

## **II-375 – UTILIZAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS PARA INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS TRATADAS**

### **Flora Silva<sup>(1)</sup>**

Licenciada e Mestre em Engenharia Civil pela Universidade da Beira Interior. Equiparada a Assistente de 1º Triénio, Departamento de Construções Cíveis e Planeamento, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança. Doutoranda em Engenharia Civil na Universidade da Beira Interior.

### **António Albuquerque**

Prof. Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior.

### **Margarida Arrobas**

Prof.<sup>a</sup> Adjunta, Departamento de Ambiente e Recursos Naturais, Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança, Centro de Investigação de Montanha.

### **Victor Cavaleiro**

Prof. Catedrático, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior.

### **Helena Marecos do Monte**

Prof.<sup>a</sup> Coordenadora, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

### **Paulo Scalize**

Prof. Adjunto, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Apartado 1134, 5301-857 Bragança, Portugal – Tel: +351-273-303000 - Fax: +351-273-313051 - e-mail: [flora@ipb.pt](mailto:flora@ipb.pt)

## **RESUMO**

A reutilização de águas residuais tratadas (ART) é praticada, na maioria dos casos, como uma estratégia de conservação da água em regiões onde os recursos hídricos são escassos, mas também por motivos ambientais, a fim de se preservar a qualidade da água de meios recetores, reduzindo a descarga de efluentes de estações de tratamento de águas residuais (ETAR). Nos próximos anos, a região da Beira Interior (Portugal) necessitará de um maior volume de água, não só para atividades domésticas e industriais, mas também para atividades agrícolas (cobertas pelo Plano de Regadio da Cova da Beira) e recreativas (rega de campos de golfe, áreas desportivas e de lazer), uma vez que o Turismo é uma das apostas de desenvolvimento da região. Assim, a recarga de aquíferos pode constituir uma alternativa para o restabelecimento de volumes de água subterrânea que poderão ser utilizados para satisfazer parte daquelas atividades. Após uma campanha de monitorização de dois anos na ETAR de Vila Fernando (Guarda, Portugal), as características do efluente tratado sugerem que poderia ser utilizado para infiltração no solo. Optou-se por um tipo de recarga por bacias de infiltração, tendo sido realizada, para a sua localização, uma análise multicritério baseada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), combinando seis cartas temáticas e critérios ambientais, técnicos e económicos. O procedimento de cálculo envolveu a sobreposição de áreas de exclusão e inclusão de cada uma das cartas temáticas sobre a área de estudo, através de operações algébricas de mapas. Obteve-se uma Carta de Aptidão final que indica uma área favorável de 6,4 ha para infiltração de ART no solo. Num dos locais selecionados, recolheram-se amostras de solo residual de granito, indicando os resultados das análises que este apresenta características favoráveis à infiltração de ART.

**PALAVRAS-CHAVE:** Infiltração, Águas Residuais Tratadas, SIG, Solos Residuais, Reutilização

## **1 INTRODUÇÃO**

A crescente prática de reutilização de ART tem vindo a ser motivada essencialmente pela escassez de recursos hídricos (decorrente de uma situação natural, como por exemplo o clima da região, ou como consequência do crescimento demográfico e do desenvolvimento sócio-económico) e pela necessidade de proteção dos meios hídricos recetores dos efluentes de ETAR. Para Marecos do Monte e Albuquerque (2010) há a necessidade de uma gestão sustentável dos recursos hídricos, na qual se inclui a conservação da água, e onde a reutilização de águas residuais tratadas representa uma componente estratégica importante.

Os recursos hídricos subterrâneos constituem, hoje em dia, uma importante fonte de abastecimento urbano, industrial e agrícola, podendo, no entanto, ser afetados por problemas associados à sua sobre-exploração, o que está relacionado com os volumes de extração, geralmente elevados, que não sendo compensados pela recarga de aquíferos, provocam um rebaixamento acentuado da piezometria a nível local e regional (Diamantino, 2009).

O aumento da procura de água na região da Beira Interior (Portugal), particularmente nas áreas áridas e semi-áridas, revela a importância de se preservar ou reforçar as origens de água subterrânea. Muitos dos aquíferos da região estão sobre-explorados, devido ao aumento da necessidade de água para rega agrícola e paisagística.

Uma das formas que poderia contribuir para manter as reservas de água no solo seria, como sugerido por Bower (2002), a recarga de aquíferos com ART, que pode ser feita por injeção direta ou por infiltração no solo (neste caso, durante o percurso de infiltração através do solo, as características da água sofrem um tratamento de afinação natural proporcionado por mecanismos de filtração, adsorção e biodegradação, resultando na redução de partículas em suspensão, de teores residuais de compostos orgânicos e de microrganismos, nomeadamente vírus). A recarga indireta por infiltração é um método interessante para a gestão de volumes extraídos em zonas de sobre-exploração do recurso, além de funcionar como processo de tratamento de afinação. A infiltração rápida em bacias de infiltração consiste no chamado SAT (*Soil Aquifer Treatment*), que não requer um tratamento prévio das águas residuais tão completo, antes constituindo um processo de tratamento complementar, que chega mesmo à desinfecção (Asano *et al.*, 2007).

A definição de uma metodologia para infiltração de ART requer a recolha, tratamento e análise de informação complexa (por exemplo: tipo e ocupação do solo, características do aquífero, restrições legais e ambientais, características das ART, acessibilidades, entre outros) e de ferramentas para uma análise multicritério. Deste modo, o uso de SIG permite georreferenciar, armazenar, tratar e manipular a referida informação, possibilitando a criação de áreas de exclusão e de potencial aplicação. De referir que os SIG têm sido usados para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição por nitratos (Lake *et al.*, 2003), na criação de cartas de aptidão para aplicação de lamas celulósicas na agricultura (Ribeiro *et al.*, 2010), para identificar a localização de ETAR (Gemitzia *et al.*, 2007) e na recarga de aquíferos (Kallali *et al.*, 2007).

O objetivo principal deste estudo incidiu na identificação de locais com solo residual (solos que ocupam o lugar da rocha que lhes deu origem, a chamada *rocha-mãe* e em que as partículas resultantes da alteração e da decomposição da rocha não sofreram qualquer transporte, como referido em (Matos Fernandes, 2011)), utilizando uma análise multicritério baseada em SIG, bem como na recolha de amostras de solo e posterior análise a fim de perceber se o solo tem boas características para a infiltração de ART.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 IDENTIFICAÇÃO DE LOCAIS PARA INFILTRAÇÃO DE ART

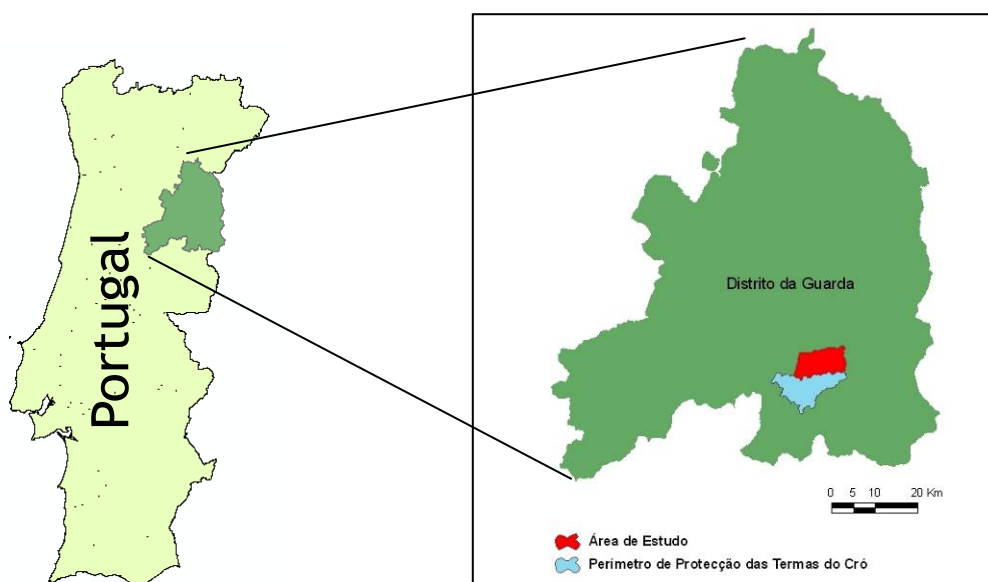
Para a seleção dos locais com potencial de infiltração, foi considerada uma área de 6687,1 ha, próxima de Vila Fernando (Guarda, Portugal) (Figura 1), com solos do tipo antrossolos (61,81%), seguindo-se os umbrissolos (22,56%), regossolos (13,94%) e cambissolos (1,69%). No que refere à ocupação do solo, está dividida em agricultura com espaços naturais e semi-naturais (28,17%), culturas temporárias de sequeiro (1,87%), florestas abertas, cortes e novas plantações (30,61%), florestas de folhosas (5,29%), matos (1,51%), pastagens permanentes (2,67%), sistemas culturais e parcelares complexos (21,64%) e vegetação herbácea natural (8,24%).

Selecionou-se a ETAR de Vila Fernando como origem das ART, tendo sido utilizados dados de caudal e parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de uma campanha de monitorização anterior (Silva *et al.*, 2012), nomeadamente pH, temperatura, carência bioquímica de oxigénio (CBO<sub>5</sub>), carência química de oxigénio (CQO), sólidos suspensos totais (SST), azoto amoniacal (N-NH<sub>4</sub>), azoto nítrico (N-NO<sub>3</sub>), azoto total (NT), fósforo total (PT), condutividade elétrica (CE), sódio (Na), cálcio (Ca), potássio (K), cloro (Cl), coliformes totais (CT), coliformes fecais (CF), E. Coli e ovos de *Helmintha* (OH). Nas últimas 3 amostragens, foram também determinados o magnésio (Mg), boro (B), cádmio (Cd), crómio (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn).

Para gerar uma carta de solos com aptidão para infiltração de ART utilizou-se uma análise multicritério baseada em SIG (usando o software *ArcGIS 9.3* e aplicativos *ArcCatalog*, *ArcMap* e *ArcToolbox*), utilizando 6 cartas temáticas (tipo de solo, ocupação do solo, origens de água, aglomerados urbanos, declives e distância à origem de produção de ART) e as seguintes restrições:

- ambientais: distâncias mínimas para cursos de água, localização de vias e de aglomerados urbanos;
- económicas: de modo a diminuir os custos de transporte das ART desde a ETAR até ao local de aplicação, deve existir uma distância máxima de 8 Km;
- técnicas: carta de declives (as áreas para infiltração deverão ter um declive inferior a 12%, pois declives mais elevados aumentam o escoamento e a erosão do solo, gerando instabilidade), carta de uso ou de ocupação do solo, textura do solo (para evitar a colmatção do solo e para assegurar um adequado tratamento da água residual, o solo deve ter menos de 10% de argila), tipo de solo (o solo para infiltração de ART não deve ter rocha no topo, uma vez que grande parte da melhoria da qualidade da água reutilizada ocorre no primeiro metro de solo), profundidade do aquífero (deve ser suficientemente profundo e transmissivo para prevenir aumentos excessivos de água no solo devido à infiltração).

O procedimento de cálculo envolveu a sobreposição das áreas de exclusão e inclusão de cada uma das cartas temáticas sobre a área de estudo, através de operações algébricas de mapas.



**Figura 1: Localização da área de estudo**

## 2.2 RECOLHA E CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS

Num dos locais seleccionados (Figura 2-b) recolheram-se amostras de solo (Figura 2-c) e realizaram-se ensaios *in situ* e em laboratório. Algumas propriedades físicas foram determinadas *in situ*, nomeadamente o peso volúmico nos estados natural ( $\gamma_o$ ) e seco ( $\gamma_d$ ), o teor de água natural ( $w_o$ ), o índice de vazios ( $e_o$ ) e a porosidade ( $\eta$ ), de acordo com os procedimentos descritos por Cavaleiro (2001) e Duarte (2002).

Em laboratório, determinou-se a análise granulométrica, seguindo a Especificação do LNEC (E 239-1970), realizando-se ainda a análise da fração inferior a 0,075 mm, seguindo a Especificação do LNEC (E 196-1966). Foram determinados os limites de consistência, nomeadamente o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), seguindo a Norma Portuguesa (NP-143:1969). A classificação geotécnica seguiu o Sistema Unificado (ASTM D 2487-85).

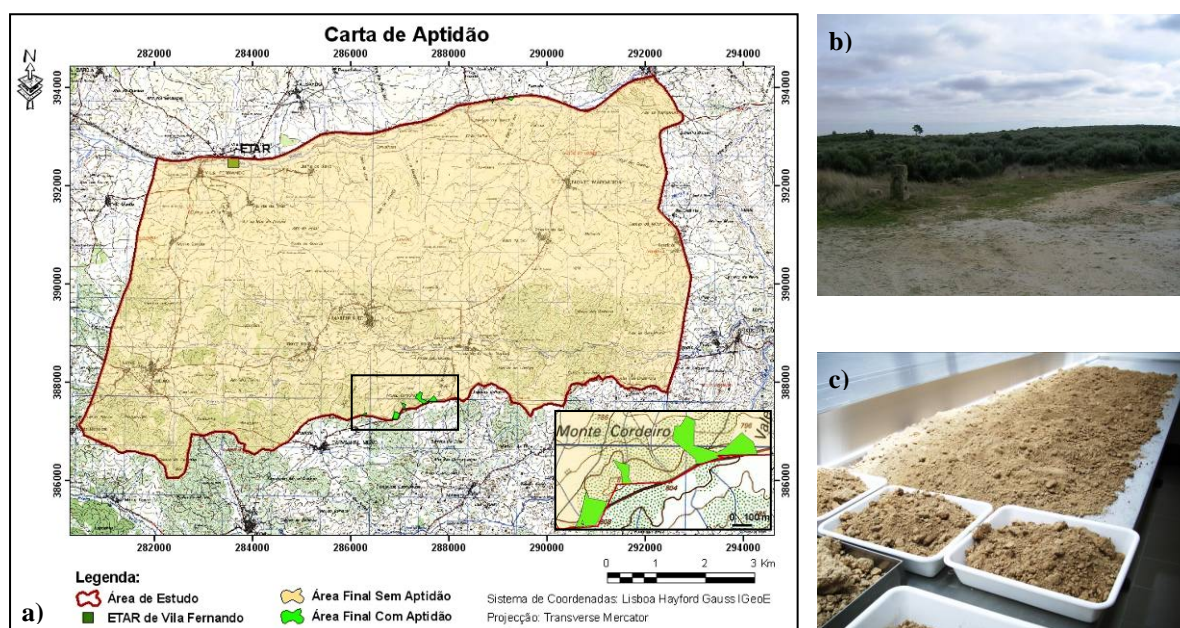
Determinou-se ainda a densidade das partículas sólidas (Gs), seguindo a Norma Portuguesa (NP-83:1965), e a permeabilidade (k) em laboratório, utilizando o permeâmetro de carga constante, com a metodologia descrita em Cavaleiro (2001).

O teor em matéria orgânica existente no solo foi determinado pelo método de Walkley-Black, descrito por Nelson e Sommers (1996), o pH, determinado em água, pelo método potenciométrico, em suspensão solo:água (1:2,5), descrito por Van Reeuwijk (2002), a capacidade de troca catiónica (pelo método acetato de amónio tamponizado a pH7), descrito em (Houba *et al.*, 1995) e a superfície específica (fracção de solo < 0,075 mm), recorrendo ao analisador de partículas (Coulter LS 200). Procedeu-se, ainda, à determinação da composição em óxidos através de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) com um equipamento Hitachi, modelo S-2700 (EUA).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DE SOLOS PARA INFILTRAÇÃO DE ART

A área geográfica seleccionada para realização do estudo desenvolve-se entre a ETAR de Vila Fernando (Guarda, Portugal) e o limite superior do perímetro de proteção das Termas do Cró (Figura 2-a). A análise multicritério consistiu na aplicação do método de sobreposição booleana (como sugerido por Kallali *et al.*, 2007) que consistiu na reclassificação de variáveis (cartas temáticas) na forma binária (0/1), tendo estas sido posteriormente combinadas de acordo com operações lógicas de interseção e união de carácter inclusivo (áreas de possível aptidão) e exclusivo (áreas sem aptidão), como referido por Silva *et al.*, (2012). Na Figura (2-a) apresenta-se a Carta de Aptidão final com localização das áreas potenciais para infiltração de ART.



**Figura 2: a) Carta de Aptidão para infiltração de ART; b) Local seleccionado para infiltração de ART no solo; c) Amostras de solo residual recolhidas num dos locais seleccionados**

Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas às ART (apresentadas em Silva *et al.*, 2012) permitem verificar que as concentrações de NT, N-NH<sub>4</sub> e PT seriam elevadas para descarga em cursos de água ou utilização em rega agrícola e que as concentrações de compostos inorgânicos e a carga microbiológica são similares à dos efluentes secundários caracterizados por Marecos do Monte e Albuquerque (2010). Se a aplicação fosse para fins agrícolas, urbanos, industriais ou paisagística, tendo em atenção os limites admissíveis em vários estudos (Marecos do Monte e Albuquerque, 2010 e Asano *et al.*, 2007), a ART necessitaria de um

tratamento complementar para reduzir as cargas de azoto, fósforo e microbiológica, previamente à sua utilização.

Assim, a sua infiltração no solo, além de possibilitar um tratamento complementar na zona vadosa e a recarga de aquíferos, evitaria investimentos na ETAR para incluir um tratamento de afinação.

Quando a infiltração é efetuada à superfície do solo ou na zona não saturada (zona vadosa), grande parte da matéria orgânica, formas de azoto e de fósforo e metais pesados são removidos ou convertidos no primeiro metro de solo (Asano *et al.*, 2007). Ou seja, o solo funciona como um sistema de tratamento por meio poroso (designado por *Soil Aquifer Treatment*) (Marecos do Monte e Albuquerque, 2010). A maior preocupação reside nos nitratos, que resultam da oxidação do amónio, e na carga bacteriológica. Se a zona de infiltração se localizar em solos arenosos permeáveis, com um afastamento do nível freático de inverno superior a 5 m (*i.e.* uma altura mínima da zona não saturada de 5 m), que permita a aplicação de taxas de infiltração entre 0,2 e 1 m/d, a concentração final de matéria orgânica, azoto amoniacal, nitritos, nitratos, SST, metais pesados e carga bacteriológica será reduzida significativamente (Asano *et al.*, 2007).

Na área em estudo, a profundidade do aquífero varia entre 10 e 50 m (Pedrero *et al.*, 2011). Sendo assim, o local mais adequado para a localização de bacias de infiltração, deverá ser uma zona com solo arenoso e fino, que permita uma velocidade de infiltração da ordem de 1 m/d, apropriada para a infiltração de ART no solo, ou até superior, uma vez que a altura da zona não saturada é superior a 10 m, que está representada a verde na Figura 2-a.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO RESIDUAL

Os resultados dos ensaios realizados *in situ* e em laboratório são apresentados na Tabela 1, e verifica-se que são típicos de solos residuais de granito, como apresentado em Matos Fernandes (2011), Duarte (2002) e Cavaleiro (2001).

**Tabela 1: Caracterização física e geotécnica do solo residual de granito**

Parâmetro	Valor
Peso volúmico natural ( $\gamma_0$ )	17,52 KN/m <sup>3</sup>
Teor em água natural ( $w_0$ )	10,45 %
Índice de vazios natural ( $e_0$ )	0,63
Porosidade ( $\eta$ )	38,0 %
Peso volúmico seco ( $\gamma_d$ )	16,0 KN/m <sup>3</sup>
Granulometria:	
Argila (< 0,002 mm)	4,94 %
Silte (0,002 – 0,06 mm)	13,76 %
Areia (0,06 – 2,0 mm)	59,6 %
Classificação Unificada	SM (Areia Siltosa)
Limite de liquidez (LL)	31,0 %
Limite de plasticidade (LP)	29,6 %
Índice de Plasticidade (IP)	1,0 %
Densidade das partículas sólidas ( $G_s$ )	2,65
Superfície específica (SE)	2834 cm <sup>2</sup> /g
Matéria orgânica (MO)	0,25 %
Capacidade de troca catiónica (CTC) a pH7	5,99 cmol/Kg
pH em H <sub>2</sub> O	4,41
Coeficiente de Permeabilidade (k), em laboratório	3,23 x 10 <sup>-5</sup> m/s

O solo pode ser classificado como uma areia siltosa, com uma percentagem considerável de areia. A percentagem de argila é muito baixa, menos de 5%, o que significa que a maior parte dos finos são essencialmente siltosos. É um solo que apresenta uma granulometria extensa, mas bem graduado. Tem baixa plasticidade, podendo ser considerado não plástico, o que está de acordo com a reduzida percentagem de argila observada (a pouca argila que existe é pouco ativa).

O teor em água é relativamente baixo (parâmetro dependente da altura do ano em que se procede à recolha de amostras), apresentando um índice de vazios e porosidade médios. A densidade das partículas sólidas é típica de solos residuais de granito. O solo é pobre em matéria orgânica (o teor deste parâmetro é muito baixo) e ácido (pH baixo), o que está de acordo com o observado por Ribeiro (2008) para solos da Beira Interior. A capacidade de troca catiónica é baixa, favorecendo os catião  $\text{Ca}^{2+}$ , enquanto a superfície específica (na fração < 0,075 mm), típica dos siltes e areias, cuja forma é granular, é bastante reduzida. A permeabilidade (k) deste solo pode ser considerada média, o que é característico de solos arenosos com mais ou menos silte.

A composição em óxidos é apresentada na Tabela 2, verificando-se que é semelhante à de solos residuais de granito caracterizados por Duarte (2002) e Cavaleiro (2001). O solo analisado neste estudo contém essencialmente sílica e alumina, o que era espetável dado que as argilas e siltes têm uma estrutura aluminossilicada, com teores menos elevados de ferro e de potássio.

**Tabela 2: Caracterização química do solo residual de granito em percentagem de óxidos**

Óxidos	Valor (%)
$\text{Na}_2\text{O}$	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25,70
$\text{SiO}_2$	65,63
$\text{K}_2\text{O}$	5,85
$\text{CaO}$	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,82

#### 4. CONCLUSÕES

A partir de cartas temáticas e restrições de natureza ambiental, económica e técnica, com recurso a uma análise multicritério em SIG, obteve-se uma Carta de Aptidão que indica uma área favorável de 6,4 ha para a infiltração de ART em solos residuais de granito de Vila Fernando (Guarda, Portugal). A reutilização de ART de uma pequena ETAR em áreas rurais pode, assim, constituir uma fonte de água alternativa para a recarga de aquíferos. Os resultados das análises do solo residual indicam que este apresenta características adequadas à infiltração de ART, sendo necessário elaborar estudos complementares em coluna laboratorial para determinar, quer a velocidade de infiltração mais adequada para o transporte e remoção dos constituintes das ART, quer os mecanismos de remoção.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASANO, T., BURTON, F., LEVERENZ, H., TSUCHIHASHI, R.E., TCHOBANOGLIOUS, G. Water Reuse: Issues, Technologies and Applications, McGraw-Hill, New York, USA, 2007.
2. ASTM D 2487-85. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes.
3. BOWER, H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, nº10, p. 121-142, 2002.
4. CAVALEIRO, V. Condicionantes geotécnicas à expansão do núcleo urbano da Covilhã. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2001.
5. DIAMANTINO, C. Recarga artificial de aquíferos: aplicação ao sistema aquífero da campina de Faro, Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.
6. DUARTE, I.M.R. Solos residuais de rochas granitóides a sul do Tejo: características geológicas e geotécnicas, Tese de Doutoramento, Universidade de Évora, Évora, Portugal, 2002.
7. ESPECIFICAÇÃO LNEC E 196-1966. Solos. Análise granulométrica, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
8. ESPECIFICAÇÃO LNEC E 239-1970. Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
9. GEMITZIA, A., TSIHRINTZIS, V.A., CHRISTOUC, O., PETALAS, C. Use of GIS in siting stabilization pond facilities for domestic wastewater treatment, *Journal of Environmental Management*, nº82, p. 155-166, 2007.
10. HOUBA, V.J.G., VAN DER LEE, J.J., NOVOZAMSKY, I. Soil Analysis Procedures, Other procedures Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, 1995.

11. KALLALI, H., ANANE, M., JELLALI, S., TARHOUNI, J. GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge sites, *Desalination*, v. 215, p. 111-119, 2007.
12. LAKE, I.R., LOVETT, A.A., HISCOCK, K.M., BETSON, M., FOLEY, A., SUNNENBERG, G., EVERS, S., FLETCHER, S. Evaluation factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potencial of GIS, *Journal of Environmental Management*, nº68, p. 315-328, 2003.
13. MARECOS DO MONTE, H., ALBUQUERQUE, A. Reutilização de águas residuais, *Guia Técnico*, nº14, Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, Lisboa, 339 pp., 2010.
14. MATOS FERNANDES, M. *Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais*, v.1, 2ªEdição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 463 pp., 2011.
15. NELSON, D. W., SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter, In *Methods of soil analysis*, Part 3, Chemical Methods – SSSA, Book series n.º5, p. 961-1010, 1996.
16. NORMA PORTUGUESA NP-143:1969. Determinação dos limites de consistência, Lisboa, Portugal.
17. NORMA PORTUGUESA NP-83:1965. Determinação da densidade das partículas, Lisboa, Portugal.
18. PEDRERO, F., ALBUQUERQUE, A., MARECOS DO MONTE, H., CAVALEIRO, V., ALARCÓN, J. Site selection for aquifer recharge with treated wastewater using GIS-based multi-criteria analysis, *Actas do 3rd International Congress on Wastewater in Small Communities (Smallwat11)*, Sevilha, Espanha, Abril, 2011.
19. RIBEIRO, P., ALBUQUERQUE, A., QUINTA-NOVA, L., CAVALEIRO, V. Recycling pulp mill sludge to improve soil fertility using GIS tools, *Resources, Conservation and Recycling*, v.54, p.1303-1311, 2010.
20. SILVA, F., ALBUQUERQUE, A., MARECOS DO MONTE, H., CAVALEIRO, V., CARVALHO, A. Site selection for reclaimed water infiltration using GIS tools, *Actas da IWA Regional Conference on Wastewater Purification and Reuse*, Creta, Grécia, Março, 2012.
21. VAN REEUWIJK. *Procedures for soil analysis*, Sixth edition, ISRIC, FAO, 2002.