

Quantificação dos parâmetros de transporte de solutos do solo na área de influência do perímetro de rega de Alqueva

Quantification of solute transport parameters of soils in Alqueva's irrigation district

Tiago B. Ramos¹, Maria C. Gonçalves², Sara Rodrigues², Fernando P. Pires²,
Abílio Guerreiro² e José C. Martins²

¹ CEER-Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. email: tiago_ramos@netcabo.pt

² Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, UEIS Sistemas Agrários e Florestais e Sanidade Vegetal, Portugal.

Resumo

Neste estudo, determinaram-se os parâmetros de transporte de solutos (coeficiente de difusão-dispersão, D , coeficiente de retardação, R , e velocidade da água no poro, v) de 71 colunas de solo no estado natural, colhidas em 25 perfis localizados em diferentes blocos do perímetro de rega do Alqueva. As curvas de “breakthrough” (BTCs) foram obtidas através da aplicação de um traçador (0.05M de KCl), sob a forma de um pulso (50 ml), nas colunas de solo previamente saturadas e da recolha e análise dos lixiviados ao longo do tempo. A determinação dos parâmetros de transporte foi efectuada com o programa CXTFIT2.1. As BTCs obtidas apresentaram um aparecimento muito rápido do traçador no lixiviado e uma larga assimetria, o que é característico do transporte de solutos em solos bem estruturados e em condições de não-equilíbrio. O modelo de duas regiões foi usado para descrever a evolução das concentrações dos cloretos ao longo do tempo, tendo-se obtido um coeficiente de determinação (R^2) médio de 0.96 para a relação entre as concentrações observadas e estimadas com o modelo. O parâmetro D apresentou, por vezes, valores elevados. Estes valores foram relacionados com o valor da condutividade hidráulica saturada (K_s), sendo também proporcionais à velocidade da água no poro. O parâmetro R foi, geralmente, inferior a 1, o que poderá ser atribuído à exclusão aniónica dos cloretos. A fracção de água móvel foi, de um modo geral, inferior à fracção de água imóvel e o coeficiente de transferência de massa foi geralmente elevado. Os valores elevados de água imóvel e de K_s indicam que o escoamento convectivo se fez apenas por alguns poros de maiores dimensões.

Palavras-chave: Cloretos; Curvas de “breakthrough”; Não-equilíbrio; Parâmetros de transporte de solutos.

Abstract

In this study, solute transport parameters (dispersion coefficient, D , retardation coefficient, R , and the pore-water velocity, v) were determined in 71 undisturbed soil columns collected in different horizons of 25 soil profiles located in different blocks of Alqueva's irrigation district. The breakthrough curves (BTCs) were obtained by applying a tracer (0.05 M KCl) in the form of a pulse (50 ml) in previously saturated soil columns and by collecting and analysing the leachate over time. Solute transport

parameters were determined with the software CXTFIT2.1. The BTCs presented a very fast appearance of the tracer in the leachate and a large tailing, which is a characteristic of non-equilibrium transport in well-structured soils. The two regions transport model was used to describe the concentrations of chloride, yielding an average coefficient of determination (R^2) of 0.96 between observed and estimated values. The parameter D showed sometimes high values. These values were related to the saturated hydraulic conductivity (K_s), and were also proportional to v . The parameter R was generally less than 1 as a result of anion exclusion of chloride. The fraction of mobile water was generally lower than the fraction of immobile water, and the coefficient of mass transfer was generally high. The high values for immobile water and K_s indicated a convective flow through the few existing larger pores.

Keywords: Breakthrough curves; Chloride; Non-equilibrium; Solute transport parameters

Introdução

O transporte de solutos no solo ocorre geralmente em condições de não-equilíbrio, sendo afectado por vários processos químicos e físicos. As condições de não-equilíbrio químico podem ocorrer como resultado de fenómenos de adsorção cinética, enquanto as condições de não-equilíbrio físico resultam de regimes de fluxo heterogéneos. Nestes casos, é frequentemente usado o conceito da existência de duas regiões no meio poroso, isto é, uma região associada aos poros de maiores dimensões, em que a fase líquida é móvel (dinâmica) e o transporte de solutos dá-se essencialmente por convecção, e outra região associada à matriz do solo, em que a fase líquida está imóvel (estagnante) e o transporte de solutos é essencialmente difusivo (van Genuchten e Wierenga, 1976). Assim, enquanto que na equação de convecção-dispersão (CDE) clássica, válida para condições de equilíbrio, é assumido que o soluto é completamente miscível, no modelo de duas regiões, válido para condições de não-equilíbrio físico, presume-se a existência de trocas por difusão entre as regiões móvel e imóvel.

Os parâmetros de transporte de solutos (coeficiente de difusão-dispersão, D , coeficiente de retardação, R , e velocidade da água no poro, v) são fundamentais para a resolução da CDE e para a modelação da dinâmica dos solutos no solo. Estes parâmetros podem ser determinados em laboratório, por modelação inversa, através do ajustamento de soluções analíticas da CDE, à evolução temporal da concentração no ponto de saída de uma coluna de solo – curvas de “breakthrough” (BTCs) na literatura anglo-saxónica - como é exemplo o modelo de duas regiões de van Genuchten e Wierenga (1976). Estas curvas são normalmente representadas em função do número de poros-volume de água extraída para ter em conta a geometria da coluna de solo. Porém, tais determinações são extremamente morosas, dispendiosas e trabalhosas, pelo que, os parâmetros de transporte de solutos, a diferentes escalas, não se encontram geralmente disponíveis para utilização em modelos de simulação da dinâmica de água e do transporte de solutos nos solos, restringindo a sua aplicação (Vanderborght e Vereecken, 2007).

O objectivo deste trabalho foi proceder à determinação dos parâmetros de transporte de solutos em colunas de solo no estado natural, colhidas em solos das principais famílias encontradas no perímetro de rega do Alqueva.

Material e métodos

Os parâmetros de transporte de solutos foram determinados em 71 colunas de solo, colhidas no estado natural (4350 cm³), nos diferentes horizontes/camadas de 25 perfis pertencentes aos grupos de solos de referência (WRB, 2006) mais representativos (Vertisolos háplicos, hipercálcicos e cálcicos; Luvisolos vérticos, háplicos, gleizados, vérticos cálcicos e vérticos gleizados; Calcissolos hipercálcicos e hipercálcicos vérticos) dos blocos do Pisão, Alvito-Pisão, Monte Novo, Ferreira, Alfundão, Orada-Amoreira, Brinches, Brinches-Enxoé, Serpa e Pedrógão, incluídos no perímetro de rega de Alqueva.

Em cada coluna de solo procedeu-se à determinação das curvas de “breakthrough” (BTCs) a partir de ensaios de lixiviação em que o traçador foi aplicado na forma de um pulso. As colunas de solo foram colhidas, preparadas e posteriormente saturadas com água, a partir da sua base inferior, segundo o procedimento descrito em Mallants *et al.* (1994) e Gonçalves *et al.* (2001). Após saturação, adicionou-se-lhes água destilada através de um método de carga constante, de modo a manter, acima da superfície do solo, uma lâmina de água com cerca de 2 cm, até se atingir um regime estacionário. O fornecimento de água destilada foi então interrompido e logo que se deu a infiltração da lâmina de água, aplicou-se, uniformemente, um pulso de 50 cm³ de uma solução 0.05 M de KCl. Após a infiltração da solução aplicada, adicionou-se água destilada à superfície da amostra, mantendo-se novamente uma lâmina de água constante. Com a aplicação do pulso, deu-se início à recolha sucessiva do lixiviado de cada coluna de solo, juntamente com a respectiva medição do volume e da concentração em cloretos.

Os parâmetros de transporte de solutos foram obtidos, por modelação inversa, através do ajustamento do modelo de duas regiões de van Genuchten e Wierenga (1976) aos dados laboratoriais, com o programa de estimação não linear CXTFIT2.1 (Toride *et al.*, 1995) incluído no pacote STANMOD (Šimůnek *et al.*, 1999). O modelo de duas regiões é um modelo de não-equilíbrio físico que tem em conta a assimetria observada nas BTCs. A equação CDE correspondente é deduzida a partir da sua forma clássica, sendo a forma adimensional dada pelas seguintes equações (Toride *et al.*, 1995):

$$\beta R \frac{\partial C_1}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C_1}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_1}{\partial Z} - \omega(C_1 - C_2) \quad (1)$$

$$(1 - \beta) R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \omega(C_1 - C_2) \quad (2)$$

em que, os índices 1 e 2 referem-se às regiões móvel (de equilíbrio) e imóvel (não-equilíbrio) do solo, respectivamente; C é a concentração do soluto [ML⁻³]; β é o coeficiente de partição entre as regiões móvel e imóvel; R é o factor de retardação que descreve o efeito da adsorção no transporte de solutos no solo em condições de equilíbrio linear; ω é o coeficiente de transferência de massa que governa a taxa da troca do soluto entre as duas regiões; $T=vt/L$ é o número de poros-volume, sendo função da velocidade da água no poro v [LT⁻¹], do tempo t [T], e do comprimento da coluna de solo L [L]; $Z=z/L$ é um parâmetro adimensional, função da profundidade z [L] e L ; e $P=vL/D$ é o número de Peclet, que depende de v , L e do coeficiente de difusão-dispersão D [L² T⁻¹]. As condições inicial e aos limites são:

$$C_1(Z, 0) = C_2(Z, 0) = 0 \quad (3)$$

$$C_1(0, T) = \begin{cases} 1 & 0 < T < T_0 \\ 0 & T > T_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial Z}(\infty, T) = 0 \quad (5)$$

onde T_0 é a duração do pulso, dado em percentagem do poro-volume. A concentração é, portanto, imposta à entrada e é assumido um gradiente nulo à saída.

Resultados e discussão

Na Figura 1 apresentam-se, como exemplo, algumas das BTCs obtidas experimentalmente e o resultado do ajustamento conseguido com o modelo de não-equilíbrio de duas regiões de van Genuchten e Wierenga (1976).

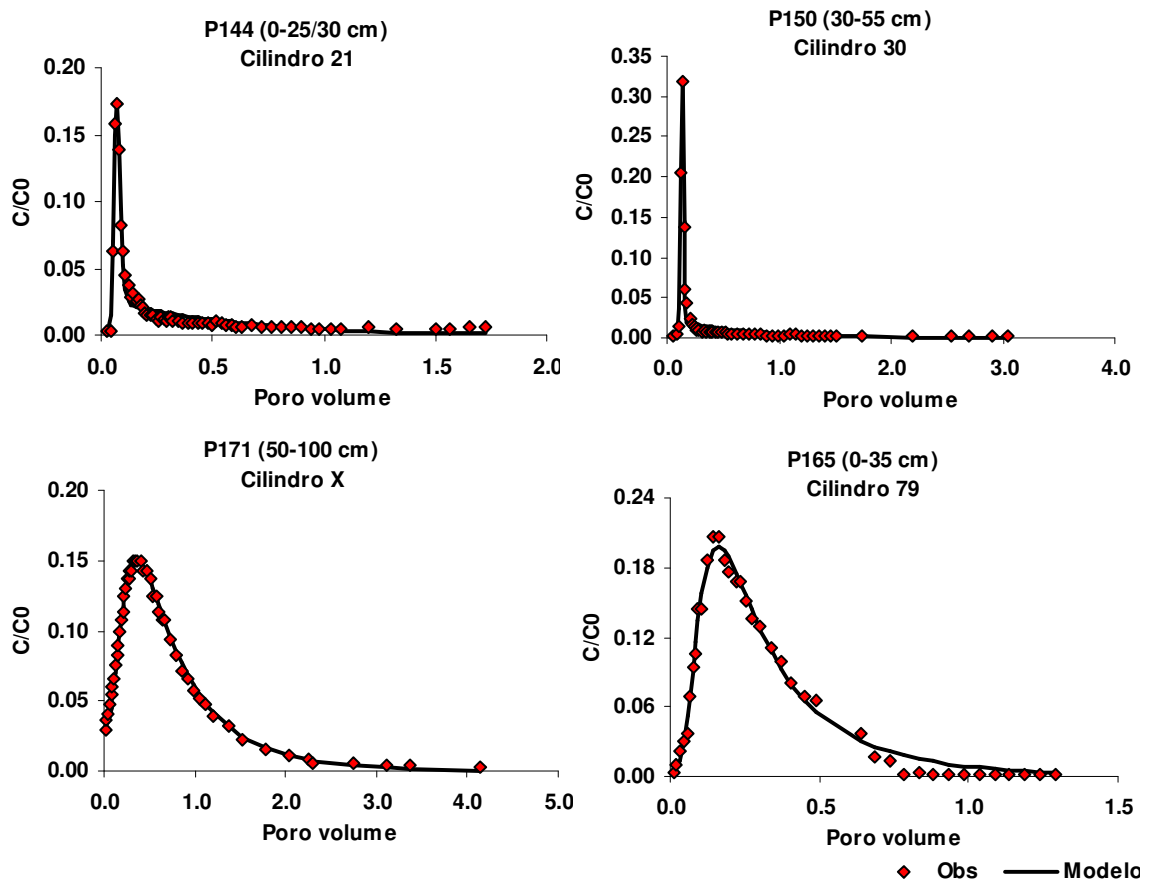


Figura 1 – Valores medidos e ajustamento com o modelo de duas regiões, para as concentrações em cloretos. A quantidade C_0 é a concentração inicial da água do solo e C a concentração no fluxo de saída.

As BTCs obtidas revelaram-se fortemente assimétricas, apresentando um maior declive na fase inicial, em resultado de um aumento brusco da concentração de cloretos nos lixiviados e um menor declive na fase final com a diminuição progressiva da concentração daquele soluto nos lixiviados. Este fenómeno é característico do transporte em condições de não-equilíbrio em solos bem estruturados, tendo já sido descrito por

Gonçalves *et al.* (2001) para os solos do Alentejo. O pico de concentração foi, portanto, atingido muito cedo, com a passagem de apenas uma pequena fracção de um poro-volume através da coluna, mas para que a coluna fosse completamente atravessada por todo o traçador aplicado foi necessário aplicar uma muito maior quantidade de água. As curvas reflectem assim uma situação na qual o soluto é transportado por duas regiões, uma mais permeável, função da macroporosidade do solo, e outra mais estagnante, em que o fluxo de água é muito pequeno ou mesmo inexistente. As condições de não-equilíbrio, ou seja, a existência de fluxos preferenciais, foram observadas em 67 das 71 colunas analisadas. Nas restantes 4 foi possível verificar condições de equilíbrio, não havendo distinção entre as fases inicial e final das BTCs.

No Quadro 1 apresentam-se os valores médios, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos dos parâmetros de transporte de solutos determinados nas 71 colunas de solo.

Quadro 1 – Valores médios, máximos, mínimos e desvio padrão dos parâmetros de transporte de solutos determinados nas 71 colunas de solo

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
K_s (cm d ⁻¹)	107.3	231.4	0.1	1461.0
v (cm d ⁻¹)	221.8	485.6	0.2	3216.6
D (cm ² d ⁻¹)	481.9	1139.5	1.0	7818.0
R	0.719	0.263	0.178	1.000
β	0.370	0.282	0.010	1.000
ω	5.6	9.4	0.0	30.0
R²	0.959	0.046	0.683	0.997

K_s, condutividade hidráulica saturada; v, velocidade de água no poro; D, coeficiente de difusão-dispersão; R coeficiente de retardação; β, coeficiente de partição; ω, coeficiente de transferência de massa.

O ajustamento do modelo de duas regiões aos dados laboratoriais foi, em regra, muito aceitável, resultando num coeficiente de determinação médio (R²) de 0.96. Com aquele modelo são obtidos 5 parâmetros (D, R, v, β e ω). A análise aos parâmetros de transporte de solutos obtidos revela valores relativamente elevados para o parâmetro D que, segundo Mallants *et al.* (1994), é característico de material estruturado. O valor médio de D é relativamente alto (481.9 cm² d⁻¹), mas sobretudo destaca-se a sua elevada variabilidade, nomeadamente, o desvio padrão que foi de 1139.5 cm² d⁻¹. Os valores de D estão geralmente correlacionados com os valores da condutividade hidráulica saturada (K_s), apresentando estes, também, uma grande variabilidade devida à heterogeneidade dos solos (K_s médio = 107.3 cm d⁻¹; desvio padrão = 231.4 cm d⁻¹). Estas duas grandezas estão também correlacionadas com v. É de referir, no entanto, que 21 colunas de solo apresentaram valores de v muito reduzidos (<10 cm d⁻¹), o que significa que grande parte dos solos estudados apresentam sérios riscos de acumulação de solutos, o que pode levar, entre outros problemas, à salinização dos solos. Tais riscos foram anteriormente comprovados em Gonçalves *et al.* (2006).

O parâmetro R apresentou um valor médio de 0.719. Segundo van Genuchten (1980), valores de R<1 ocorrem quando o traçador é sujeito a exclusão aniónica, o que ocorre frequentemente com o movimento de cloretos em solos bem estruturados de textura fina, tais como a maior parte dos estudados neste trabalho. Gonçalves *et al.* (2001), tinham já encontrado valores de R<1 para o transporte aniónico nos solos do Alentejo.

O parâmetro β apresenta, na maioria dos casos, valores bastante inferiores a 0.5 (valor médio de 0.37), ou seja, a maior parte da água existente no solo foi considerada como água imóvel. Os valores elevados da fracção de água imóvel, em conjugação com os valores médios a elevados de K_s , levam à conclusão de que os solos estudados apresentavam apenas alguns poros de maiores dimensões (macroporos) que contribuíram significativamente para o movimento dos solutos no solo. O efeito de não-equilíbrio devido a baixos valores de β podem ser atenuados por um elevado coeficiente de transferência de massa ($\omega > 1$). No caso dos solos estudados, obteve-se um valor médio de $\omega = 5.6$.

No caso das 4 amostras em que se verificaram condições de equilíbrio, isto é, em que $\beta = 1$ e $\omega = 0$, o conceito de duas regiões no solo é aplicável.

Conclusões

As BTCs realizadas em 71 colunas de solos no estado natural, utilizando uma solução 0.05 M de KCl como traçador, aplicada sob a forma de um pulso, revelaram-se bastante assimétricas, como resultado do transporte do soluto em condições de não-equilíbrio.

As curvas foram descritas com o modelo de transporte de duas regiões, sendo a água do solo dividida em água móvel, na qual o transporte de solutos é essencialmente realizado por convecção, através da macroporosidade do solo, e água imóvel, na qual o transporte é essencialmente difusivo. Este modelo, em que se obtêm 5 parâmetros, descreveu bem as concentrações efluentes obtidas, tendo-se registado um R^2 médio de 0.96 para a relação entre as concentrações observadas e estimadas com o modelo. Apenas em 4 casos, os dados recolhidos foram melhor ajustados com o modelo de equilíbrio.

O coeficiente de difusão-dispersão (D) apresentou valores elevados, relacionados com a condutividade hidráulica saturada e proporcionais à velocidade da água no poro (v). O coeficiente de retardação (R) foi geralmente inferior a 1, em resultado da exclusão aniónica do Cl⁻. A fracção de água móvel foi, de um modo geral, inferior à fracção de água imóvel e o coeficiente de transferência de massa foi geralmente elevado.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto EUTROPHOS (PTDC/AGR-AAM/098100/2008) da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). T. B. Ramos foi financiado pela bolsa FCT SFRH/BD/60363/2009.

Bibliografia

- Gonçalves, M.C., Leij, F.J., Schaap, M.G., 2001. Pedotransfer functions for solute transport parameters of Portuguese soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 52: 563-574.
- Mallants, D., Vanclooster, M., Meddahi, M., Feyen, J., 1994. Estimating solute transport in undisturbed soil columns using time-domain reflectometry. *J. Contam. Hydrol.*, 17: 91-109.
- Gonçalves, M.C., Šimůnek, J., Ramos, T.B., Martins, J.C., Neves, M.J. e Pires, F.P., 2006. Multicomponent solute transport in soil lysimeters irrigated with waters of different quality. *Water Resour. Res.*, 42, W08401.

- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., Toride, N., Leij, F.J., 1999. The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation. Versions 1.0 and 2.0, IGWMC - TPS - 71, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, p. 32.
- Toride, N., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 1995. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments. Version 2.0. Research Report 137, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA.
- van Genuchten, M.Th., 1980. Determining Transport Parameters from Solute Displacement Experiments. Research Report 118, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA.
- van Genuchten, M.T., Wierenga, P.J., 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soci. Am. J.*, 40: 473-480.
- Vanderborght, J., Vereecken, H., 2007. Review of dispersivities for transport modeling in soils. *Vadose Zone J.*, 6: 29-52.
- WRB, 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. World soil resources report. Food and Agriculture organization of the United Nations, Roma, Itália.