working Group WRB, 2006). Aliás, esta constatação está em linha com os resultados relatados por Gusmão e Madeira (1986) para um número reduzido de pédones desenvolvidos sobre formações arenáceas de várias áreas do litoral do País.

Face à textura arenosa e à ausência de características de diagnóstico próprias de outros horizontes que não um álbico em alguns deles (Figura 2), tais pédones terão de ser enquadrados nos *Arenossolos Álbicos* ou *Háplicos* do sistema WRB, como já anteriormente referido (Marques, 2010). Os primeiros são todos fortemente insaturados (grau de saturação em catiões não ácidos inferior a 50% entre 20 e 100 cm de profundidade e inferior a 20% em camadas até 100 cm de profundidade), pelo que se enquadram de facto nos *Arenossolos Álbicos* (*Hiperdísticos*). Aos segundos (*Arenossolos Háplicos*) ser-lhes-ão aplicáveis os qualificadores de “2º nível” (*suffix qualifiers*) “Éutrico”, “Ortodístico”, ou “Hiperdístico”, consoante o respectivo grau de saturação seja, respectivamente, superior a 50%, inferior a este valor (em ambos os casos entre 20 e 100 cm de profundidade), ou como mencionado para os *Arenossolos Álbicos*.

Os *Podzóis* incluídos no presente estudo (*Podzóis Ortsteinicos Álbicos*) apresentam como características de diagnóstico dos respectivos horizontes espódicos o teor em Corg, o pH, a côr e a cimentação (Figura 2). Os teores de  $\text{Al}_0$  e  $\text{Fe}_0$  neles determinados são muito baixos e o somatório  $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$  em nenhum dos casos atingiu o limiar de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  que constitui um dos critérios alternativos para identificação de tais horizontes. Além disso, nenhum dos qualificadores “de 2º nível” propostos na WRB (2006) lhes é aplicável.

Os *Arenossolos* que para além de horizontes eluviais possuem também horizontes iluviais são de classificação mais discutível, pois os qualificadores propostos para estes solos no sistema WRB 2006

não permitem traduzir cabalmente as suas características (Figura 2). Com efeito, os seus horizontes iluviais possuem um conjunto de características que os aproximam dos espódicos, nomeadamente a tipologia e localização relativa no perfil, a cor, o pH e a acumulação iluvial de complexos orgânicos com Al (e Fe) (Figuras 3 e 4, pédone PL20). Além disso, o grau de cimentação dos referidos horizontes é suficiente para impedir ou dificultar a penetração de raízes, podendo limitar a espessura efectiva do solo. Deste modo, tais solos distinguem-se claramente dos *Arenossolos Álbicos* pela maior diferenciação dos seus horizontes e por propriedades que têm implicações tanto nas suas funções, como na sua utilização, pois a matéria orgânica que acumulam subsuperficialmente não poderá deixar de lhes conferir capacidades acrescidas de retenção de água e de nutrientes. Dada a evolução podzolizante que os caracteriza, estes solos podem apropriadamente considerar-se *intergrades* entre *Arenossolos* e *Podzóis*. No sistema WRB 2006 as transições entre Agrupamentos Principais de Solos são distinguidas por qualificadores apropriados de 1º nível (*prefix qualifiers*). Justificar-se-ia, por isso, adoptar um novo qualificador que reflectisse a natureza dos solos em apreço (e.g. Protoespódico), o qual deveria ter definição próxima da dos subgrupos *Spodic* da *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2014). Esta insuficiência da WRB continua a manifestar-se na versão de 2014 (IUSS Working Group WRB, 2014), apesar da inclusão nesta última de um qualificador *Protospodic*. Com efeito, a definição adoptada para este qualificador corresponde no essencial à de um horizonte espódico de reduzida espessura, pelo que não é aplicável aos *intergrades* em apreço.

### Formação e distribuição dos Podzóis

As características dos *Podzóis* identificados na Mata Nacional de Leiria mostram que a diferenciação do respectivo perfil ocorre em resultado da translocação e iluviação de matéria orgânica e de complexos organo-metálicos, cuja baixa concentração em Al e em Fe facilita a respectiva mobilização (Duchaufour, 1977). Os resultados do presente estudo demonstram que a mobilidade daqueles compostos é mais elevada nos *Podzóis* e solos afins do que nos *Arenossolos*. Entretanto, em muitos destes últimos, o teor de Al presente nos horizontes Ah é ainda muito baixo e permite a translocação de compostos orgânicos, facto que é concordante com o desenvolvimento de horizontes álbicos e de pequenas bolsas enriquecidas em matéria orgânica heterogeneamente distribuídas em camadas subjacentes.

A acumulação iluvial de materiais espódicos apenas se verifica num número relativamente limitado de casos, o que indica que condições propícias à imobilização daqueles compostos não são de ocorrência generalizada. Tais condições são geralmente atribuídas ao aumento em profundidade da carga catiónica dos complexos organo-metálicos devido à alteração dos minerais do material originário (McKeague *et al.*, 1973), à anulação da carga dos complexos organo-metálicos anfotéricos induzida por elevação do pH em profundidade, ou ainda à decomposição da fracção orgânica dos complexos por acção de microorganismos (Lundström *et al.*, 2000; Buurman e Jongmans, 2002). No caso presente, a extrema pobreza em catiões não ácidos do material originário e a pequena variação do pH ao longo do perfil não justificará nem o aumento em profundidade da actividade dos microorganismos, nem a modificação da carga eléctrica dos complexos organo-metálicos. Por outro lado e como referido, nos horizontes iluviais, o teor em catiões metálicos, ainda que mais elevado do que nos restantes horizontes, é ainda muito baixo.

A distribuição espacial dos *Podzóis* e solos afins observados na área de estudo aponta para que a imobilização daqueles compostos se deva principalmente à desaceleração do fluxo de água em profundidade, devida quer à presença de toalhas freáticas, quer à redução de porosidade do substrato mineral associada a descontinuidades litológicas. Com efeito, os solos em causa foram observados sobretudo na zona mais oriental da Mata Nacional de Leiria (Figura 1), próximo do contacto entre os materiais dunares e as formações pliocénicas, onde a toalha freática pode subir a menos de 1 m de profundidade no Inverno, bem como junto ao sopé de dunas do cordão dunar intermédio, em zona levemente depressionária, onde a toalha freática se pode aproximar da superfície, e numa zona a norte da Mata na qual, a pequena profundidade, ocorrem sedimentos pouco permeáveis de natureza micácea que se admite resultarem do preenchimento de depressões controladas por falhas de orientação sensivelmente NE-SW relacionadas com a abertura do Atlântico Norte e a posterior evolução tectónica e sedimentar da Bacia Lusitaniana (Paulo Fonseca, comunicação pessoal). A ocorrência de toalhas freáticas a pequena profundidade está, aliás, frequentemente associada à diferenciação de solos análogos aos referidos, a exemplo do que é referido por Righi e Wilbert (1984) para *Podzóis* das *Landes* da Gasconha (França), que ocorrem so-

bre materiais arenosos e em correspondência com povoamentos de *P. pinaster*. Este tipo de substrato litológico, quase sempre muito pobre em catiões não ácidos e de elevada permeabilidade é, de resto, fundamental para o desenvolvimento destes solos em condições de clima temperado. Tenha-se em conta, por exemplo, que os *Podzóis* da região costeira da Galiza (Espanha), ainda que desenvolvidos em meio mais pluvioso do que o da área de estudo, também ocorrem exclusivamente sobre tais materiais (Macías-Vazquez *et al.*, 1987).

A possível influência do relevo e da antiguidade das formações arbóreas na evolução dos *Podzóis* da Mata Nacional de Leiria não é discernível, dado que, por exemplo, as áreas planas e as mais antigas da Mata coincidem em geral com aquelas em que ocorrem as características litológicas e as condições hidrológicas consideradas favoráveis à diferenciação de *Podzóis*. Assim, parece inequívoco que a diferenciação dos solos identificados na Mata Nacional de Leiria (Figura 2) está grandemente associada às especificidades locais da geologia e das respectivas condições hidrológicas.

Deste modo, os *Podzóis* e intergrades *Arenossolos/ Podzóis* ocupam uma extensão geográfica bastante limitada na área estudada, na qual os *Arenossolos Háplicos* e *Álbicos* são largamente predominantes. Os resultados do presente estudo sugerem, ainda, que muitas das unidades-solo enquadradas nos *Solos Podzolizados* que ocorrem na faixa litoral do País e nas bacias do Tejo e do Sado (Cardoso *et al.*, 1973) não corresponderão a *Podzóis* (*sensu* WRB), dado que as respectivas características físicas e químicas se afastam bastante das que tipificam estes últimos. Este assunto deverá ser aprofundado e levado em devida conta num futuro trabalho de síntese da cartografia dos solos do Portugal.

## Conclusões

Os solos da área de estudo distribuem-se exclusivamente pelos agrupamentos principais *Podzóis* e *Arenossolos* da WRB 2006. Os horizontes superficiais são morfologicamente semelhantes, embora os dos *Podzóis* sejam algo menos pobres em carbono, mais ácidos e mais distróficos do que os dos *Arenossolos*. Os *Podzóis* apresentam horizontes álbicos espessos e horizontes espódicos cimentados (*ortstein*) bastante escuros, em regra incipientes, com teores de carbono pouco acima do valor mí-

nimo admissível para assim serem considerados e teores muito baixos de Al e Fe extraíveis pelo oxalato. Os *Arenossolos* estão igualmente sujeitos a um processo evolutivo de natureza podzolizante. Alguns deles apresentam perfis com morfologia semelhante à dos *Podzóis*, mas com acumulação iluvial de carbono orgânico e de Fe e Al muito menos acentuada, tratando-se de “*intergrades*” entre *Arenossolos* e *Podzóis* que não são enquadráveis no sistema WRB (2006 e 2014). Na maior parte dos casos a acumulação iluvial daqueles compostos não ocorre, ou é muito discreta, e os solos enquadram-se nos *Arenossolos Alvícos* ou *Háplicos*. A natureza quartzosa e a elevada permeabilidade do material originário são determinantes do processo podzolizante e das características dos solos estudados. A expressão da podzolização está grandemente associada a variações das formações geológicas e hidrológicas locais. São necessários estudos mais detalhados para investigar a possível influência do relevo, da natureza da vegetação e do tempo na evolução dos solos da Mata Nacional de Leiria.

## Agradecimentos

O presente estudo foi realizado no âmbito das actividades do Centro de Estudos Florestais (PEst – OE/AGR/UI0239/2011 e PEst – OE/AGR/UI0239/2014). Os autores agradecem ao Professor Mário Lousã a classificação das espécies da vegetação sob coberto e ao Professor Paulo Fonseca esclarecimentos sobre as formações geológicas da área de estudo. Aos Eng.<sup>os</sup> Silvicultores Rita Gomes e Octávio Ferreira agradecem a disponibilização de informação inerente à Mata Nacional de Leiria. Agradecem ainda ao pessoal do Laboratório de Solos do Departamento de Recursos Naturais, Ambiente e Território do Instituto Superior de Agronomia o processamento analítico das amostras de solo.

## Referências bibliográficas

- Aguiar, C.; Capelo, J. e Catry, F. (2007) - Distribuição dos pinhais em Portugal. In: Silva, J.S. (Ed.) - *Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivada*. Coleção Árvores e Florestas de Portugal, 4. Lisboa, Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento / Público / Liga para a Protecção da Natureza, p. 89-104.
- Auxtero, E. e Madeira, M. (2011) - Forms of Al as extracted by different chloride salts and Al speciated in soil solutions of selected Cambisols derived from granite in Portugal. *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 34, n. 1, p. 65-79.
- Azevedo, A.L. (1944) - Estudo de alguns perfis de solo da Mata Nacional de Leiria. *Revista Agros*, vol. 27, n. 3-6, p. 140-149.
- Berg, B.; Berg, M.; Bottner, P.; Box, P.; Breymeyer, A.; Calvo de Anta, R.; Couteaux, M.; Gallardo, A.; Escudoro, A.; Kratz, W.; Madeira, M.; Mälkönen, E.; Meentemeyer, V.; Munöz, F.; Piussi, P.; Remacle, J. e Virzo de Santo, A. (1993) - Litter mass loss in pine forests of Europe and Eastern United States as compared to actual evapotranspiration on a European scale. *Biogeochemistry*, vol. 20, n. 3, p. 127-153.  
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00000785>
- Blakemore, L.; Searle, C.P.L. e Daly, B.K. (1987) - *Soil bureau laboratory methods: A methods for chemical analysis of soils*. Lower Hutt, New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80, 103 p.
- Bruckert, S. (1979) - Classification des sols bruns ocreux et cryptopodzoliques par analyse des extraits tétraborates tamponnés à pH 9.5. *Geoderma*, vol. 22, p. 205-212.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(79\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(79)90019-3)
- Buurman, P. e Jongmans, A.G. (2002) - Podzolization – An additional paradigm. *Revista Edafologia*, vol. 9, n. 2, p. 107-114.
- Cabrita, C.F.R. (1956) - *Contribuição para o estudo dos solos da Mata Nacional de Leiria. Sua cartografia parcial*. Relatório Final do Curso de Engenheiro Silvicultor. Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- Cardoso, J.V.C. (1965) - *Os solos de Portugal – Sua classificação, caracterização e génese. 1 – A Sul do Rio Tejo*. Lisboa, Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, 311 p.
- Cardoso, J.V.C. (1974) - A classificação dos solos de Portugal – Nova versão. *Boletim de Solos do S.R.O.A.*, n. 17, p. 14-46.
- Cardoso, J.C.; Bessa, M.T. e Marado, M.B. (1973) - Carta dos solos de Portugal (1:1 000 000). *Agronomia Lusitana*, vol. 33, n. 1-4, p. 481-602.
- De Leenher, L. e Van Hove, J. (1958) - Determination de la teneur en carbone organique des sols. *Pédologie*, vol. 8, p. 39-77.
- Driessen, P.M.; Deckers, J.; Spaargaren, O.; Nachtergaele, F. e Dudal, R. (2001) - *Lecture notes on the major soils of the world*. World Soil Resources Reports 94. Rome, FAO, 334 p.
- Duchaufour, Ph. (1977) - *Pédologie. 1- Pédogenèse et classification*. Masson, Paris. 477 p.
- FAO. (1974) - *FAO-Unesco soil map of the world, 1:5 000 000, Vol. 1, Legend*. Paris, Unesco.



- FAO. (2006) - *Guidelines for soil description*, 4th edition. Rome, FAO.
- García-Rodeja, E.; Nóvoa, J.C.; Pontevedra, X.; Martínez-Cortizas, A. e Buurman, P. (2004) - Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena*, vol. 156, p. 155-183.
- Gusmão, M.R. e Madeira, M. (1986). Estudo dos Solos Podzolizados de Portugal Continental a partir das extracções selectivas do carbono, alumínio e ferro. *Pedon*, n. 6, p. 55-81.
- Hargrove, W.L. e Thomas, G.W. (1981) - Extraction of aluminum from aluminum-organic matter complexes. *Soil Science Society America Journal*, vol. 45, n. 1, p. 151-153.  
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500010032x>
- Hargrove, W.L. e Thomas, G.W. (1984) - Extraction of aluminum from aluminum-organic matter in relation to titratable acidity. *Soil Science Society America Journal*, vol. 48, n. 6, p. 1458-1460.  
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060052x>
- Higashi, T.; De Coninck, F. e Gelaude, F. (1981) - Characterization of some podolic horizons of the Campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide-tetraborate. *Geoderma*, vol. 25, n. 1-2, p. 131-142.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(81\)90010-0](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(81)90010-0)
- Higashi, T. e Ikeda, H., (1974) - Dissolution of allophane by acid oxalate solution. *Clay Science*, vol. 4, n. 5, p. 205-211.  
<http://doi.org/10.11362/jcssjclayscience1960.4.205>
- INMG. (1991) - Normas climatológicas da Região de "Ribatejo e Oeste", correspondentes a 1951-1980. In: *O clima de Portugal, Fasc. XLIX, Vol. 2-2.ª Região*. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia (INMG).
- IUSS Working Group WRB. (2006) - *World reference base for soil resources*. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. Rome, FAO, 128 p.
- IUSS Working Group WRB. (2014) - *World reference base for soil resources 2014*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome, FAO, 181 p.
- Jersak, J.; Amundson, R. e Brimhall, G. (1995) - A mass balance analysis of podzolization: examples from the northeastern United States. *Geoderma*, vol. 66, n. 1, p. 15-42.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00064-H](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(94)00064-H)
- Juo, A.S.R. e Kamprath, E.J. (1979) - Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Science Society America Journal*, vol. 43, n. 1, p. 35-38.  
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300010006x>
- Kaiser, K. e Zech, W. (1996) - Defects in estimation of aluminum in humus complexes of podzolic soils by pyrophosphate extraction. *Soil Science*, vol. 161, p. 452-458.
- Lundström, A.S.; van Breemen, N. e Bain, D. (2000) - The podzolization process. A review. *Geoderma*, vol. 97, n. 2-4, p. 91-107.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00036-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00036-1)
- Macías-Vasquez, F.; Fernandez-Marcos, M.-L. e Chesworth, W. (1987) - Transformations mineralogiques dans les Podzols et les Sols Podzoliques de Galice (NW Espagne). In: Righi, D. e Chauvel, A. (Eds.) - *Podzols et podzolization*. Paris, Association Française pour l'Étude du Sol, INRA-Institut National de la Recherche Agronomique, p. 163-177.
- Madeira, M. e Jeanroy, E. (1984) - Mise en évidence de goethite en suspension dans les extraits pyrophosphate e tetraborate de certains sols gréseux du Portugal. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 64, n. 4, p. 505-514.  
<http://dx.doi.org/10.4141/cjss84-052>
- Madeira, M.; Monteiro, F. e Fonseca, M. (2007) - Solos podzolizados em Portugal: ficção e realidade. O Solo, a paisagem e o uso da Terra. In: *Encontro Anual da Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo*, 4-6 de Julho de 2007, p. 27, Vila Real.
- Madeira, M.; Fabião, A.; Páscoa, F.; Magalhães, M.C.; Cameira, M.C. e Ribeiro, C. (2009) - Carbono e nutrientes na biomassa aérea arbórea, vegetação sob coberto e solo numa cronosequência de povoamentos de pinhal bravo. *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 32, n. 2, p. 154-170.
- Marques, P.J.P. (2010) - *Os solos da Mata Nacional de Leiria: características e classificação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agronómica. Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, 59 p.
- McKeague, J.A. (1967) - An evaluation of 0,1 M pyrophosphate and pyrophosphate-dithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in Podzols an some other soils. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 47, p. 95-99.
- McKeague, J.A. e Day, J.H. (1966) - Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 46, n. 1, p. 13-22.  
<http://dx.doi.org/10.4141/cjss66-003>

- McKeague, J. A.; Macdougall, J. I. e Miles, N. M. (1973) - Micromorphological, physical, chemical, and mineralogical properties of a catena of soils from Prince Edward Island in relation to their classification and genesis. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 53, p. 281-295.
- Mehra, O.P. e Jackson, M.L. (1960) - Iron removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, vol. 7, p. 377-327.
- Mokma, D.L. e Buurman, P. (1982) - *Podzols and podzolization in temperate regions*. ISM Soil Monograph 1. Wageningen, ISRIC- World Soil Information (International Soil Museum, ISM), 126 p.
- Oliveira, A.F. (1967) - *Estudo da matéria orgânica nas unidades de solos cartografados em Portugal*. Lisboa, Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção-Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, 173 p.
- Parfitt, R.L. e Childs, C.W. (1988) - Estimation of forms of Fe and Al: A review and analysis of contrasting soils using dissolution and Mossbauer methods. *Australian Journal of Soil Research*, vol. 26, n. 1, p. 121-144.  
<http://dx.doi.org/10.1071/SR9880121>
- Paterson, E.; Clark, L. e Birnie, C. (1993) - Sequential selective dissolution of iron, aluminium, and silicon from soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 24, n. 15-16, p. 2015-2023.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00103629309368933>
- Rhoades, J. D. (1982) - Cation exchange capacity. In: Page, A. L., Miller, R. H. e Keeney, D.R. (Eds.) - *Methods of soil analysis. Part 2 - Chemical and microbiological* (2nd edition). Series Agronomy number 9. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy and Soil Science Society, p. 149-157.
- Righi, D. e Wilbert, J. (1984) - Les sols sableux podzoliques des Landes de Gascogne (France): répartition et caractères principaux. *Science du Sol*, vol. 4, p. 253-264.
- Schnitzer, M. e Khan, S.V. (1972) - *Humic substances in the environment*. New York, Marcel Deckker, 327 p.
- Schwertmann, U. (1964) - Differenzierung der eisenoxyde des bodens durch extraktion mit ammoniumoxalat-lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde*, vol. 105, p. 194-202.  
<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.3591050303>
- Soil Survey Staff. (2014) - *Keys to soil taxonomy, 12th edition*. Washington, DC, USDA-Natural Resources Conservation Service, 360 p.
- SPCS (Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo). (2004) - *Bases para a revisão e actualização da classificação dos solos em Portugal*. Protocolo entre o Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica e a Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo. Lisboa, Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo, 50 p. Disponível em: <<http://www.spcs.pt/index.php?/Temas/Solos-de-Portugal>>.
- Suárez Abelenda, M.; Buurman, P.; Camps Arbestain, M.; Kaal, J.; Martínez-Cortizas, A.; Gartzia-Bengoetxea, N. e Macías, F. (2011) - Comparing NaOH-extractable organic matter of acid forest soils that differ in their pedogenic trend: a pyrolysis GC/MS study. *European Journal of Soil Science*, vol. 62, n. 6, p. 834-848.  
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01404.x>
- Sumner, M.E. e Miller, W.P. (1996) - Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Bigham, J. M. (Ed.) - *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*. Soil Science Society of America Book Series 5. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America and Agronomy Society of America, p. 1201-1229.
- Ugolini, F.C. e Dahlgren, R. (1987) - The mechanism of podzolization as revealed by soil solution studies. In: Righi, D. e Chauvel, A. (Eds.) - *Podzols et podzolization*. Paris, Association Française pour l'Étude du Sol, INRA-Institut National de la Recherche Agronomique, p. 195-203.
- Urrutia, M.; Macías, F. e García-Rodeja, E. (1995) - Evaluación del CuCl<sub>2</sub> y del LaCl<sub>3</sub> como extractantes de aluminio en suelos ácidos de Galicia. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, Santiago de Compostela, vol. 5, p. 173-182.
- Wada, K. e Greenland, D.J. (1970) - Selective dissolution and differential infrared spectroscopy for characterization of amorphous constituents in soil clays. *Clay Minerals*, vol. 8, p. 241-254.
- Zbyszewski, G. e Torre de Assunção, C. (1965) - *Carta geológica de Portugal (escala de 1:50 000). Notícia explicativa da folha 22-D (Marinha Grande)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, 45 p.
- Zbyszewski, G. (1965) - *Carta geológica de Portugal (escala de 1:50 000). Notícia explicativa da folha 22-B (Vieira de Leiria)*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, 20 p.