

Acurácia do Modelo Hydrus na Predição da Lixiviação de Nitrato Resultante da Aplicação de Lodo de Esgoto Tratado a Solos de Diferentes Texturas

Accuracy of the Hydrus Model to Predict Nitrate Leaching as a Result of Applying Treated Sewage Sludge to Soils of Different Textures

Henrique Marinho Leite Chaves¹, Andrea Valente Jankosz², Luis Antonio Correa Lucchesi³ e Paulo Marques⁴

¹ Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

hlchaves@terra.com.br

² Agencia de Defesa Agropecuária do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

andreavs2004@terra.com.br

³ Departamento de Solos e Engenharia Agrícola do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, Brasil.

lclucche@ufpr.br

⁴ Departamento de Solos da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, Brasil

pmarquesx@terra.com.br

Recebido: 20/04/15 - Revisado: 11/08/15 - Aceito: 18/09/15

RESUMO

em função dos seus teores de matéria orgânica, de macro e micro-nutrientes, o lodo de esgoto tratado apresenta um grande potencial de utilização no reflorestamento e na recuperação de áreas degradadas. Entretanto, sua aplicação pode levar à contaminação da água subterrânea, em função da alta mobilidade de compostos como o nitrato, que é cancerígeno. A modelagem matemática vem se tornando uma ferramenta importante na avaliação do risco de contaminação de águas superficiais e sub-superficiais por pesticidas e nutrientes. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a acurácia do modelo Hydrus 1-D (Versão 3.0) na predição da lixiviação de nitrato no perfil do solo. Para tanto, dados experimentais de um estudo de lixiviação, conduzido em laboratório com três solos de diferentes texturas, submetidos a quatro doses de lodo de esgoto tratado, foram utilizados para alimentar o modelo Hydrus. As condições de contorno e iniciais das colunas experimentais foram introduzidas no modelo Hydrus após a calibração dos parâmetros da equação de Van Genuchten-Mualem, usando o volume percolado do experimento como função objetiva. Valores médios de concentração de nitrato no lixiviado, obtidos na extremidade inferior das 48 colunas de solo no laboratório (combinações de 3 solos, 4 doses de lodo e 4 repetições), foram comparados com os valores de concentração calculados pelo modelo Hydrus 1-D. O erro relativo entre os valores calculados e observados das concentrações foi de -1,97%, e o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,96$. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $E=0,95$ que, combinado com os outros dois indicadores de performance, representa uma alta acurácia do modelo na predição do processo de lixiviação de nitrato nas condições estudadas.

Palavras Chave: Modelagem matemática. Hydrus 1-D. Lixiviação. Nitrato.

ABSTRACT

Due to its organic matter and nutrient content, sewage sludge presents a good potential for use in reforestation and reclamation of degraded lands. However, its application poses water contamination risks, due to the high mobility of compounds such as nitrate (carcinogenic). On the other hand, mathematical modeling is becoming an important tool for the evaluation of risks of water contamination by nutrients and pesticides. The aim of the present study was to evaluate the global accuracy of the Hydrus 1-D model (version 3.0) to predict nitrate leaching within the soil profile. For this purpose, experimental data from a laboratory leaching study, considering three different soils and submitted to four doses of sewage sludge, were fed into the Hydrus model, after calibrating the parameters of the Van Genuchten-Mualem equation, using the percolated volumes from the experiment as the objective function. Mean nitrate concentrations in the leachate, collected at the bottom of the experimental columns, were then compared with nitrate concentrations predicted by the Hydrus model. The mean relative error between the observed (experiment) and calculated (model) values was -1.97%, and the R^2 was 0.96. The Nash-Sutcliffe coefficient was $E=0.95$, indicating a very high model accuracy in the prediction of nitrate leaching, under the studied conditions.

Keywords: Mathematical modeling. Hydrus 1-D. Leaching. Nitrate.

INTRODUÇÃO

A crescente produção de lodo em estações de tratamento de esgoto nas cidades brasileiras e seu alto teor de macro-nutrientes e de matéria orgânica têm levado à sua utilização como fertilizante e condicionador de solos agrícolas e florestais, e na recuperação de áreas degradadas (CAMPOS; ALVES, 2008).

Apesar dessas vantagens naturais do efluente, há riscos para a saúde humana se sua aplicação for indiscriminada, uma vez que nele estão presentes alguns potenciais contaminantes. Dentre as substâncias potencialmente nocivas contidas no lodo de esgoto está o nitrato (US-EPA, 1986). Além de seu alto potencial contaminante e cancerígeno, o nitrato é também um composto altamente móvel no perfil do solo, requerendo um adequado manejo nas bacias hidrográficas, sob pena de contaminação das águas subterrâneas (ALMASRI; KALUARACHCHI, 2007).

Enquanto as concentrações médias de nitrato na água subterrânea em áreas sob vegetação natural é inferior a $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ (HALLBERG, 1989), as concentrações frequentemente ultrapassam os 10 mg L^{-1} (limite máximo estabelecido pelo US-EPA e pela Res. CONAMA No. 357/05) em áreas agrícolas (SPALDING; EXNER, 1993). Tendo em vista a crescente população abastecida pela água subterrânea todo o mundo, sua proteção é parte fundamental da gestão de recursos hídricos (POWER; SCHEPERS, 1989).

Buscando regular a aplicação de lodo de esgoto e minimizar seu impacto aos recursos hídricos subterrâneos, legislação específica foi estabelecida no Brasil, estabelecendo limites em relação aos nutrientes presentes no lodo, inclusive o nitrato (BRASIL, 2006). Entretanto, mesmo tratado por diferentes processos, o lodo de esgoto ainda apresenta riscos de lixiviação de nitrato, com consequências nocivas para a saúde dos consumidores de água (BARRETT et al., 1998; WOLFE; PATZ, 2002).

Visando quantificar esse tipo de risco ambiental, houve, nos últimos 30 anos, um avanço significativo na modelagem matemática do processo de movimento de água e de solutos como o nitrato no perfil do solo. Dentre os modelos mais utilizados está o Hydrus 1-D (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2005). Este modelo simula a movimentação uni-dimensional de água, calor e de solutos no solo, a partir de condições iniciais e de contorno, introduzidas pelo usuário, sendo geralmente mais preciso que outros modelos (CREVOISIER; POPOVA; MAILHOL, 2008).

Chaves (2009), após analisar a sensibilidade dos parâmetros hidráulicos do modelo Hydrus 1-D em simulações de lixiviação com diferentes tipos de solos brasileiros, concluiu que o modelo é matematicamente robusto e apresenta um bom potencial de aplicação no país.

Shekofteh et al. (2013), analisando a lixiviação de nitrato em parcelas experimentais de batata (*Solanum tuberosum*), encontrou um R^2 de 0,90 entre os valores de nitrato observados e calculados pelo modelo Hydrus.

Tafteh e Sepaskhah (2012), por sua vez, estudando a lixiviação de nitrato em lisímetros sob cultivo de milho (*Zea mays*), obtiveram um R^2 de 0,97 entre os valores medidos no experimento e os calculados pelo modelo Hydrus-1D.

Darby e Nasser (2006), analisando a lixiviação de nitrato em colunas de solo de 40 cm de comprimento, encontraram uma boa correlação ($R^2=0,99$) entre os valores observados e calculados pelo Hydrus-1D.

Entretanto, nenhum dos estudos acima avaliou a lixiviação de nitrato decorrente da aplicação de lodo de esgoto ao solo, nem tampouco foi analisado o efeito da textura do solo no processo de lixiviação.

Além disso, os três estudos supramencionados utilizaram apenas o coeficiente de determinação (R^2) como indicador de acurácia do modelo Hydrus 1-D, reduzindo a robustez da análise (MORIASI et al., 2007).

Visando preencher esta lacuna, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar a acurácia do modelo Hydrus 1-D na predição da lixiviação de nitrato, resultante da aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto tratado por compostagem, a 3 solos brasileiros, de diferentes texturas, usando indicadores de performance como o erro relativo entre valores observados e calculados, o coeficiente de determinação, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe.

MATERIAL E MÉTODOS

Modelo Hydrus.

O modelo Hydrus 1-D (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2005) é um dos algoritmos mais utilizados na estimativa do movimento de água e de solutos na zona vadosa do solo, em estudos de recarga e de poluição de aquíferos (CHAVES, 2009). O movimento de água no perfil do solo é calculado por meio da solução numérica da equação de Richards, usando o método das diferenças finitas (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2005).

O modelo Hydrus 1-D Versão 3.0, usado neste estudo, consiste de um arquivo executável, com código em Fortran, o qual gerou, a partir de dados tabulares de entrada, valores calculados de volume de água percolada e de concentração de solutos na solução lixiviada.

Para a estimativa da condutividade não saturada, em função do conteúdo e da tensão de água no solo, o modelo utiliza a equação de van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980).

O transporte de solutos, por sua vez, é calculado por equações diferenciais parciais que representam os processos de convecção e de dispersão hidráulica no solo. O modelo supõe uma interação de não-equilíbrio entre as concentrações da solução e a adsorvida, e permite a simulação com solos homogêneos ou heterogêneos, em fluxo vertical ou horizontal (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2005).

Condições Iniciais e de Contorno do Modelo

O modelo Hydrus 1-D requer o conhecimento da concentração inicial do contaminante na coluna de solo. Para isso, a equação de Dirichlet foi utilizada:

$$c(x,t) = c_0(x,t) \quad \text{em } x = 0 \text{ ou } x = L \quad (1)$$

onde: c (mg cm^{-3}) = concentração do soluto no solo; x (cm) = distância em relação a superfície, t (s) = tempo; L (cm) = profundidade da coluna de solo.

Modelagem Matemática da Lixiviação de Nitrato com o Modelo Hydrus

No presente estudo, a análise da acurácia do modelo Hydrus 1-D consistiu na comparação dos valores de concentração de nitrato no lixiviado, calculados pelo modelo, com aqueles obtidos em colunas de solo, em laboratório.

Para isso, as condições iniciais e de contorno do experimento laboratorial de Jankosz (2008) foram introduzidas ao modelo Hydrus 1-D. Naquele experimento, três solos paranaenses, de diferentes texturas, foram submetidos a quatro doses diferentes de lodo de esgoto, tratado pelo processo N-Viro Soil® (US-EPA, 2000).

Os solos estudados foram dois Latossolos vermelhos, de Londrina (LV-L) e Paranaíba (LV-P), e um Latossolo vermelho-amarelo (LVA-C), de Contenda, todos do estado do Paraná.

As características físicas dos solos utilizados nas colunas experimentais e nas simulações com o modelo Hydrus 1-D são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas dos solos usados no presente estudo

Solo	Argila	Silte	Areia	Poros. total	Dens. apar.
	%	%	%	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	g cm^{-3}
LV-L	78,4	16,0	5,6	0,676	1,07
LVA-C	65,0	24,0	11,0	0,731	1,02
LV-P	20,0	2,0	78,0	0,519	1,36

Fonte: Jankosz (2008)

A tabela 2 apresenta a caracterização química dos três solos usados no experimento de Jankosz (2008) e nas simulações com o modelo Hydrus 1-D.

Tabela 2 - Caracterização química dos solos usados no experimento de Jankosz (2008) e nas simulações do presente estudo

Parâmetro	Solo		
	LV-L	LVA-C	LV-P
pH (CaCl_2)	4,20	4,50	4,40
pH (SMP)	5,60	6,40	6,50
Al ³⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	1,10	0,40	0,40
H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	6,70	3,70	3,40
Ca ²⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,60	0,40	0,60
Mg ²⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,40	0,30	0,40
K ⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,04	0,03	0,02
P (mg dm^{-3})	3,10	1,50	2,50
C (g dm^{-3})	6,30	5,10	3,90
M.O. (%)	0,63	0,51	0,39
m (%)	51,00	35,00	28,00
V (%)	13,00	16,00	23,00

As doses de lodo de esgoto, tratado pelo processo de compostagem N-Viro®, e incorporadas na superfície das colunas de solo antes da percolação, usadas no experimento de Jankosz (2008) e nas simulações com o modelo Hydrus 1-D no presente estudo, são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Doses de lodo aplicadas e teores de N e N-NO₃ no lodo, usados no experimento de Jankosz (2008) e nas simulações com o modelo

Tratamento	Dose de lodo tratado		N	N-NO ₃
	g	ton ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	mg L ⁻¹
Testemunha	0,0	0,0	0,0	0,0
N-Viro 1	26,0	34,0	72,0	0,147
N-Viro 2	52,0	69,0	145,0	0,294
N-Viro 3	104,0	138,0	289,0	0,589

A variável selecionada para a avaliação da acurácia do modelo Hydrus 1-D foi a concentração média de N-NO₃ (mg L⁻¹) no lixiviado, coletado em beakers no fundo das colunas de solo, considerando as diferentes combinações de solos e doses de lodo do experimento de Jankosz (2008), apresentadas na tabela 3.

As condições de contorno das simulações com o modelo foram as mesmas usadas por Jankosz (2008), ou seja: coluna de solo com 60 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, drenagem livre no fundo e fluxo constante.

Já as condições iniciais para as simulações com o modelo foram: umedecimento das colunas de solo até 80% de sua capacidade de campo e incorporação das doses de lodo (Tabela 3) nos 2 cm superiores da coluna, antes do início da percolação com 1,0 L de água deionizada (Jankosz, 2008).

Os parâmetros K_s , θ_s , θ_r , α , e n da equação de van Genuchten-Mualem, requeridos pelo modelo, foram obtidos através da rotina Rosetta do modelo Hydrus 1-D (Simunek; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2005). Utilizou-se, para tanto, as informações de textura, densidade aparente, conteúdo de água do solo a 0,33 atm ($\theta_{0,33\text{atm}}$), e conteúdo de água do solo a 15 atm ($\theta_{15\text{atm}}$) dos três solos estudados.

De forma a uniformizar as condições iniciais do modelo Hydrus 1-D e do experimento de Jankosz (2008), a tensão inicial da coluna de solo no modelo foi calibrada usando-se, como variáveis da função objetiva, os valores médios do tempo de frente de molhamento, e dos volumes percolados e armazenados nas colunas de solo do experimento.

Assim, a tensão inicial da coluna de solo (em cm de H₂O) antes da lixiviação foi selecionada de tal forma que os valores médios observados de volume percolado e de volume armazenado fossem os mesmos, nas colunas experimentais e no modelo.

Depois de alimentado com as condições iniciais de umidade e concentração de nitrato no solo (coluna) e no lodo de esgoto (topo da coluna), e conhecendo-se o volume lixiviado total, o modelo Hydrus 1-D foi executado e os valores das concentrações finais de nitrato do lixiviado, calculados pelo modelo, registrados.

Avaliação da Acurácia do Modelo

A acurácia do modelo Hydrus 1-D foi obtida através de três indicadores: i) erro relativo médio entre os valores de concentração de nitrato calculados pelo modelo e observados experimentalmente (GARG; CHAUBEY; HAGGARD, 2003); ii) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (1970); e iii) R^2 e ajuste gráfico (James; Burges, 1982).

O erro relativo (ER) é dado pela seguinte equação (GARG; CHAUBEY; HAGGARD, 2003):

$$ER (\%) = 100 \frac{(O - C)}{O} \quad (2)$$

onde: ER (0-100) = erro relativo do modelo; C (mg L^{-1}) = valor da concentração de nitrato lixiviado, calculado pelo modelo; e O (mg L^{-1}) = valor da concentração do lixiviado, observada no experimento.

O coeficiente de eficiência (E) de Nash e Sutcliffe (1970) é dado pela seguinte equação:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)^2} \quad (3)$$

onde: O_i (mg L^{-1}) = valor observado da concentração de nitrato no lixiviado; C_i (mg L^{-1}) = valor da concentração calculado pelo modelo; e O_m (mg L^{-1}) = valor médio das concentrações de nitrato no lixiviado, observadas em cada tratamento do experimento.

No método do ajuste gráfico (JAMES; BURGESS, 1982), os valores observados da concentração de nitrato no lixiviado foram plotados contra os valores de concentrações calculados pelo modelo Hydrus 1-D, identificando-se analítica (R^2) e visualmente (aderência dos pontos à linha ideal 1:1) o ajuste do modelo.

A avaliação da acurácia global do modelo foi feita utilizando-se, ao mesmo tempo, os três indicadores acima, evitando-se, dessa forma, vieses na análise. Isso decorre do fato de que, individualmente, os três métodos acima apresentam vantagens e limitações (MORIASI et al., 2007). Dentre estas, está a alta sensibilidade a valores extremos, que é reduzida quando os três indicadores de acurácia são analisados em conjunto.

Dessa forma, estabeleceram-se os seguintes critérios para a avaliação da acurácia global do modelo Hydrus 1-D (GARG; CHAUBEY; HAGGARD, 2003; Moriasi et al., 2007): i) $|ER| < 20\%$; ii) $E > 0$; e iii) $R^2 > 0,50$ e pontos visualmente ajustados à linha 1:1 do gráfico de valores observados e calculados de nitrato lixiviado.

Assim, se o modelo Hydrus 1-D atendesse, ao mesmo tempo, a todos os três critérios acima, ele apresentaria uma acurácia global *muito alta*. Se dois dos critérios fossem atendidos, sua acurácia global seria *alta*. Se apenas um critério fosse observado, sua acurácia global seria *média*. Se, entretanto, nenhum dos três critérios acima fosse atendido, a acurácia global do modelo seria *baixa*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros da equação de van Genuchten-Mualem, calculados pela rotina Rosetta do modelo Hydrus 1-D, os quais foram posteriormente utilizados nas simulações de lixiviação.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros da equação de van Genuchten-Mualem* calculados pela rotina Rosetta, e utilizados nas simulações com o modelo

Parâmetro	Solo		
	LV-L	LVA-C	LV-P
θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0,559	0,567	0,447
θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0,197	0,208	0,110
n	1,430	1,350	2,270
α	0,066	0,071	0,050
m	0,301	0,259	0,559
K_s (cm h^{-1})	3,3	2,9	24,0
h_{inicial} ($\text{cm H}_2\text{O}$)	8,0	35,0	25,0

*Os parâmetros são descritos em Simunek et al. (2005)

De acordo com a tabela 4, a condutividade saturada (K_s) do Latossolo de Paranavaí (LV-P) foi muito superior à dos outros dois latossolos, mais argilosos. Por outro lado, aquele solo apresentou os menores valores de θ_s e θ_r , já indicando um maior potencial de lixiviação de solutos.

Na tabela 5 são apresentados os valores médios das concentrações de nitrato calculados pelo modelo Hydrus 1-D, os valores das concentrações observados nas colunas experimentais de Jankosz (2008), bem como o erro relativo (ER) entre ambos.

Tabela 5 - Médias das concentrações de nitrato observadas (experimento) e calculadas (Hydrus 1-D) no lixiviado, e erro relativo

Tratamento / Solo	Concentração de N-NO_3^- (mg L^{-1})		Erro Relativo ER (%)
	Experimento	Modelo Hydrus 1-D	
Test. / LV-L	1,38	1,35	2,17
NV1 / LV-L	1,35	1,25	7,41
NV2 / LV-L	1,28	1,37	-7,03
NV3 / LV-L	1,57	1,51	3,82
Test. / LVA-C	0,46	0,55	-19,57
NV1 / LVA-C	0,68	0,65	4,41
NV2 / LVA-C	0,48	0,53	-10,42
NV3 / LVA-C	0,54	0,54	0,00
Test. / LV-P	1,36	1,19	12,50
NV1 / LV-P	1,62	1,51	6,79
NV2 / LV-P	1,84	2,15	-16,85
NV3 / LV-P	2,31	2,47	-6,93
		Média	-1,97

De acordo com a tabela 5, o erro relativo entre as concentrações observadas e calculadas de nitrato variou de -19,57% a +7,41%, com um erro médio de -1,97%, o qual é considerado

pequeno (GARG; CHAUBEY; HAGGARD, 2003).

A figura 1 apresenta os valores médios das concentrações de nitrato no lixiviado calculadas pelo modelo Hydrus 1-D e os observados no experimento de Jankosz (2008), nas 12 combinações de solos e tratamentos de lodo analisados. Observa-se que houve um bom ajuste visual entre os valores observados e calculados pelo modelo, com um coeficiente de determinação de $R^2=0,96$, considerado alto (JAMES; BURGESS, 1982).

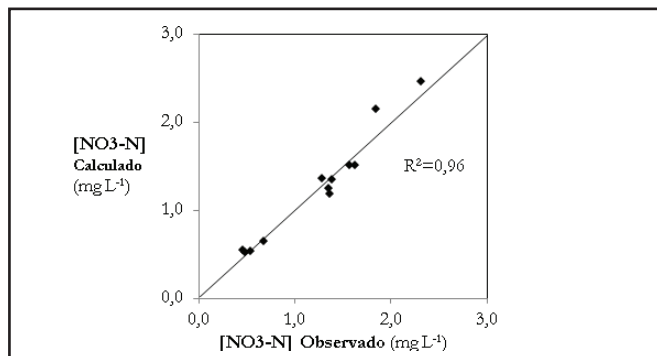


Figura 1 - Valores observados e calculados da concentração de nitrato no lixiviado, nas diferentes combinações de solos e tratamentos estudados

O coeficiente de Nash-Sutcliffe, obtido entre os valores médios calculados (modelo) e observados (experimento) de concentração de nitrato, apresentados na tabela 5, foi de $E = 0,95$, que é considerado *alto* por Nash e Sutcliffe (1970).

Todos os três critérios de acurácia aplicados ao modelo Hydrus 1-D no presente estudo, ou seja, $|ER| < 20\%$; $E > 0$, $R^2 > 0,50$ e pontos bem ajustados ao longo da linha 1:1, foram atendidos no presente estudo, resultando numa acurácia global *muito alta*.

Apesar de ter havido uma ligeira subestimativa nas concentrações de nitrato calculadas pelo modelo, indicada pelo erro relativo médio de $-1,97\%$, a pequena dispersão dos pontos ao longo da linha ideal, somada ao alto valor dos indicadores E e R^2 , indica que o modelo foi capaz de prever adequadamente o processo de lixiviação do nitrato, em todas as doses de N aplicadas e nos três tipos de solos estudados.

Alguns erros individuais elevados (negativos ou positivos), observados na tabela 5, podem ter resultado da alta variabilidade ou de erro experimental nas colunas de solo, em laboratório; do processo de calibração; ou de limitações intrínsecas do modelo (CHAVES; NEARING, 1991).

Entretanto, a primeira hipótese parece ser a mais provável, uma vez que um coeficiente de variação médio de 30% foi observado na condutividade saturada (K_s) das 48 colunas no laboratório, fato que pode ter levado a uma alta variabilidade nos valores observados dos lixiviados, conforme reportaram Hansen et al. (1999) para um estudo semelhante.

Tomando-se o Latossolo de Londrina (LV-L) como exemplo, observa-se pela tabela 5 que o valor experimental para a dose intermediária de lodo (NV2) resultou numa concentração menor de nitrato do que na dose imediatamente inferior (NV1), ou seja, 1,28 *versus* 1,35 mg L^{-1} , respectivamente.

O modelo Hydrus 1-D, por outro lado, calculou um

valor de concentração proporcional à dose de lodo aplicada para o tratamento NV2 (1,37 mg L^{-1}). Este possível erro experimental resultou num erro relativo de $ER = -7,03\%$, contribuindo para o aumento do erro médio global.

Os coeficientes de determinação entre os valores observados e calculados das concentrações de nitrato lixiviado obtidos por Darby e Nasser (2006), Shekofteh et al. (2013) e Tafteh e Sepaskhah (2012) foram de $R^2 = 0,90$, $R^2 = 0,97$ e $R^2 = 0,99$, ou seja, semelhantes ao obtido no presente estudo ($R^2 = 0,96$). Entretanto, aqueles autores não utilizaram outros indicadores de acurácia, como o de James e Burgess (1982) e o de Nash e Sutcliffe (1970).

Apesar da elevada acurácia global do modelo Hydrus 1-D no presente trabalho, estudos complementares são necessários para validá-lo em outras condições de solo, de uso e manejo típicas do Brasil.

CONCLUSÕES

Tendo o presente trabalho objetivado avaliar a acurácia global do modelo Hydrus 1-D na simulação do processo de lixiviação de nitrato em colunas contendo três solos distintos, resultante da aplicação de quatro doses de lodo de esgoto tratado, concluiu-se que:

- O erro relativo médio entre os valores de concentração de nitrato no lixiviado calculados pelo modelo e aqueles medidos em colunas experimentais de solo no laboratório foi baixo ($-1,97\%$);
- O coeficiente de determinação entre os valores calculados pelo modelo e aqueles observados foi de $R^2 = 0,96$, com uma boa aderência dos dados à linha 1:1;
- O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe entre os valores observados e calculados foi elevado ($E = 0,95$);
- Os três critérios acima indicam que o modelo Hydrus 1-D apresenta uma acurácia global muito alta na predição do processo de lixiviação de nitrato em colunas de solo, considerando os tratamentos e solos avaliados, podendo ser uma ferramenta útil no processo de tomada de decisão da aplicação de lodo de esgoto tratado em solos agrícolas e florestais;
- A acurácia do modelo Hydrus 1-D no presente estudo foi comparável àquelas de outros trabalhos recentes da literatura;
- Entretanto, para que o modelo seja validado de forma mais ampla nas condições brasileiras, estudos complementares devem ser realizados.

REFERÊNCIAS

- ALMASRI, M. N.; KALUARACHCHI, J. J. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. *J. Hydrol.*, v. 343, n. 3-4, p. 211-229, Sept. 2007.
- BARRETT, J. H.; PARSLow, R. C.; MCKINNEY, P. A.; LAW, G. R.; FORMAN, D. Nitrate in drinking water and the incidence

of gastric, esophageal, and brain cancer in Yorkshire, England. *Cancer Causes Control*, v. 9, n. 2, p. 153-159, Mar. 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 375*. Brasília, 2006.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 32, n. 4, p. 1389-1397, 2008.

CHAVES, H. M. L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do solo em diferentes texturas. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 14, n. 2, p. 33-37, abr./jun. 2009.

CHAVES, H. M. L.; NEARING, M. A. Uncertainty analysis of the WEPP soil erosion model. *Transactions ASAE*, v. 34, n. 6, p. 2437-2444, Nov.-Dec. 1991.

CREVOISIER D.; POPOVA Z.; MAILHOL, J. C. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agric. Water Manag.*, v. 95, n. 4, p. 354-366, Apr. 2008.

DARBY, A.; NASSER G. A. Nitrate leaching through unsaturated soil columns: Comparison between numerical & analytical solutions. *J. Appl. Sci.*, v. 6, n. 4, p. 735-743, 2006.

GARG, V.; CHAUBEY, I.; HAGGARD, B. E. Impact of calibration watershed on runoff model accuracy. *Transactions ASAE*, v. 46, n. 5, p. 1347-1353, 2003.

HALLBERG, G. R. Nitrate in groundwater in the United States. In: FOLLET, R. F. *Nitrogen management and groundwater protection*. Washington: EPA, 1989. p. 35-74.

HANSEN, S.; THOERSEN, M.; PEBESMA, F. J.; KLEESCHULTE, S.; SVENDSEN, H. Uncertainty in simulated nitrate leaching due to uncertainty in input data: a case study. *Soil Use Manag.*, v. 15, n. 3, p. 168-175, Sept. 1999.

JAMES, L. D.; BURGESS, S. J. Selection, calibration, and testing of hydrological models. In: HANN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. (Ed.). *Hydrologic modeling of small watersheds*. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 437-472. (ASAE monograph, no 5).

JANKOSZ, A. V. *Calibração e validação do modelo matemático Hydrus-1D através de colunas de solo em laboratório*. 2008. 89 p. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions ASAE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles. *J. Hydrol.*, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.

POWER, J. F.; SHEPERS, J. S. Nitrate contamination of groundwater in North America. *Agric. Ecosys. Environ.*, v. 26, n. 3-4, p. 165-187, Oct. 1989.

SHEKOFTEH, H.; AFYUNI, M.; HAJABBASI, M. A.; IVERSEN, B. V.; POUR, H. N.; ABASSI, F.; SHEIKHOLESMA, F.; SHIRANI, H. Modeling of nitrate leaching from a potato field using Hydrus 2-D. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v. 44, n. 20, p. 1-15, 2013.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. *The Hydrus 1-D Software Package Manual, v. 3.0*. California: University of California, Riverside, 2005.

SPALDING, R. F.; EXNER, M. E. Occurrence of nitrate in groundwater – a review. *J. Environ. Qual.*, v. 22, p. 393-402, July-Sept. 1993.

TAFTEH, A.; SEPASKHAH, A. R. Application of Hydrus 1-D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agric. Water Manag.*, v. 113, p. 19-29, Oct. 2012.

US-EPA - Environmental Protection Agency. *Health. Health effects of land application of municipal sludge*. Washington: EPA, 1986. (EPA/600/S1/-85/015).

US-EPA - Environmental Protection Agency. *Biosolids-Technology fact sheet: alkaline stabilization of biosolids*. Washington: EPA, 2000. (EPF 832-F-00-052).

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept.-Oct. 1980.

WOLFE, A. H.; PATZ, J. A. Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications. *Ambio*, v. 31, n. 2, p. 120-125, Mar. 2002.

Contribuição dos autores:

Henrique Marinho Leite Chaves – realizou as simulações computacionais com o modelo Hydrus, analisou os resultados e escreveu o artigo.

Andrea Valente Jankosz – realizou o experimento laboratorial, e analisou os resultados

Luis Antonio Correa Lucchesi – elaborou o delineamento experimental, e estabeleceu as doses de nitrato do experimento
Paulo Marques – auxiliou na montagem do experimento laboratorial.