

CARACTERIZAÇÃO HIDRODISPERSIVA DE UM SOLO ALUVIAL – UM ESTUDO DE CASO NO SEMI-ÁRIDO DO NORDESTE DO BRASIL

*Celme Tôres Costa*¹

*Marco Aurélio Holanda de Castro*²

*Antônio C. Dantas Antonino*³

RESUMO

Estudos experimentais de transferência de água e de solutos no solo têm sido desenvolvidos na tentativa de melhorar o manejo e aplicação de água e substâncias químicas em solos e culturas, e para prognosticar o destino dessas substâncias no meio ambiente. A caracterização hidrodispersiva de três amostras de solo com diferentes classes texturais de um solo Aluvial das margens do Açude Cajueiro no semi-árido do NE do Brasil foi realizada por meio de ensaios de deslocamento de líquidos miscíveis em colunas de solo em laboratório. Os parâmetros hidrodispersivos foram obtidos utilizando o ajuste da solução analítica do modelo de convecção-dispersão, CDE e do modelo de convecção-dispersão a duas frações de água, CDE-MIM aos pontos da curva de eluição experimental, utilizando o programa CXTFIT 2.0.

TEORIA

Os solutos são transportadas no solo pelo movimento da água ou por fluxo de massa. Nesse movimento, partes desses solutos poderão ser adsorvidos pelo solo ou pelas plantas, ou mesmo ser precipitado quando sua concentração excede sua solubilidade, como acontece na superfície do solo durante a evaporação. Por outro lado, os solutos não se movem somente com a água no solo; eles também se dispersam na mesma, em resposta aos gradientes de concentração, como também reagem entre si e interagem com a matriz do solo numa sucessão cíclica de processos físicos e químicos inter-relacionados. Três processos controlam o deslocamento de solutos e/ou substâncias químicas: a convecção ou advecção, a difusão molecular e a dispersão hidrodinâmica. Nos estudos de transporte de solutos em solos, as

1) Doutoranda em Recursos Hídricos; bolsista da ANP; Mestre em Tecnologia Energética e Nuclear; Universidade Federal do Ceará; Dep. de Engenharia Hidráulica e Ambiental; Campus do Pici, Bloco 713; Cep. 60455-760; Fortaleza - Ceará – Brasil.; anp@ufc.br

2) Professor Doutor; Universidade Federal do Ceará; Dep. de Engenharia Hidráulica e Ambiental; Campus do Pici, Bloco 713; Cep. 60455-760; Fortaleza; Ceará – Brasil. marco@ufc.br

3) Professor Doutor; Universidade Federal de Pernambuco; Dep. de Energia Nuclear; Rua Prof. Luiz Freire, 1000; Cidade Universitária – Recife – PE; Cep. 60540-740. acda@ufpe.br

partículas de soluto em movimento convectivo se deslocam devido à difusão molecular e à dispersão mecânica. Dessa forma, a difusão molecular e a dispersão mecânica são combinados em um processo denominado de dispersão hidrodinâmica ou processo hidrodispersivo. As variáveis que interferem nos mecanismos de transferências são: a porosidade e a umidade do solo, como também as propriedades físico-químicas dos constituintes do solo, mais particularmente as propriedades de adsorção, a presença de matéria orgânica, as interações biológicas, as propriedades físico-químicas dos compostos e as práticas culturais. so denominado de dispersão hidrodinâmica ou processo hidrodispersivo. As variáveis que interferem nos mecanismos de transferências são: a porosidade e a umidade do solo, como também as propriedades físico-químicas dos constituintes do solo, mais particularmente as propriedades de adsorção, a presença de matéria orgânica, as interações biológicas, as propriedades físico-químicas dos compostos e as práticas culturais.

O transporte de solutos em um meio poroso pode ser conceitualizado mediante os modelos convecção-dispersão (CDE) e convecção-dispersão a duas regiões de água móvel e imóvel (CDE-MIM).

Modelo convecção-dispersão - Em nível macroscópico, o modelo convecção dispersão é dado por:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[- \theta D \frac{\partial C}{\partial z} + v \theta C \right]$$

onde q é o conteúdo de água volumétrico [$L^3.L^{-3}$], C é a concentração de soluto expressa em massa de soluto por volume de solução [$M.L^{-3}$], t é o tempo [T], e z é a profundidade [L]. D [$L^2.T^{-1}$] é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica do soluto no meio poroso, e v [$L.T^{-1}$] é a velocidade média do transporte de solutos ou velocidade média da água no poros, dada por:

$$v = \frac{q}{\theta}$$

O sinal negativo do modelo CDE indica que a concentração no elemento de volume diminui se a densidade do fluxo de soluto na saída for maior do que a densidade de fluxo de soluto que entra no elemento de volume de solo.

Fried e Combarous (1971) constataram que, para um certo valor da velocidade de escoamento, o coeficiente de dispersão aumenta de uma forma praticamente linear, sendo o fator de proporcionalidade denominado de dispersividade l , fator este dependente das características do meio poroso. Ele varia com o teor de água (q) e com a profundidade em um solo heterogêneo (Biggar & Nielsen, 1976). Roth (1996) mostrou que a dispersividade é representativa da distribuição de soluto no solo e depende fortemente da estratificação do solo e do regime de escoamento transitório.

Modelo convecção-dispersão a duas frações de água - O transporte de água e de soluto em um meio poroso onde uma parte da fase líquida é imóvel, é conceitualizado através do modelo de convecção-dispersão a duas regiões de água, ou modelo CDE-MIM (Coast e Smith, 1964) dado por:

$$\frac{\partial \theta_m C_m}{\partial t} + \frac{\partial \theta_{im} C_{im}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_m D_m \frac{\partial C_m}{\partial z} + \theta_{im} D_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\theta_m v_m C_m)$$

onde v_m é velocidade média da água nos poros na fase móvel. Os parâmetros D_m e D_{im} [$L^2.T^{-1}$] são os coeficientes de difusão-dispersão das fases móvel e imóvel, respectivamente. Eles dependem da tortuosidade do meio poroso, da velocidade de escoamento e da umidade

de. Na fase móvel, D_m engloba ao mesmo tempo os efeitos da dispersão hidrodinâmica e da difusão molecular. Na fase imóvel, as velocidades convectivas são nulas, sendo considerada apenas a difusão molecular.

Coast e Smith (1964) propuseram uma relação que descreve a troca de massa de solutos entre as duas regiões de água móvel e imóvel, dada por uma cinética de primeira ordem:

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im})$$

onde $\alpha [T^{-1}]$ é o coeficiente de transferência de massa entre as duas frações de água.

Devido à complexidade dos processos de transferência de solutos, algumas hipóteses são necessárias a fim de simplificar os mecanismos envolvidos, tornando possível a solução da equação do transporte no meio poroso. As hipóteses utilizadas neste trabalho são: matriz sólida é indeformável, homogênea e isotrópica na escala macroscópica; o escoamento é unidirecional (vertical); a taxa de fluxo é constante; o soluto (sal) é miscível com o solvente (água); o escoamento é isotérmico; a fase líquida é suposta contínua, umidade constante à saturação em água; as variações de massa e da viscosidade da solução em função da concentração do soluto são desprezíveis; a matriz sólida é inerte, não existindo interações químicas entre a fase líquida e a fase sólida (solute não-reativo). Essas hipóteses são evidentemente restritivas quanto à generalidade do problema, mas elas permitem uma aproximação satisfatória relacionada ao processo de transferência hidrodinâmica e hidrodispersiva, fornecendo informações necessárias e significativas à análise e compreensão das transferências de água e solutos, em um meio saturado, e a caracterização hidrodispersiva do solo em estudo.

Soluções analíticas – As soluções analíticas dos modelos convecção-dispersão (CDE) e convecção-dispersão a duas frações de água (CDE-MIM), têm sido derivadas para uma variedade de condições de contornos (van Genuchten e Alves, 1982, Ségol, 1993; Leij e Toride, 1995). Embora as soluções analíticas sejam obtidas para condições restritas, elas têm muitas aplicações, tais como a validação de programas computacionais, prognóstico do transporte de soluto a longo termo (tempo ou distância), a análise de sensibilidade do transporte de solutos e a determinação dos parâmetros hidrodispersivos em experimentos sob condições controladas em colunas de solo ou lisímetro.

As condições inicial e de contorno para um pulso de solução deslocadora, empregando a concentração de fluxo (C_f) na entrada e saída de uma coluna de solo são as mesmas para os modelos CDE e CDE-MIM.

Condição inicial: $C_f(z, 0) = 0$

Condição de contorno inferior: $\frac{\partial C_f}{\partial z}(\infty, t) = 0$

Condição de contorno superior: $C_f(0, t) = \begin{cases} C_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases}$

onde C_0 é a concentração do soluto na solução deslocadora ($M.L^{-3}$), t é o tempo (T) e t_0 é o tempo de aplicação da solução deslocadora [T]. Todas as soluções analíticas consideradas neste estudo são referentes a uma condição de contorno inferior infinita de sistema semi-infinito.

Solução analítica do modelo CDE (van Genuchten & Wierenga, 1986):

$$C_f(z, t) = \begin{cases} C_0 B(z, t) & 0 < t < t_0 \\ C_0 B(z, t) - C_0 B(z, t - t_0) & t > t_0 \end{cases}$$

$$\text{sendo: } B(z,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{z - vt}{2(Dt)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{vz}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{z + vt}{2(Dt)^{1/2}} \right]$$

Soluções analíticas do modelo de não-equilíbrio físico, CDE-MIM (Toride et al., 1993):

$$C_f(z,t) = \begin{cases} C_0 B(z,t) & 0 < t < t_0 \\ C_0 B(z,t) - C_0 B(z,t-t_0) & t > t_0 \end{cases}$$

$$\text{sendo: } B(z,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\beta z - vt}{2(\beta Dt)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{vz}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{\beta z + vt}{2(\beta Dt)^{1/2}} \right]$$

β é o coeficiente de partição entre as duas frações de água móvel e imóvel, dado por:

$$\beta = \frac{\theta_m + f \rho_b K_d}{\theta + \rho_b K_d}$$

onde, ρ_b é a massa específica do solo seco [ML^{-3}], θ_m é a umidade volumétrica do solo na fase móvel [L^3L^{-3}] e K_d é o coeficiente de distribuição de solutos entre a fase líquida e a fase adsorvida [L^3M^{-1}]. No caso de solutos não-reativos, o coeficiente de distribuição K_d é igual a zero. Sendo β um parâmetro adimensional característico dos modelos de não-equilíbrio. Note-se que, para o caso de solutos não-reativos, β é igual à fração de água móvel ($f = \theta_m / \theta$).

Material e métodos – Para quantificar os parâmetros hidrodispersivos, colunas de solo em laboratório foram utilizadas sob regime de escoamento permanente. O estudo foi conduzido, levando em consideração apenas os processos físicos envolvidos nas transferências de água e de solutos. Os modelos convecção-dispersão (CDE) e convecção-dispersão a duas frações de água, móvel e imóvel, (CDE-MIM), foram utilizados na determinação dos parâmetros hidrodispersivos, obtida a partir do ajuste das soluções analíticas dos modelos CDE e CDE-MIM, proposto por Parker e van Genuchten (1984), sujeitas às condições inicial e de contornos específicas, aos pontos da curva de eluição obtida experimentalmente em colunas de solo.

As amostras de solo foram coletadas próximo aos sítios experimentais, destinados ao estudo da dinâmica hidro-salina do sistema de cultivo de vazante, instalados na vazante do Açude Cajueiro localizado no município de Tuparetama (Latitude (S) 7°36'0" e Longitude (W.Gr.) 37°18'45") no Estado de Pernambuco, a 385 km da capital do Estado. O Açude Cajueiro localiza-se na área rural ao sul da zona urbana do município de Tuparetama, foi construído com a finalidade de garantir o abastecimento de água para o consumo humano e animal, possui uma área aproximada de 200 km², seu volume de acumulação de água é de 2 a 3 milhões de m³ e seu espelho d'água possui aproximadamente 61 ha. Análises preliminares efetuadas indicaram que a água do açude apresenta valores de condutividade elétrica entre 200 e 400 mS/cm nos períodos chuvosos e de seca respectivamente e, de acordo com a classificação das águas utilizadas para irrigação (Molle e Cardier, 1992), pode ser enquadrada na classe C1, ou seja, de boa qualidade para irrigação.

As colunas de solo foram submetidas a ensaios de deslocamento de líquido miscível sob o regime de escoamento permanente. Os valores da umidade e do fluxo, nesse caso, foram determinados experimentalmente, e o único valor variável no tempo foi a concentração do soluto.

No dispositivo experimental foram utilizadas colunas em PVC cilíndricas com 4,5 cm de diâmetro interno e 40 cm de altura. As bases das colunas foram confeccionadas em PVC,

possuindo internamente anéis de borracha para garantir uma perfeita vedação do sistema. Interiormente a essas bases, colocou-se uma chapa de acrílico de 3,0 mm espessura perfurada e uma tela de “nylon” para impedir a perda do solo durante a realização do ensaio. A Figura 01 ilustra o dispositivo experimental.

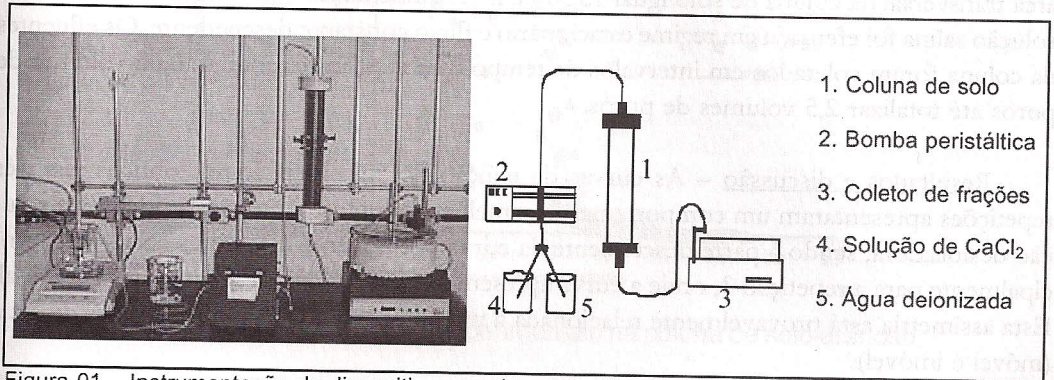


Figura 01 – Instrumentação do dispositivo experimental utilizado em deslocamento de líquido miscível.

A alimentação da coluna de solo com a solução deslocadora foi efetuada utilizando-se a bomba peristáltica conectada a base superior da coluna, sendo os efluentes da solução recolhidos na base inferior e coletados em frações no tempo através de um coletor de frações. A determinação da concentração na solução efluente foi estimada a partir das leituras do condutivímetro.

A análise granulométrica foi feita pelo método da pipeta (Loveland e Whalley, 1991). Na análise granulométrica não foi efetuado um pré-tratamento para a eliminação de sais, matéria orgânica ou ferro das amostras. Para a classificação textural das amostras de solo utilizou-se o diagrama triangular da USDA. A Tabela 01 apresenta os resultados da análise granulométrica das amostras de solo.

Tabela 03 – Análise granulométrica, textura e classificação das amostras de solo

| Amostra | Percentual das frações de Argila, Silte e Areia - Textura e classificação | | | Textura | Classificação |
|---------|---|---------|---------|-----------------------|---------------|
| | Argila % | Silte % | Areia % | | |
| 1 | 15,4 | 8,7 | 72,9 | Areia franca | Aluvial |
| 2 | 22,5 | 17,4 | 56,2 | Franco argilo arenoso | Aluvial |
| 3 | 2,8 | 1,5 | 95,4 | Arenoso | Aluvial |

As amostras de solo coletadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira para obtenção de agregados de diâmetro menor que 2,0 mm. O acondicionamento das amostras de solo nas colunas foi feito em camadas de aproximadamente 2 cm levemente compactadas, com massa específica aparente próxima àquela obtida em condições naturais de campo. O processo de saturação das colunas de solo foi realizado antes das mesmas serem fechadas. As colunas de solo foram lentamente saturadas com água sob fluxo ascendente. O tempo de saturação foi de 24 horas para a coluna de solo arenoso e de 72 horas para as colunas de solo franco arenoso e franco argilo arenoso. As colunas foram submetidas a um processo de lixiviação com água deionizada de condutividade elétrica $CE = 2 \text{ mS.cm}^{-1}$. O processo teve a finalidade de eliminar os sais eventualmente presentes no solo. Uma quantidade de água deionizada equivalente a 5 vezes o volume de poros da coluna foi utilizada nesse processo.

Utilizou-se nos ensaios uma solução salina de CaCl_2 0,01 M. Um pulso de 1/2 volume de poros da solução foi aplicado às colunas de solo. Três ensaios foram realizadas em cada coluna de solo. Adicionalmente, determinou-se o tempo do pulso em função da vazão da bomba peristáltica. O fluxo q [LT^{-1}] aplicado é dado pela razão entre a vazão da bomba e a área transversal da coluna de solo igual $15,904 \text{ cm}^2$. A alimentação das colunas de solo com a solução salina foi efetuada em regime estacionário e fluxo constante descendente. Os efluentes da coluna foram coletados em intervalos de tempo discretos em frações de 0,02 volumes de poros até totalizar 2,5 volumes de poros.

Resultados e discussão – As curvas de eluição do solo areia franca obtidas nas três repetições apresentaram um comportamento semelhante durante a parte ascendente da solução deslocadora, sendo a parte descendente da curva ligeiramente diferentes entre elas, principalmente para a repetição 3, onde a curva apresentou uma assimetria (tailing) na parte final. Esta assimetria está provavelmente relacionada a um comportamento a duas regiões de água (móvel e imóvel).

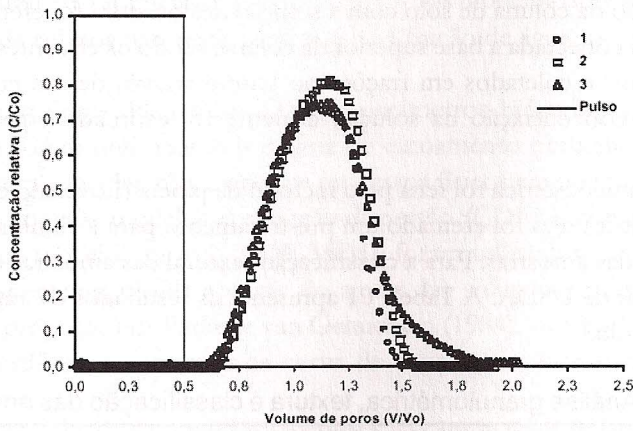


Figura 02 – Curvas de eluição experimentais na coluna de solo franco arenosa

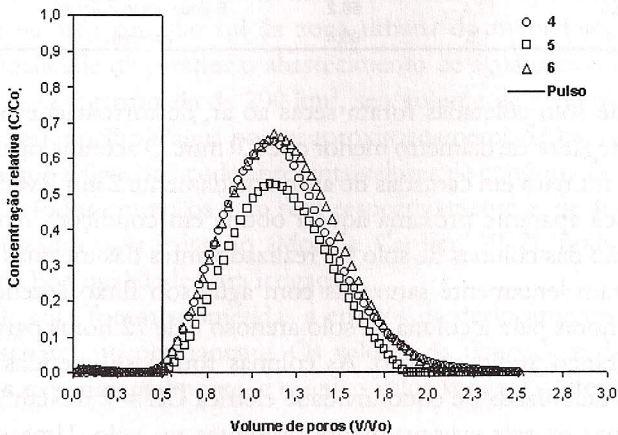


Figura 03 – Curvas de eluição experimentais na coluna de solo franco argilo arenosa

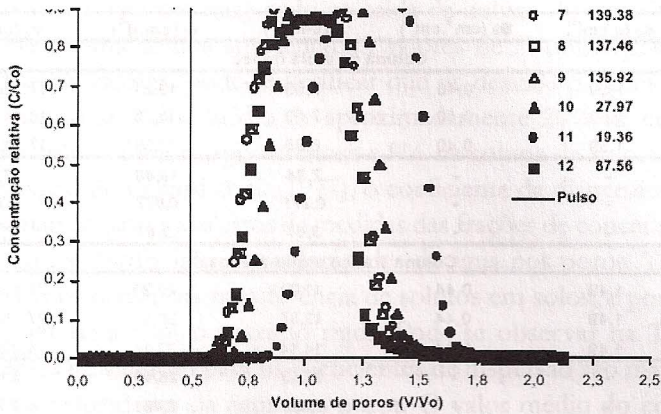


Figura 04 – Curvas de eluição experimentais na coluna de solo arenosa

As curvas de eluição do solo franco argilo-arenoso apresentaram um aparecimento prematuro da concentração em relação aos demais solos. Este comportamento é consequência de uma distribuição do tamanho de poros menor para este solo, o que é representado por uma dispersividade maior em relação aos demais solos, como será visto mais adiante.

Para o caso do solo arenoso, as curvas de eluição para as três repetições são praticamente idênticas. Três outros ensaios com valores de fluxo diferentes foram realizados com a coluna de solo arenoso, visando observar a relação entre o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e a velocidade da água nos poros. Observa-se na Figura 04 que a medida que a velocidade aumenta a curva de eluição se desloca para a esquerda, provocando um aumento na frente de avanço do soluto na coluna de solo. Pode-se observar também uma variação da inclinação da parte ascendente das curvas. A medida que a velocidade aumenta, o ramo ascendente se torna mais íngreme. Este fenômeno se traduz por uma predominância da convecção sobre a dispersão (Pe se torna maior) (Tabela 02). Nos ensaios realizados sobre a mesma coluna de solo, as curvas de eluição apresentaram um variação na altura do pico, esse fato é devido a velocidade da água nos poros, bem como as condições experimentais.

Os modelos convecção-dispersão (CDE) e convecção-dispersão a duas frações de água (CDE-MIM) foram utilizados na caracterização hidrodispersiva dos solos. No modelo CDE, os parâmetros ajustados foram à velocidade da água nos poros (v), o coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D) e o tempo (t); e no modelo CDE-MIM, os parâmetros ajustados foram os do modelo CDE acrescidos do coeficiente de partição entre as duas frações de água (β) e do número de Damkohler (ω). No caso CDE-MIM, o modelo considera que a água é fracionada em móvel e imóvel; isso conduz à determinação dos parâmetros $\alpha [T^{-1}]$ e θ_m , definidos respectivamente como o coeficiente de transferência de massa entre as duas frações de água e teor de água móvel, respectivamente. No ajuste dos dados experimentais pela solução analítica, considerou-se a concentração de fluxo como sendo a concentração relativa do efluente $\hat{C}_f(L, t) = C/C_0(L, t)$.

Tabela 01 – Condições experimentais das colunas de solo

| Ensaio | ρ_d (g.cm ⁻³) | θ_s (cm ³ .cm ⁻³) | q (cm.d ⁻¹) | v_1 (cm.d ⁻¹) | v_2 (cm.d ⁻¹) | t_0 |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| Coluna de areia franca | | | | | | |
| 1 | 1,59 | 0,40 | 7,69 | 19,23 | 17.35 ± 1.20 | 1,04 |
| 2 | 1,59 | 0,40 | 7,50 | 18,75 | 18.44 ± 1.38 | 1,07 |
| 3 | 1,59 | 0,40 | 6,95 | 17,38 | 17.71 ± 2.84 | 1,15 |
| Média | - | - | 7,38 | 18,45 | 17,83 | - |
| DP | - | - | 0,271 | 0,677 | 0,394 | - |
| CV | - | - | 3,67 | 3,67 | 2,21 | - |
| Coluna franco argilo-arenosa | | | | | | |
| 4 | 1,49 | 0,44 | 11,09 | 25,20 | 27.52 ± 1.75 | 0,79 |
| 5 | 1,49 | 0,44 | 12,37 | 28,11 | 27.50 ± 2.14 | 0,71 |
| 6 | 1,49 | 0,44 | 14,14 | 32,14 | 34.32 ± 3.61 | 0,62 |
| Média | - | - | 12,53 | 28,48 | 29,78 | - |
| DP | - | - | 1,083 | 2,461 | 2,780 | - |
| CV | - | - | 8,64 | 8,64 | 9,33 | - |
| Coluna arenosa | | | | | | |
| 7 | 1,47 | 0,45 | 62,02 | 137,82 | 138.41 ± 1.60 | 0,14 |
| 8 | 1,47 | 0,45 | 61,17 | 135,93 | 136.69 ± 1.69 | 0,15 |
| 9 | 1,47 | 0,45 | 60,49 | 134,42 | 136.47 ± 3.55 | 0,15 |
| Média | - | - | 61,23 | 136,06 | 137,19 | - |
| DP | - | - | 0,542 | 1,205 | 0,751 | - |
| CV | - | - | 0,89 | 0,89 | 0,55 | - |
| 10 | 1,47 | 0,45 | 12,45 | 27,67 | 27.74 ± 2.09 | 0,72 |
| 11 | 1,47 | 0,45 | 8,61 | 19,13 | 19.20 ± 2.61 | 1,03 |
| 12 | 1,47 | 0,45 | 38,96 | 86,58 | 86.86 ± 4.47 | 0,23 |

DP → desvio padrão

CV → coeficiente de variação (%)

As curvas de eluição experimentais e ajustadas são apresentadas nas Figuras 05 e 06. As Figuras (05 e 06) se apresentam na forma de concentração adimensional (C/C_0) em função do volume de poros relativo (V/V_0). Os ensaios compreendem o deslocamento de um pulso de $1/2 V_p$ da solução de CaCl_2 0,01 M aplicada às colunas de solo de areia franca, franco argilo-arenoso e arenoso inicialmente livre de solutos (modelo CDE).

O tempo de pulso (t_0) experimental, estimado em $1/2$ volume de poros, tiveram seus valores ajustados no modelo. Esse ajuste na verdade é uma correção devido aos erros sistemáticos em função do arranjo experimental. Em todos os ensaios realizados os valores do tempo de pulso (t_0) experimental encontram-se na mesma ordem de grandeza que os valores de t_0 ajustados. O número de Péclet mostra que o processo predominante em todos os ensaios foi a convecção ($Pe > 10$, Novy Quadry, 1993).

As velocidades da água nos poros (v) ajustadas apresentaram seus valores ligeiramente superiores às velocidades experimentais (v_1 e v_2 - Tabela 08) para as colunas de areia franca e franco argilo-arenosa. O mesmo não foi obtido na coluna de solo arenoso, onde os valores ajustados foram aproximadamente 25% superiores aos valores experimentais e calculados. Este fato foi observado em todos os ensaios (7, 8, 9, 10, 11 e 12) realizados nesta coluna. Nos ensaios de 1 a 9, em uma das três repetições para cada tipo de solo, a velocidade foi ligeiramente inferior à dos outros dois ensaios.

Para um meio totalmente saturado, onde toda a água é considerada móvel, a curva de eluição de um traçador ideal passa pelo ponto ($0,5 C/C_0$; $1,0 V/V_0$). No entanto, as curvas de eluição (Figuras 05 e 06) encontram-se deslocadas para a esquerda, ou seja, o ponto $C/C_0 = 0,5$ ocorre antes do valor $V/V_0 = 1,0$. Isso está relacionado a uma possível saturação parcial

nas colunas de solo, ocasionando uma grande distribuição de velocidades no meio poroso, fazendo com que o soluto apareça mais cedo na saída da coluna de solo. Observa-se que os ensaios realizados na mesma coluna apresentaram valores de D diferenciados. No entanto, tomando-se a média dos valores, pode-se verificar que os desvios-padrões correspondem a uma variação em relação ao valor médio de aproximadamente 20% na coluna de solo de areia franca, 11% na coluna franco argilo-arenosa e 9% na coluna de solo arenoso.

Segundo o trabalho de Renard et al. (1977), o coeficiente de dispersão hidrodinâmica é um dos parâmetros mais sensíveis aos erros de medidas das frações de concentrações coletadas, bem como a variação na distribuição das velocidades da água nos poros. Trata-se, portanto, de um dos parâmetros essenciais na transferência de solutos em solos, e por esta razão a sua determinação deve ser feita com o máximo rigor. Pode-se observar na Tabela 02 que os valores dos coeficientes de variação para os coeficientes de dispersão são maiores que aqueles determinados para as velocidades da água nos poros. O valor médio do coeficiente de dispersão para o solo franco argilo-arenoso é maior do que aquele obtido com os outros dois solos (areia franca e arenoso), caracterizando assim um efeito mais pronunciado da dispersão para este solo. Sendo o número de Péclet bem menor para o solo franco argilo-arenoso do que para os demais solos, indica uma dispersividade (λ) mais importante do que para os solos areia franca e arenoso. O valor médio da dispersividade para o solo franco argilo-arenoso chega a ser 4,7 e 9,4 vezes superior do que a dispersividade para os solos areia franca e arenoso respectivamente. Para os ensaios 10 a 12 (solo arenoso) observa-se que o valor dos coeficientes de dispersão D diminuem à medida que se diminuem os fluxos aplicados, indicando a existência de uma relação entre o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e a velocidade da água nos poros.

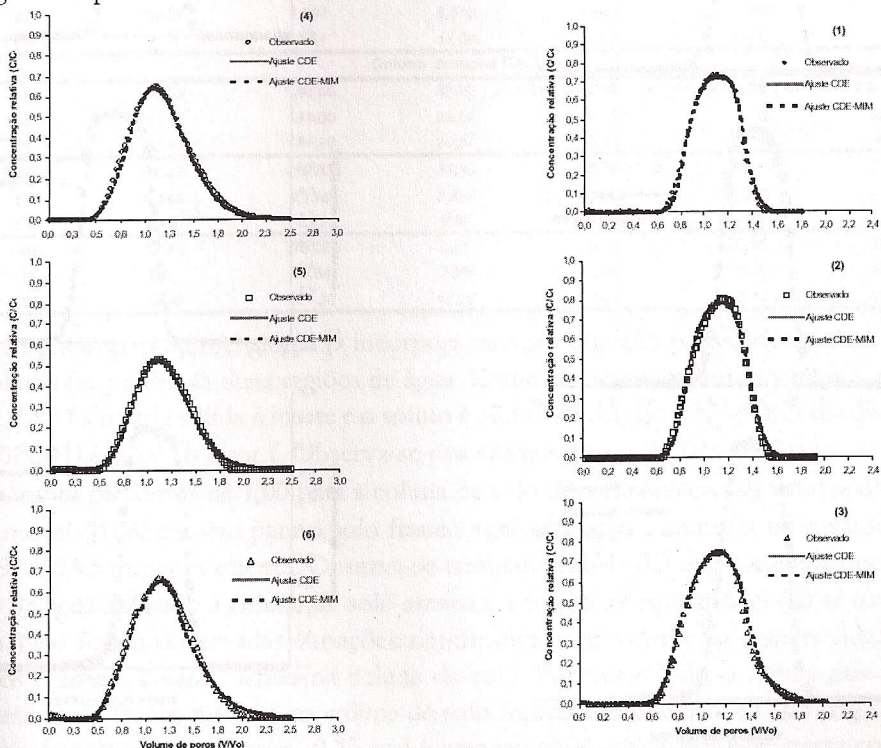


Figura 05 – Curvas de eluição experimentais e dos ajustes CDE e CDE-MIM dos ensaios nas colunas de solo areia franca (1,2 e 3) e franco argilo arenosa (4,5 e 6)

As curvas apresentadas (Figuras 05 e 06) possuem uma distribuição simétrica, logo o comprimento das colunas de solo é compatível com os processos de transporte.

O parâmetro adimensional ω incorpora em sua definição o coeficiente α [L], o qual descreve a transferência difusiva entre as duas regiões de água (Parker e van Genuchten, 1984). Valores muito grandes ou muito pequenos produzem curvas de eluição simétricas. Assim, quanto maior o valor de ω , menor será a resistência para que a transferência difusiva de soluto entre as duas regiões ocorra, garantindo assim que a troca entre a água móvel e imóvel seja instantânea (Schlindwein, 1998). Na medida em que esse parâmetro assume valores muito pequenos, como no caso dos dados apresentados na Tabela 03, significa dizer que o sistema se afastou do equilíbrio local. Nesse caso, a abordagem do modelo CDE-MIM tem mais êxito na descrição das curvas de eluição. Isso explica o grande interesse e a ampla aplicação deste tipo de modelo no transporte de solutos. Observa-se na Tabela 03 que os valores de ω foram todos ajustados para o valor mínimo de 10^{-5} . Novy Quadry (1993) realizando o estudo de sensibilidade do parâmetro ω , chegou a conclusão que, para valores extremos de ω , deve-se privilegiar o valor mais elevado, garantindo assim uma troca instantânea entre as regiões de água móvel e imóvel.

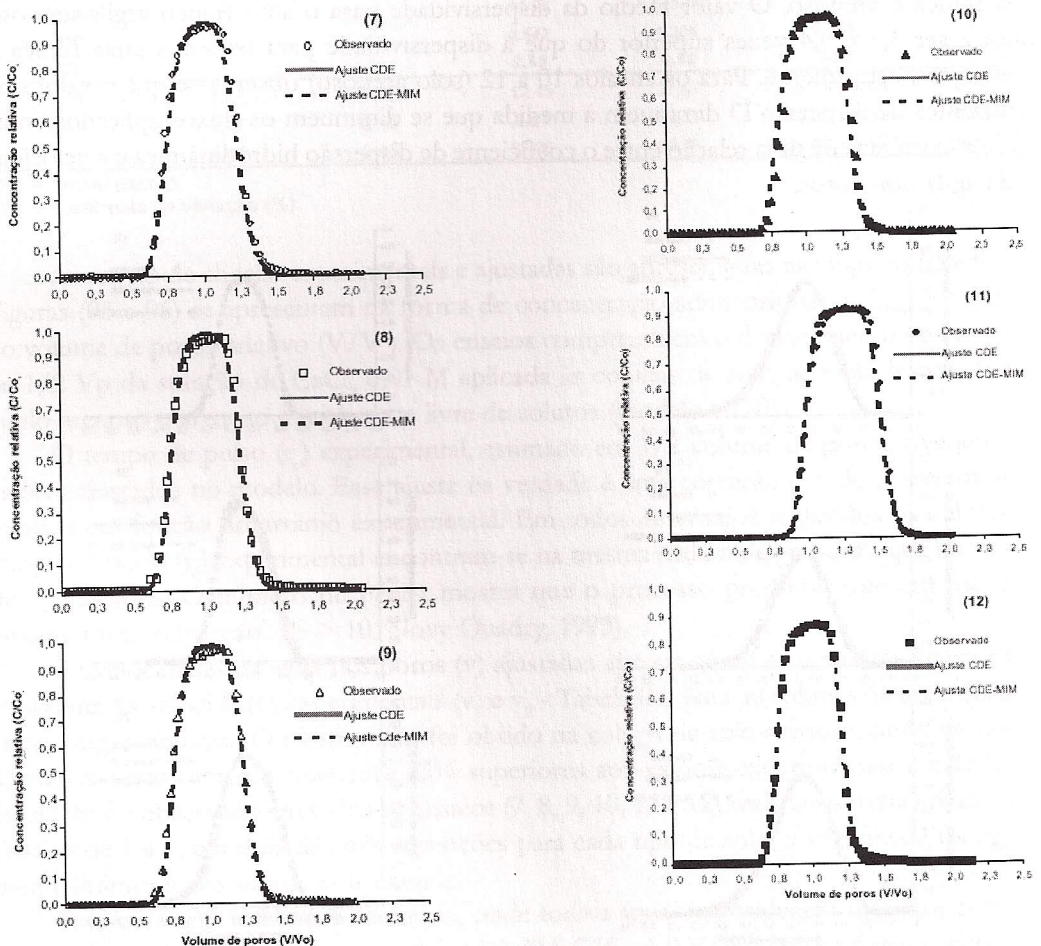


Figura 06 – Curvas de eluição experimental e do ajuste CDE e CDE-MIM na coluna de solo arenoso.

Os valores da dispersividade obtidas com os dois modelos (CDE e CDE-MIM) foram de 0,164 e 0,160 cm respectivamente. Estes valores estão em coerência com os valores obtidos para cada ensaio (7 a 11) (Tabelas 02 e 10), com exceção do ensaio 12, onde o valor de λ é subestimado, provavelmente devido aos erros de medidas do número de volume de poros e/ou da concentração durante este ensaio.

Quando os valores do coeficiente de transferência de massa (α) entre as duas frações de água são muito pequenos, o processo de difusão nos ensaios realizados é desprezível. Nesses casos, praticamente não existe transferência de massa entre as duas frações de água, sendo o processo predominantemente convectivo. Esse fato também é explicado pelos altos valores obtidos para o número de Péclet ($Pe > 10$).

Tabela 02 – Resultado dos ajustes dos parâmetros hidrodispersivos utilizando o modelo CDE.

| Ensaio | q (cm.d-1) | v (cm.d-1) | D (cm ² .d-1) | to (d) | l (cm) | Pe |
|--|--------------|---------------|--------------------------|--------------|--------------|--------|
| Coluna de areia franca (TA 4/2) | | | | | | |
| 1 | 7,69 | 22,61 | 4,92 | 1,01 | 0,22 | 183,67 |
| 2 | 7,50 | 22,03 | 7,20 | 1,09 | 0,33 | 122,37 |
| 3 | 6,95 | 17,93 | 8,79 | 0,88 | 0,49 | 81,62 |
| Média | 7,38 | 20,86 | 6,97 | 0,99 | 0,34 | - |
| DP | 0,272 | 1,804 | 1,373 | 0,074 | 0,097 | - |
| CV | 3,68 | 8,65 | 19,70 | 7,46 | 28,09 | - |
| Coluna franco argilo-arenosa (TA 3/3) | | | | | | |
| 4 | 11,09 | 28,17 | 52,33 | 0,73 | 1,86 | 21,53 |
| 5 | 12,37 | 31,03 | 40,97 | 0,73 | 1,32 | 30,30 |
| 6 | 14,14 | 32,92 | 55,89 | 0,66 | 1,70 | 23,56 |
| Média | 12,53 | 30,71 | 49,73 | 0,70 | 1,63 | - |
| DP | 1,083 | 1,691 | 5,510 | 0,030 | 0,195 | - |
| CV | 8,64 | 5,51 | 11,08 | 4,20 | 12,00 | - |
| Coluna arenosa (TA 3/4) | | | | | | |
| 7 | 62,02 | 186,60 | 35,98 | 0,15 | 0,19 | 207,45 |
| 8 | 61,17 | 181,00 | 28,64 | 0,15 | 0,16 | 252,79 |
| 9 | 60,49 | 174,90 | 29,57 | 0,15 | 0,17 | 236,59 |
| Média | 61,23 | 180,83 | 31,40 | 0,15 | 0,17 | - |
| DP | 0,545 | 4,138 | 2,826 | 0,002 | 0,013 | - |
| CV | 0,89 | 2,29 | 9,00 | 1,49 | 7,22 | - |
| 10 | 12,45 | 36,02 | 5,77 | 0,77 | 0,16 | 249,71 |
| 11 | 8,61 | 28,64 | 2,85 | 0,86 | 0,10 | 401,96 |
| 12 | 36,96 | 121,30 | 12,20 | 0,21 | 0,10 | 397,70 |

O parâmetro adimensional β incorpora na sua definição o coeficiente de distribuição de solutos (K_d) entre as duas regiões de água. Como mencionado anteriormente nas hipóteses (1.2.8.1) a matriz sólida é inerte e o soluto é não reativo, logo o $K_d = 0$; conseqüentemente o valor de β é igual ao fator f. Observa-se nos ensaios de 1 a 9 (Tabela 03) que os valores de β são muito próximos de 1,00 para a coluna de solo de areia franca. Os valores da fração de água móvel (β) diminuem para o solo franco argilo-arenoso e arenoso, com valores médios de 0,97 e 0,93 respectivamente. Observa-se também (Tabela 03) que à medida que diminui o fluxo de água aplicado à coluna de solo arenosa, a fração de água móvel (β) se torna significativa. Não foram observadas variações significativas nos valores da dispersividade para os ensaios realizados sobre a mesma coluna de solo. Por outro lado, a média dos valores da dispersividade foram maiores na coluna de solo franco argilo-arenoso (1,62 cm) do que nas colunas de solo de areia franca (0,35 cm) e arenoso (0,04 cm). Com base nessa comparação, pode-se dizer que nos solos com teores de argila e silte significativos a distribuição do soluto é maior do que nos solos arenosos, para os casos estudados.

Tabela 03 - Resultado dos ajustes dos parâmetros hidrodispersivos utilizando o modelo CDE-MIM

| Ensaio | q (cm.d ⁻¹) | v (cm.d ⁻¹) | D (cm ² .d ⁻¹) | t_0 (d) | β | ω | θ_m | α (d ⁻¹) | λ (cm) | Pe |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---|-----------|---------|----------|------------|-----------------------------|----------------|--------|
| Coluna de areia franca (TA 4/2) | | | | | | | | | | |
| 1 | 7,09 | 20,07 | 4,38 | 1,01 | 0,987 | 1,00E-05 | 0,395 | 1,82E-06 | 0,22 | 183,29 |
| 2 | 7,50 | 21,79 | 7,10 | 1,09 | 0,988 | 1,00E-05 | 0,395 | 1,88E-06 | 0,33 | 122,76 |
| 3 | 6,95 | 17,99 | 7,82 | 1,08 | 0,955 | 1,00E-05 | 0,382 | 1,74E-06 | 0,44 | 90,88 |
| Média | 7,38 | 19,95 | 6,47 | 1,06 | 0,98 | - | 0,39 | - | 0,33 | - |
| DP | 0,314 | 1,554 | 1,513 | 0,037 | 0,015 | - | 0,006 | - | 0,091 | - |
| CV | 4,25 | 7,79 | 23,40 | 3,54 | 1,58 | - | 1,57 | - | 27,63 | - |
| Coluna franco argilo-arenosa (TA 3/3) | | | | | | | | | | |
| 4 | 11,09 | 24,85 | 48,02 | 0,70 | 0,974 | 1,00E-05 | 0,429 | 2,77E-06 | 1,84 | 21,89 |
| 5 | 12,37 | 28,85 | 38,32 | 0,72 | 0,958 | 1,00E-05 | 0,421 | 3,09E-06 | 1,33 | 30,16 |
| 6 | 14,14 | 34,99 | 50,39 | 0,84 | 0,963 | 1,00E-05 | 0,424 | 3,53E-06 | 1,44 | 27,78 |
| Média | 12,53 | 29,86 | 45,24 | 0,77 | 0,97 | - | 0,42 | - | 1,54 | - |
| DP | 1,251 | 4,102 | 4,553 | 0,049 | 0,007 | - | 0,003 | - | 0,222 | - |
| CV | 9,98 | 13,73 | 10,06 | 6,38 | 0,69 | - | 0,69 | - | 14,47 | - |
| Coluna arenosa (TA 3/4) | | | | | | | | | | |
| 7 | 62,02 | 155,70 | 29,86 | 0,15 | 0,934 | 1,00E-05 | 0,416 | 1,73E-05 | 0,19 | 209,98 |
| 8 | 61,17 | 166,40 | 28,23 | 0,15 | 0,919 | 1,00E-05 | 0,409 | 1,85E-05 | 0,18 | 253,78 |
| 9 | 60,49 | 165,50 | 27,63 | 0,15 | 0,940 | 1,00E-05 | 0,422 | 1,84E-05 | 0,17 | 239,16 |
| Média | 61,23 | 162,53 | 27,86 | 0,15 | 0,93 | - | 0,42 | - | 0,17 | - |
| DP | 0,630 | 4,846 | 1,406 | 0,003 | 0,012 | - | 0,005 | - | 0,014 | - |
| CV | 1,03 | 2,98 | 5,05 | 1,76 | 1,28 | - | 1,28 | - | 8,03 | - |
| 10 | 12,45 | 28,81 | 4,88 | 0,77 | 0,801 | 1,00E-05 | 0,356 | 3,11E-05 | 0,18 | 249,50 |
| 11 | 8,04 | 23,89 | 3,28 | 0,83 | 0,816 | 1,00E-05 | 0,363 | 2,48E-06 | 0,14 | 293,13 |
| 12 | 38,88 | 118,30 | 11,82 | 0,21 | 0,979 | 1,00E-05 | 0,436 | 9,74E-06 | 0,10 | 400,34 |

Comparando-se os resultados dos parâmetros obtidos a partir dos modelos CDE e CDE-MIM, pode-se observar que, para os parâmetros D , v , λ e Pe , os valores foram praticamente os mesmos, com exceção dos ensaios de 7 a 9 onde os valores dos parâmetros v e D obtidos com o modelo CDE-MIM são em média de 10 % inferiores àqueles obtidos com o modelo CDE. Nas Figuras 05 e 06 observa-se que não existem diferenças entre as curvas ajustadas pelos dois modelos (CDE e CDE-MIM). Portanto, para os solos utilizados e as condições experimentais aplicadas, tanto o modelo convecção-dispersão (CDE) quanto o modelo convecção-dispersão a duas frações de água (CDE-MIM) podem ser aplicados. Dessa forma, pode-se dizer que os dois modelos utilizados neste estudo produziram valores confiáveis dos parâmetros hidrodispersivos.

Conclusões – Para o tipo de ensaio e as condições utilizadas, tanto o modelo CDE como o modelo CDE-MIM representa com fidelidade as curvas de eluição experimentais. Seria provável que para o caso de colunas de solo não-saturados, o modelo que melhor representaria as curvas de eluição experimentais seria o modelo CDE-MIM. À exceção das velocidades superiores a 100 cm.d⁻¹, as velocidades estimadas pelos ajustes das curvas de eluição utilizando os modelos CDE e CDE-MIM são próximas às obtidas experimentalmente. Foi constatado nos ensaios que a variação do tamanho de poros e a diminuição do fluxo aplicado nos solos utilizados ocasiona um aumento na variabilidade da velocidade da água nos poros, caracterizado pelo coeficiente de variação. A relação entre D e v , observada a partir dos ensaios com o solo arenoso (7 a 12), parece ser linear. O valor estimado da dispersividade, coeficiente angular da reta, está dentro da faixa de valores calculados para cada ensaio. Os parâmetros hidrodispersivos determinados neste trabalho são de fundamental importância para a simulação de cenários visando melhorar o manejo e aplicação de substâncias químicas no solo, minimizando assim o risco de salinização e poluição dos lençóis freáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIGGAR, J.W., NIELSEN, D.R. (1976) Spatial variability of THE leaching characteristics of a field soil. *Water Resour. Res.* 12 (1): 78-84.
- COAST, K.H., SMITH, B.D. (1964) Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*. March: 73-84.
- FRIED, J.J., COMBARNOUS, M.A. (1971) *Advances in Hydrosience*; 7: 169-282; Dispersion in porous media.
- LEIJ, F.J.; TORIDE, N. (1995). Discrete time and length-averaged solutions of the advection-dispersion equation. *Water Resour. Res.* 31: 1713-1724.
- LOVELAND, P.J.; WHALLEY, R.W. (1991). Particle size analysis. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E., ed. *Soil Analysis – Physical methods*. Book in soil, plants and the environment. Marcel Dekker, Inc. Cap. 6: 271-328.
- MOLLE, F.; CARDIER, E. (1992) *Manual do pequeno açude*. Recife, SUDENE. p. 252.
- NOVY QUADRI, M.B. (1993). L'infiltrométrie multi-disques pour la caractérisation hydrodispersive des sols non saturés: modélisation des transferts et applications. Thèse (Doctorat) – Université Joseph Fourier. Grenoble.
- PAKER, J. C.; VAN GENUCHTEN, M. TH. (1984). Flux-average and volume-average concentration in continuum approaches to solute transport. *Water Resource Research*. 20: 866-872.
- RENARD, J.L.; CALVET, R. ; TOURNIER, C.; HUBERT, A. (1977). Mesure du coeficiente de dispersion hydrodynamic longitudinal dans un milieu poreux saturé. *Ann. Agronomiques*. 28: 47-64.
- ROTH, K. (1996). Lecture notes in soil physics. Institute of Soil Science, University of Hohenheim. Version 3.2.
- SCHINDWEIN, S. L. (1998). Parametrização do transporte dispersivo de solutos em solos estruturados: heterogeneidade do meio, percurso de transporte e modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*. 22: 173-179.
- SÉGOL, G. (1993). *Classic groundwater simulations: Proving and improving numerical models*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- TORIDE, N.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. (1993). A comprehensive set of analytical solutions for solute transport with first-order decay and zero-order production. *Water Resour. Res.* 29: 2167-2182.
- VAN GENUCHTEN, M. TH.; ALVES, W.J. (1982). Analytical solutions of the one dimensional convective-dispersive solute transport equation. USDA, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1661.
- VAN GENUCHTEN, M. TH.; WIERENGA, P.J. (1986). Solute dispersion coefficients and retardation factors. In *methods of soil analysis*. I. Physical and Mineralogical methods. Soil Sci. Soc. Madison, Wis.