



Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado¹



Jarbas H. de Miranda² & Sergio N. Duarte³

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

² ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11, CP 09, CEP 13418-900. E-mail: jhmirand@carpa.ciagri.usp.br (Foto)

³ ESALQ/USP. E-mail: snduarte@carpa.ciagri.usp.br

Protocolo 122 - 14/8/2001

Resumo: A agricultura intensiva está sempre em busca de incrementos de produtividade mas, em contrapartida, pouca atenção é dedicada a possíveis impactos ambientais. Portanto, o entendimento sobre processos de transporte de solutos no solo auxilia na redução da sua lixiviação para as camadas subsuperficiais. Neste sentido, objetivou-se, com o presente trabalho, desenvolver e avaliar um modelo computacional aplicado para simulação da dinâmica de solutos no solo por meio de soluções numéricas de equações diferenciais que descrevam esse transporte. Pelos resultados obtidos, o modelo apresentou bom ajuste das concentrações de nitrato e dos perfis de umidade, simulados com relação aos medidos em condições de laboratório em coluna vertical de solo não saturado.

Palavras-chave: dinâmica de solutos, modelagem, simulação, colunas de solo

A simulation model of nitrate displacement in vertical columns in a non-saturated soil

Abstract: Intensive agriculture always aims at increased productivity, with limited or no attention dedicated to possible impacts on the environment. Therefore, the understanding of processes of solute transport in the soil contributes to reduction of leaching to the deep layers. In this connection, the present study had the objective of developing and evaluating a computational model for solute displacement simulation in the soil based on numerical solutions of differential equations describing this displacement. From the results obtained, the model presented a good agreement of nitrate concentrations as well as soil moisture profile when compared with the results obtained on a vertical column of non-saturated soil under laboratory conditions.

Key words: solute displacement, modeling, simulation, soil column

INTRODUÇÃO

O entendimento quanto aos processos de transporte no solo de fertilizantes, herbicidas e pesticidas auxilia na redução da sua lixiviação para as camadas subsuperficiais. Segundo Dodds et al. (1998) quando os fertilizantes são deslocados para partes inferiores do perfil do solo, se torna inviável, além de acarretar risco de contaminação para as águas subterrâneas. Desta forma, a contaminação por nitrato e pesticidas tem-se tornado um sério problema ambiental, visto que áreas agrícolas possuem diferentes graus de exploração e potencial de poluição do lençol freático, dependendo do tipo de solo, geologia, clima e, o mais importante, do manejo das práticas agrícolas (Singh & Kanwar, 1995).

De acordo com as teorias que descrevem os processos físicos e químicos que ocorrem no solo, aliados às técnicas de resoluções

numéricas de equações e aos recursos computacionais disponíveis, é possível, utilizando-se modelos de simulação, prever os riscos de contaminação e impactos que determinado componente químico pode causar ao meio solo-água e às plantas.

Um grande número de modelos de simulação tem sido difundido na última década, visando descrever o movimento de solutos através do perfil do solo; o que se observa, porém, é que existe grande dificuldade em envolver todos os parâmetros pertinentes ao meio ambiente, para que o modelo possa realmente prever o processo de deslocamento e retenção dos solutos na natureza, razão pela qual se objetivou, com este trabalho, desenvolver e avaliar um modelo compartimental para simulação da dinâmica da água e de solutos no solo. O modelo simulará não só a distribuição da água como, também, a distribuição do nitrato em uma coluna vertical de solo, durante o processo de infiltração.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do modelo

O modelo proposto é do tipo compartimental. Ele foi aplicado para uma coluna de solo segmentada em camadas. No instante inicial foram considerados conhecidos os perfis de umidade e de concentração de nitrato. Esses perfis permitem determinar as taxas de transferência de água e de soluto entre camadas contíguas no início da simulação. A variável temporal é discretizada em intervalos de tempo suficientemente pequenos para que se possa considerar essas taxas constantes ao longo de cada perfil durante cada um desses intervalos. Assim, no final do primeiro intervalo, calculam-se as novas umidade e concentração de nitrato em cada camada, e conseqüentemente as novas taxas de transferências entre camadas. Repete-se esse processo, calculando-se dessa maneira os perfis de umidade e de concentração de soluto em cada intervalo de tempo subsequente, até o final do período da simulação. O uso desse método, chamado de esquema explícito de discretização, pode resultar em erros cumulativos não desprezíveis, dependendo principalmente dos valores dos intervalos de tempo utilizados. Vale ressaltar que quando a umidade do solo estiver próxima da umidade saturada, os intervalos de tempo devem ser reduzidos já que nesse caso, pequenas variações da umidade resultam em grandes variações da condutividade hidráulica. Em seguida são mostradas as equações para calcular as taxas de transferências de água e de solutos no solo.

Taxas de transferência de água

As taxas de transferência de água entre camadas contíguas, são calculadas pela Lei de Darcy:

$$q = -\bar{K}(\theta) \frac{\Delta\phi t}{\Delta Z} \quad (1)$$

em que:

- q - fluxo de água entre os pontos da coluna, L T⁻¹
- $\Delta\phi t$ - diferença do potencial total, L
- ΔZ - altura de cada anel da coluna, L

Tem-se o valor da condutividade hidráulica do solo não-saturado, cuja função $K(\theta)$ é obtida a partir da condutividade hidráulica do solo saturado, K_o , e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, de acordo com o modelo de Mualem (1976) e van Genuchten (1980), conforme Eq. 2.

$$K(\theta) = K_o \omega^\ell \left[1 - (1 - \omega^{1/m})^m \right]^2 \quad (2)$$

em que:

- $K(\theta)$ - condutividade hidráulica do solo não saturado, L T⁻¹
- K_o - condutividade hidráulica do solo saturado, L T⁻¹
- ℓ - parâmetro empírico, aproximadamente igual a 0,5 para a maioria dos solos
- m - parâmetro da curva de retenção de água no solo, adimensional

O valor da saturação efetiva (ω), é obtido pela Eq.3.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

em que:

- θ - umidade volumétrica do solo na condição inicial, L³L⁻³
- θ_r - umidade volumétrica residual do solo, L³L⁻³
- θ_s - umidade volumétrica do solo no ponto de saturação, L³L⁻³

Na superfície superior da primeira camada, onde está sendo aplicada a solução de nitrato, o modelo considera que os valores da condutividade hidráulica e da umidade inicial, correspondem ao ponto de saturação e, em seguida, determina o potencial mátrico, obtido pela Eq. 4:

$$\psi = \frac{\left(\frac{1}{\omega^{1/m}} - 1 \right)^{1/n}}{\alpha} \quad (4)$$

em que:

- α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, L⁻¹
- n - parâmetro da curva de retenção de água no solo; adimensional

Com os valores obtidos do potencial mátrico adicionados ao potencial gravitacional de cada ponto, considerados na metade de cada camada da coluna, o modelo determina o gradiente de potencial e, assim, estima o fluxo de água entre todas as camadas da coluna (Eq.1), considerando os valores de $K(\theta)$ médios entre as camadas.

De posse dos valores de fluxo de água e estando no primeiro intervalo de tempo de simulação, o modelo determina a variação de umidade que ocorreu em cada ponto da coluna, cujo valor é obtido pela Eq. 5.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta q A \Delta T}{V} \quad (5)$$

em que:

- $\Delta\theta$ - variação de umidade nas camadas da coluna, L³L⁻³
- Δq - diferença entre o fluxo que entrou e saiu da camada, L T⁻¹
- A - seção transversal da coluna, L²
- ΔT - intervalo de tempo simulado, T
- V - volume de cada anel da coluna, L³

Esta variação de umidade será acrescida a cada camada da coluna, quando o modelo iniciar o segundo intervalo de tempo de processamento, e assim por diante, até atingir o tempo total de simulação.

Taxas de transferência de nitrato

Uma vez determinado os valores de fluxo de água entre as camadas da coluna inicia-se, então, a determinação da concentração de nitrato em cada camada. O primeiro valor a ser obtido é o fluxo de nitrato, resultado do produto entre o fluxo de água, entre os anéis da coluna, já obtidos, e a concentração de nitrato na solução do solo que preenche a coluna.

Conforme já visto, o processamento do modelo baseia-se na discretização da coluna em camadas. A diferença de concentração (ΔC) utilizada para a determinação do fluxo de nitrato, é determinada dentro de cada simulação, no respectivo intervalo de tempo. Para se obter o fluxo do soluto entre duas camadas contíguas da coluna, é necessário determinar o fluxo de difusão-dispersão (Eq.6).

$$J_{dh} = D\bar{\theta} \frac{\Delta C}{\Delta Z} \tag{6}$$

em que:

- Jdh - fluxo de difusão-dispersão, $M L^{-2} T^{-1}$
- D - coeficiente de dispersão hidrodinâmico longitudinal, $L^2 T^{-1}$

$$D = D_m + D_{disp} \tag{7}$$

em que:

- D_m - coeficiente de difusão do soluto no solo na umidade θ , $L^2 T^{-1}$
- D_{disp} - coeficiente de dispersão do soluto para o fluxo q e a umidade θ , $L^2 T^{-1}$

Cujos coeficientes são obtidos pelas equações a seguir:

$$D_m = \left(\frac{\bar{\theta}^{10/3}}{\theta_s^2} \right) D_o \tag{8}$$

em que:

- D_m - coeficiente de difusão molecular do soluto na solução do solo, $L^2 T^{-1}$
- $\bar{\theta}$ - umidade média entre camadas consecutivas, $L^3 L^{-3}$
- θ_s - umidade volumétrica do solo no ponto de saturação, $L^3 L^{-3}$
- D_o - coeficiente de difusão molecular do soluto em água pura, $L^2 T^{-1}$

$$D_{disp} = \frac{\lambda q}{\theta} \tag{9}$$

em que:

- λ - dispersividade do meio poroso, parâmetro empírico que varia com a textura do solo e a distância coberta pelo soluto, L

O fluxo total de soluto entre as camadas da coluna é aditivo, ou seja, é o somatório entre o fluxo de massa e o fluxo de difusão-dispersão.

Para determinar a concentração do soluto em cada camada é necessário se determinar a quantidade de soluto que se movimenta, isto é, a quantidade de soluto que “entra” e “sai” em cada camada da coluna. Essas quantidades foram calculadas por um balanço de massa.

Experimento em laboratório

Foram realizados dois experimentos em laboratório para permitir a determinação das características do solo e dos parâmetros de transferência de nitrato em uma coluna de solo.

Características do solo

Nesse trabalho foram utilizados três tipos de material de solo, classificados e coletados nos municípios de Piracicaba, SP, e Lavras, MG. As coletas foram realizadas em perfis característicos para cada tipo de solo, a uma profundidade de 0 a 30 cm.

Os materiais foram preparados em laboratório, secados e em seguida peneirados através de uma malha de 2 mm. Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo, Fase arenosa, série “Sertãozinho” (Solo 1), Latossolo Vermelho Amarelo, Fase areno-argilosa (Solo 2) e Terra Roxa Estruturada (Solo 3).

Determinação das curvas de eluição e obtenção dos parâmetros de transporte do nitrato

Essa etapa foi desenvolvida no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, objetivando-se obter os parâmetros de transporte do nitrato nos três respectivos tipos de solo (Solo 1, Solo 2 e Solo 3). Um esquema foi montado em laboratório, composto pelos componentes apresentados na Figura 1.

Preparo da solução de nitrato

O soluto utilizado na solução foi o nitrato de cálcio tetraidratado ($Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$), diluído a uma concentração de nitrato de 50 mg L^{-1} . Para atingir esse valor, foi necessário

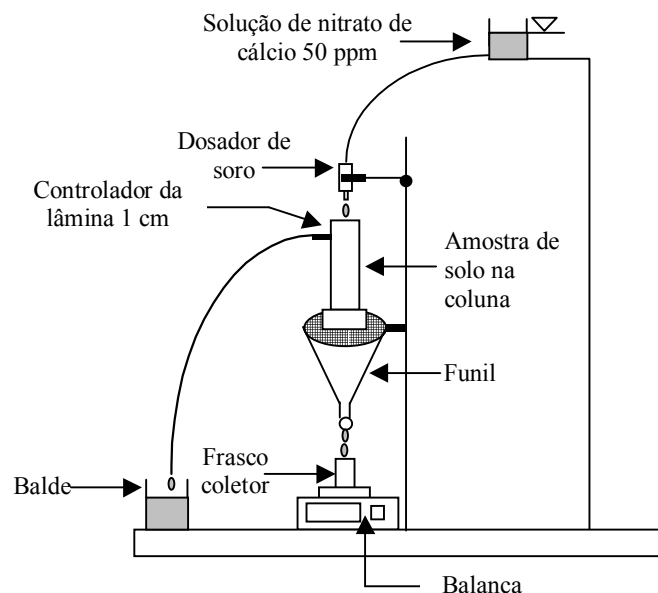


Figura 1. Esquema para a coleta de solução que atravessa a coluna de solo, para a elaboração das curvas de eluição

preparar-se uma solução-padrão contendo 19,032 g L⁻¹ de Ca(NO₃)₂·4H₂O, que resultou em uma solução que contém 10 g L⁻¹ de NO₃⁻. A partir dessa solução-padrão coletaram-se 10 mL, que foram completados com água destilada até atingir o volume de 2 L.

Aplicação da solução na coluna de solo

A solução de nitrato de cálcio foi aplicada utilizando-se um dosador daqueles utilizados em hospitais para soro, com o objetivo de regular a vazão. A coluna de PVC foi confeccionada para o teste com as seguintes dimensões: 20 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Na parte inferior da coluna colocou-se um círculo de manta sintética sobre uma tela fixada por um cap com rosca. Para manter uma lâmina constante de 1 cm, na parte superior da coluna foi instalada uma saída (ladrão) que retirava todo o excesso de água para um recipiente (balde). Para que o teste fosse iniciado saturava-se, primeiro, a coluna com água destilada, processo este realizado de forma lenta, no qual a coluna era colocada dentro de um balde e, por gotejamento, a água era adicionada ao balde, até atingir a altura aproximada de 2/3 da coluna; em seguida, deixava-se o conjunto em repouso durante 24 h e depois dava-se início ao teste, deixando-se passar água destilada através da coluna de solo (também por volta de 24 h) para que toda a quantidade de nitrato eventualmente presente no solo, que preenchia a coluna, fosse retirada. Atingido o fluxo constante, ocorria a troca do fornecimento de água para aplicação da solução de nitrato. A partir desse ponto, começava-se a coleta dos volumes da solução que atravessavam a coluna de solo.

Os frascos coletores possuíam 15 mL de volume, definidos em função do volume de poros, cujos valores estão em função do volume da coluna (392,7 cm³) e da porosidade do solo em questão (Eq. 10). Cada frasco representava aproximadamente 0,08 volume de poros.

$$VP = \alpha V \quad (10)$$

em que:

- VP - volume de poros, L³
- α - porosidade do solo em questão, decimal
- V - volume da coluna, L³

O volume coletado foi controlado por uma balança eletrônica com precisão de 0,01 g. Ao atingir 15 g de solução trocava-se o frasco.

Prevedendo-se a tendência dos pontos na curva de eluição e com o objetivo de se auxiliar no acompanhamento do teste, ou seja, na estimativa da concentração aproximada de nitrato na solução, elaborou-se uma curva de calibração, que representava a concentração de nitrato em função da condutividade elétrica (CE) da solução. O valor da CE em torno de 0,12 dS m⁻¹ representava, de forma aproximada, a concentração de 50 mg L⁻¹. Então, quando se atingia esse valor nos volumes coletados pelos frascos, o teste era finalizado e as amostras submetidas a análise, em laboratório.

Obtenção dos parâmetros de transporte pelo modelo CXTFIT

Para que os modelos possam determinar, com certa precisão, o movimento de solutos no solo, é necessário a determinação

de alguns parâmetros de transporte relativos a cada tipo de solo, como: coeficiente de dispersão (D), dispersividade (λ) e fator de retardamento (R). Para a obtenção desses valores utilizou-se o modelo CXTFIT, desenvolvido pelo U.S. Salinity Laboratory – USDA – Riverside-CA, versão 2.1 (atualizado em novembro de 1998) escrito na linguagem de programação FORTRAN. Para a obtenção de tais valores dos parâmetros eram feitas tentativas, de modo a se atingir um coeficiente maior de determinação, entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo.

Aplicação da solução na coluna segmentada

Após a obtenção dos parâmetros de transporte do soluto nos diferentes tipos de solo, passou-se para a próxima etapa do experimento em laboratório, com o objetivo de se obter as concentrações de nitrato ao longo de uma coluna segmentada. Para realizar esta etapa, confeccionou-se uma coluna com as seguintes dimensões: 75 cm de altura e 5 cm de diâmetro. A coluna era dividida em 10 anéis com 7 cm de altura e o anel superior com 5 cm, totalizando 11 anéis.

O anel superior era um pouco menor, 5 cm de altura, com a função de proteção no momento da aplicação da solução, e também, para auxiliar na verificação da formação de uma lâmina da solução que estava sendo aplicada na superfície do solo na coluna, o que não era desejável. De certa forma, este processo auxiliava na regulação da vazão do dosador de solução, que tinha que ser tal de modo que todo o volume aplicado infiltrasse na coluna, ou seja, em torno de 150 mL h⁻¹. Para evitar vazamentos da solução entre os anéis, foi utilizada uma fita adesiva.

A coluna foi preenchida utilizando-se um volume conhecido do solo peneirado, que foi submetido ao teste e pesado logo em seguida. A aplicação da solução de nitrato foi feita pelo dosador de soro por tempo determinado (aproximadamente 2 h) e com uma vazão tal, que a frente de molhamento não atingisse o final da coluna nem houvesse a formação de uma lâmina no primeiro anel da coluna. Passado o intervalo de tempo total de aplicação da solução, interrompia-se o fornecimento da solução e dava-se início ao procedimento de retirada dos anéis. Os anéis foram desmontados e se preparou uma pasta saturada com o solo que foi retirado. Em um primeiro instante, determinou-se o valor da umidade do solo após o fornecimento da solução. A umidade foi medida pelo método gravimétrico. Como nos anéis inferiores a umidade foi menor, necessitou-se adicionar água destilada para facilitar a extração da solução; assim, o valor da umidade foi alterado, necessitando-se determinar o novo valor, para se fazer o ajuste de acordo com a situação inicial. As pastas ficaram em repouso por 24 h e depois por meio de filtro e bomba de vácuo, retiraram-se as soluções que seriam submetidas a análise, em laboratório. Tanto as amostras relativas às curvas de eluição como para a determinação da concentração de nitrato nas soluções das pastas de solo, foram submetidas ao método da Brucina (APHA, 1976) cujo princípio se baseia no fato de que o nitrato reage com a Brucina, um alcalóide, em meio ácido, produzindo uma solução com coloração amarela. A cor produzida é proporcional à sua concentração na amostra, o que permite, então, a determinação por colorimetria. Os fatores que podem

interferir na análise das amostras são: coloração da amostra, presença de sedimentos em suspensão e tamanho das amostras. As amostras que contêm altas concentrações de nitrato devem ser diluídas. As análises do nitrato foram feitas no Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Engenharia Florestal da ESALQ/USP.

Com o objetivo de validação do modelo, foram comparados os resultados obtidos da concentração de nitrato do solo, com base em 3 repetições. Considerou-se, repetição, o preenchimento da coluna com cada tipo de solo. Neste sentido, o modelo considerou os pontos médios de cada anel para comparação com os valores experimentais.

A coluna segmentada e a representação esquemática dos anéis na coluna podem ser observadas na Figura 2.

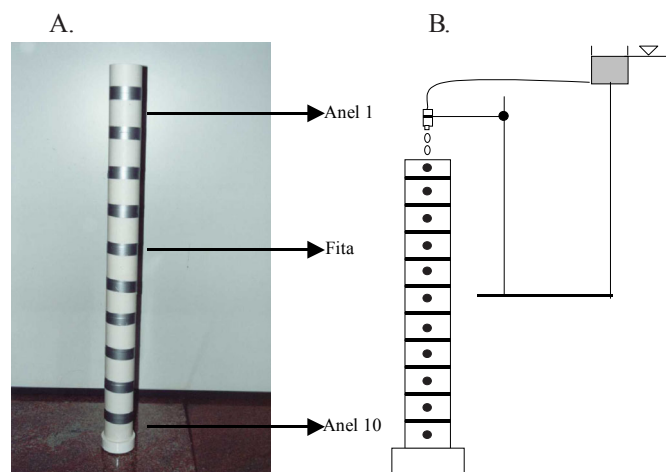


Figura 2. Coluna utilizada para se aplicar a solução e determinação da concentração de nitrato (A) e representação esquemática da aplicação da solução de nitrato na coluna com um dosador (B)

Os valores de entrada no modelo, que dizem respeito à umidade inicial e à concentração inicial de nitrato no solo da coluna, foram obtidos nos anéis não atingidos pela frente de molhamento. Com relação ao intervalo de tempo utilizado na simulação, foi estipulado um intervalo de tempo (ΔT) igual a 0,3 s, o qual, de acordo com o tempo de aplicação da solução, permitia estabelecer-se o número de intervalos. O incremento de profundidade (ΔZ) adotado foi igual a 7 cm de profundidade, isto é, igual à altura de cada anel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características do solo

A Tabela 1 apresenta as características físico-hídricas, e a Tabela 2 os parâmetros da curva de retenção, segundo o modelo de van Genuchten (1980) dos três solos submetidos à simulação.

Curvas de eluição

A determinação dos parâmetros de transporte relativos a cada tipo de solo foi feita mediante a utilização do modelo CXTFIT, desenvolvido pelo U.S. Salinity Laboratory - USDA - Riverside-CA, versão 2.1. Os valores obtidos desses parâ-

Tabela 1. Características físico-hídricas dos três solos submetidos à simulação

Tipo de Solo	Textura			Densidade		Poros.	K _o
	Areia	Silte	Argila	Solo	Part.		
	g kg ⁻¹			kg dm ⁻³		%	cm h ⁻¹
Solo 1	695	120	185	1,56	2,575	39,41	18,19
Solo 2	550	70	380	1,26	2,515	49,90	16,18
Solo 3	120	250	630	1,33	2,580	48,44	8,73

Part. - Partículas; Por. - porosidade

Tabela 2. Parâmetros da curva de retenção, segundo o modelo de van Genuchten (1980) dos três solos submetidos à simulação

Tipo de Solo	Parâmetros da Curva de Retenção				
	θ_r	θ_s	α	n	m
	cm ³ cm ⁻³		cm ⁻¹		
Solo 1	0,162	0,443	0,0449	3,6732	0,1119
Solo 2	0,164	0,562	0,1265	3,9898	0,1284
Solo 3	0,207	0,645	0,0429	1,4250	0,1995

tros de transporte, estão apresentados na Tabela 3 e a representação gráfica dos valores experimentais e ajustados pelo modelo CXTFIT, encontram-se na Figura 3.

Tabela 3. Parâmetros de transporte do nitrato: velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersão (D), fator de retardamento (R) e dispersividade (λ), dos três solos submetidos à simulação

Tipo de Solo	Parâmetros de Transporte de Nitrato			
	V	D	R	λ
	cm min ⁻¹	cm ² min ⁻¹		cm
Solo 1	0,9920	11,6800	1,340	11,77419
Solo 2	0,4649	0,9996	1,088	2,15014
Solo 3	0,2708	0,1042	1,572	0,38470

Validação do modelo comparando-se o perfil de umidade simulado e a média das três medições

Os valores de umidade simulados pelo modelo apresentaram-se similares aos valores obtidos experimentalmente. De maneira geral, os valores de umidade, em termos médios, obtidos em laboratório na coluna para os três tipos de solo, mantiveram-se constantes até uma profundidade aproximada de 45 cm e, em seguida, reduziram-se, evidenciando que nos testes realizados em laboratório a frente de molhamento não atingiu os anéis na parte inferior da coluna (Fig. 4).

Em relação ao Solo 1, por se tratar de um solo arenoso e, portanto, com maior presença de macroporos, o que implica em retenção menor de água, os valores obtidos de umidade comparados com os outros solos foi menor, ou seja, em torno de 38% nas camadas superiores da coluna pelos dados experimentais e 44% para os valores simulados. Houve boa concordância entre os valores medidos e os simulados, no que se refere à posição da frente de molhamento.

Para o Solo 2, ocorreu pequeno aumento, quando comparado com o Solo 1, por parte dos valores da umidade nos anéis superiores, obtidos tanto pelo modelo como experimentalmente, ficando em torno de 44% para os dados experimentais, e de 56% para os valores simulados.

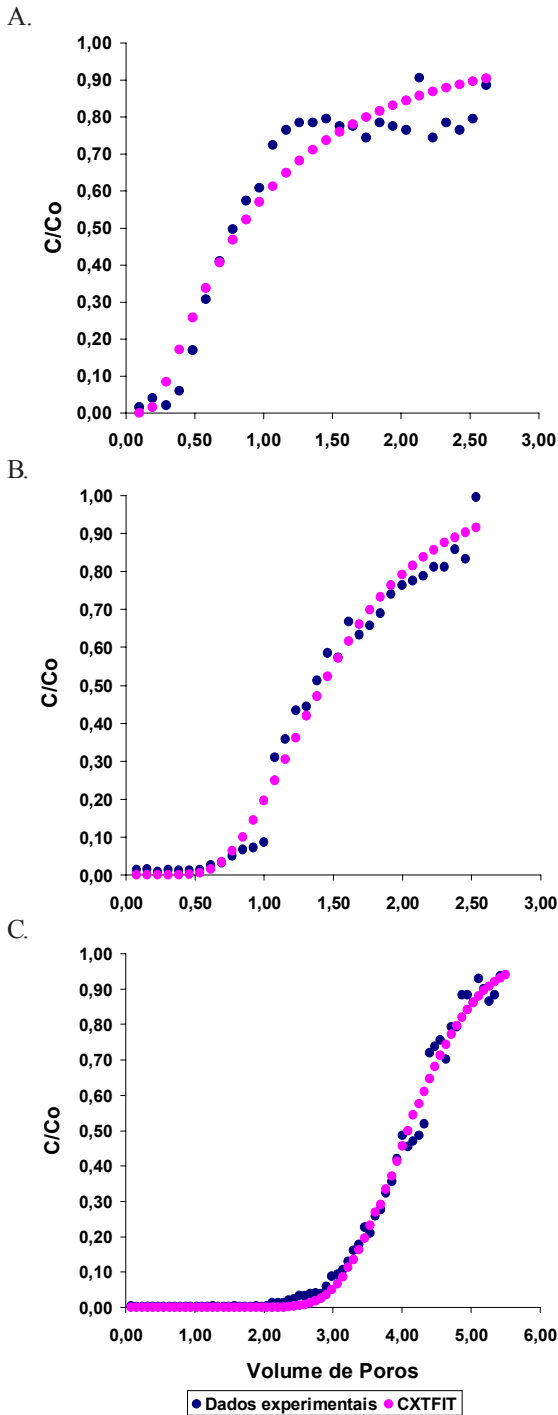


Figura 3. Curvas de eluição obtidas para o Solo 1 (A), Solo 2 (B) e Solo 3 (C)

No Solo 3 obtiveram-se os maiores valores de umidade na zona de transmissão e as menores diferenças entre os valores medidos e os simulados. Observa-se que os valores obtidos experimentalmente para o Solo 3, nos dois anéis superiores da coluna, apresentaram-se superiores aos da umidade volumétrica do solo saturado, o que pode ser devido a um erro de pesagem em laboratório.

Validação do modelo, comparando-se o perfil de concentração de nitrato na solução do solo simulado em relação à média das três medições

Os resultados obtidos para o movimento do nitrato na coluna, serão apresentados e discutidos em função dos valores

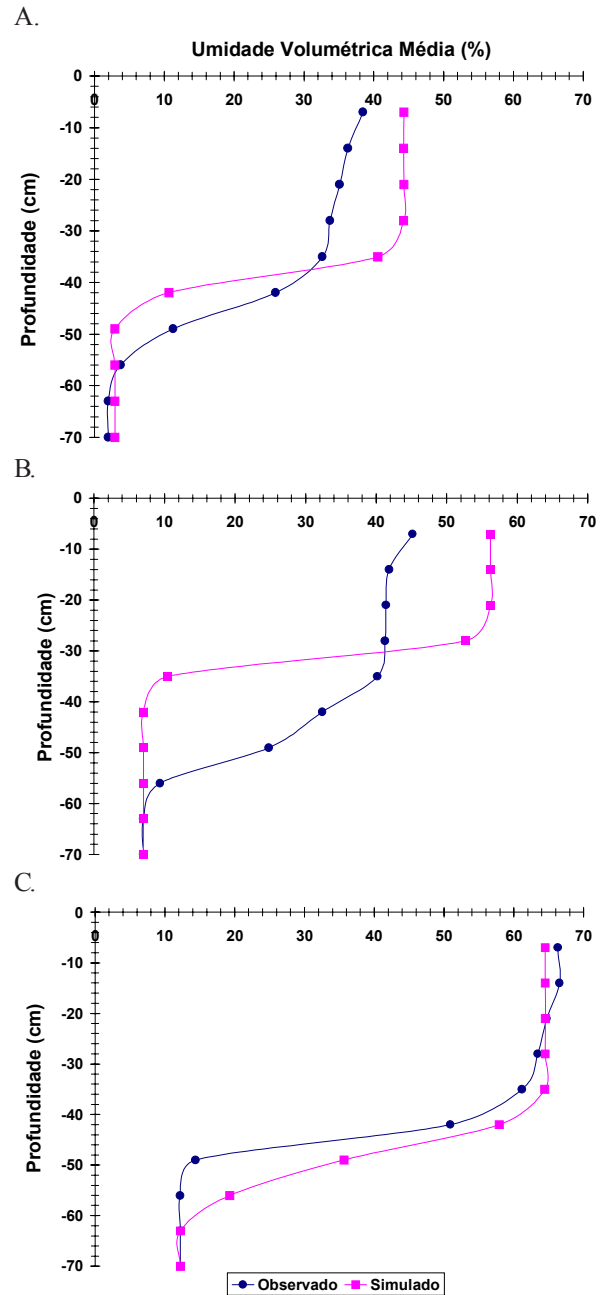


Figura 4. Perfil de umidade média de três repetições obtido em laboratório e pelo modelo para os solos: Solo 1 (A), Solo 2 (B) e Solo 3 (C)

simulados pelo modelo e pelas análises de laboratório. Os valores da concentração de nitrato resultantes das análises em laboratório, serão discutidos em função de valores médios e de três repetições que foram realizadas para cada coluna preenchida com cada tipo de solo. Primeiramente, serão discutidos os valores da concentração de nitrato, em termos médios (Fig. 5).

Pelos valores avaliados no Solo 1 e segundo os dados medidos em laboratório, nota-se a ocorrência de um processo de lixiviação evidenciando-se, desta forma, um processo de lavagem do solo, principalmente das camadas superiores para as inferiores, no qual o aumento de nitrato se tornou evidente, a medida em que a frente de molhamento atingia os anéis inferiores da coluna, variando de 8 mg L⁻¹ nos anéis superiores a 104 mg L⁻¹ nos anéis inferiores.

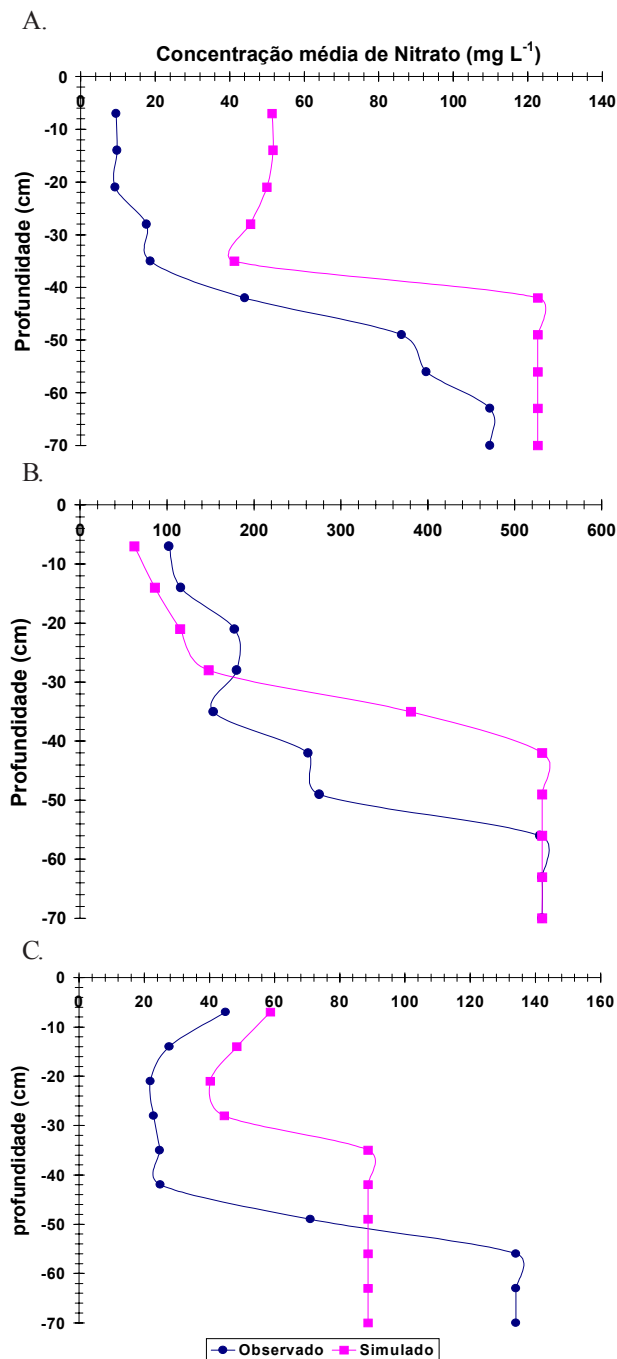


Figura 5. Perfil de concentração de nitrato obtido em laboratório, em relação à média de 3 repetições e pelo modelo para os solos: Solo 1 (A), Solo 2 (B) e Solo 3 (C)

A simulação mostrou-se com capacidade de prever esse efeito da lixiviação, já que os anéis superiores mantiveram valores de concentração de nitrato em torno de 46 mg L⁻¹ e variaram até atingir concentrações de 122 mg L⁻¹ nos anéis inferiores.

Para o solo 2, os valores simulados de concentração de nitrato apresentaram a mesma tendência dos valores medidos, em termos médios. De maneira geral, os valores obtidos na

simulação para a concentração de nitrato nos anéis superiores e inferiores, ajustaram-se muito bem aos valores obtidos em laboratório. Observou-se maior concentração inicial de nitrato no solo 2 que no solo 1. O processo de lixiviação se fez presente, de forma que até na profundidade de 35 cm os valores de concentração de nitrato obtidos em laboratório, variaram pouco. No caso da simulação, a maior variação ocorreu a partir de 28 cm até cerca de 42 cm, coincidindo com o perfil de umidade, que apresentou as maiores variações a essa profundidade.

No solo 3, o comportamento do modelo também mostrou tendência semelhante aos valores obtidos em laboratório, principalmente até uma profundidade de 30 cm. O processo de lixiviação tornou-se evidente nos valores medidos em laboratório, em especial nas camadas de 14 a 42 cm. Nesta situação, a umidade do solo nos anéis superiores se manteve na saturação o que provocou, de certa forma, lavagem do nitrato. Nos anéis medianos a diferença entre os valores medidos e simulados foi maior.

CONCLUSÕES

1. Os resultados obtidos pelas simulações da concentração de nitrato na coluna e o perfil de umidade no solo que preencheu a coluna, permitiram concluir-se que o modelo possibilitou prever a tendência do movimento unidirecional do nitrato em colunas verticais de solo não saturado apresentando, de certa forma, a mesma tendência observada pelos dados experimentais.

2. Com relação à distribuição do perfil de umidade, nota-se que a simulação para o solo com textura argilosa apresentou o melhor perfil de distribuição dos pontos simulados em relação aos obtidos em laboratório.

LITERATURA CITADA

- APHA - American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 14. ed. Washington, 1976. 1193p.
- Dodds, G.T.; Mandramootoo, C.A.; Serem, V.K. Predicting nitrate-N leaching under different tillage systems using LEACHM and NTRM. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.41, n.4, p.1025-1034, 1998.
- Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, New York, v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- Oliveira, L.F.C. Modelo para transporte de solutos no solo e no escoamento superficial. Viçosa: UFV, 1999, 171p. Tese Doutorado
- Singh, P.; Kanwar, R.S. Simulating NO₃-N transport to subsurface drain flows as affected by tillage under continuous corn using modified RZWQM. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.38, n.2, p.499-506, 1995.
- van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.