**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em
condições de solo salino**

Rafaelly Suzanye da Silva Santos

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas**

**Piracicaba
2014**

Rafaelly Suzanye da Silva Santos
Engenheiro Agrônomo

Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2014**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Santos, Rafaelly Suzanye da Silva

Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino / Rafaelly Suzanye da Silva Santos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014. 132 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Modelagem numérica 2. Fertirrigação 3. Fluxo de água no solo 4. Transporte de solutos 5. Potássio I. Título

CDD 631.416
S237s

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico,

À minha mãe, pelo apoio, ensinamentos, compreensão, bravura e discernimento e ao meu pai (*in memoriam*) pelo exemplo de perseverança, e por todo o carinho e amor;

Aos meus irmãos Raulinson Bartolomeu da Silva Santos e Rudyson Ric da Silva Santos;

A todos os familiares e amigos que auxiliaram na minha conduta e contribuíram no meu desenvolvimento e crescimento pessoal.

AGRADECIMENTOS

A Deus nosso pai e mestre, pelas oportunidades, dificuldades e superações, pelo apoio constante ao longo dessa jornada;

A Jarbas Honório de Miranda pela orientação, amizade e apoio durante todo o curso;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de estudos;

À UFERSA, juntamente com o projeto PROCAD, financiado pela CAPES, pelo apoio ao experimento, pela oportunidade e espaços oferecidos;

Aos professores Nildo da Silva Dias, Sérgio Nascimento Duarte, José Francismar de Medeiros, por todo auxílio e co-orientação no desenvolvimento e realização do experimento;

Aos meus pais, Raimundo dos Santos (in memoriam) e Maria Elza da Silva Santos, por esforços, apoio, compreensão e incentivo.

Aos familiares, em especial, meus irmãos queridos Raulinson e Ric, pelo acolhimento, encorajamento diante os desafios, pelas horas de dedicação e auxílio extracurricular;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Batista Grigolon, Antônio Agostinho Gozzo (Seo Antônio), Ângela Márcia Derigi Silva, Davilmar Aparecida Colevatti, Hélio de Toledo Gomes, Luiz Custódio Camargo, Yvan Jaoude, em especial Paula Bonassa (Paulinha) por me aturar em tantos momentos, aconselhar e auxiliar mesmo à distância;

À Paulinha (Ana Paula Damasceno) pela companhia, conselhos, companheirismo e principalmente por compartilhar junto a mim toda esta trajetória acadêmica;

A todos os pós-graduandos que tive o prazer de conviver, em especial, Conan Salvador e Livia Previatello por tantos momentos de alegria, descontração e desabafo. A

todos que conheci durante o curso, Everaldo da Silva, Carlos José, Renato Moreira, Ana Carolina Santos, Ana Faraco, Rejane Frizzarin, Marina Carboni, Bruno Marçal, Bruna Botin, Jefferson Vieira e outros que não foram mencionados;

Às amigas, de Acari, Meiriane, Thalita e Kelly pelas conversas, conselhos, ajuda, solidariedade e bons momentos;

Aos amigos, em Mossoró, Rosemeire Matias, Gescyka Meira, Safira Yara, Tayse Palitot, Virgínio Neto, Jadson Holanda, Tarcísio Filho, Juliano Barbosa, Odelíria Filgueira (Galega), Lídia Teles, em especial à Werona Barbosa, por me aguentar, sendo sempre amiga e companheira quando necessário;

A Marcus Vinícius por ter acreditado, apoiado, e dado suporte em tantos momentos;

A todos que de alguma forma, diretamente ou indiretamente, seja com palavras de incentivo ou de encorajamento contribuíram para a execução deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Muito Obrigada!

“Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um campeão sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os campeões crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias.”

(Roberto Shinyashiki)

“Eu acredito demais na sorte. E tenho constatado que, quanto mais duro eu trabalho, mais sorte eu tenho.”

(Thomas Jefferson)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Semiárido do Nordeste Brasileiro	23
2.2 Salinização dos solos	24
2.3 Fertirrigação	25
2.4 Importância do potássio para as culturas	27
2.5 Dinâmica do íon potássio no solo	28
2.6 Dinâmica de solutos e transporte de solutos no solo	29
2.6.1 Aplicação da modelagem matemática	29
2.6.2 Modelo RETC	31
2.6.3 Modelo STANMOD	32
2.6.4 Modelo HYDRUS-1D	33
2.7 Parâmetros de transporte de solutos no solo	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Coleta e caracterização do material de solo	39
3.2 Elaboração das curvas de distribuição de efluentes	41
3.3 Análise química dos efluentes e ajuste numérico dos dados	44
3.4 Ensaio experimental em coluna segmentada	45
3.5 Informações computacionais para as simulações	48
3.5.1 Entrada de dados para o modelo RETC	48
3.5.2 Entrada de dados para o modelo STANMOD	48
3.5.3 Entrada de dados para o modelo HYDRUS-1D	49
3.6 Comparação entre valores simulados e observados (Análise de Desempenho)	50
3.7 Análise de sensibilidade	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Curvas de distribuição de efluentes	53
4.2 Concentração de potássio e umidade do solo ao longo da coluna segmentada	64
4.3 Simulações pelo modelo HYDRUS-1D no deslocamento de potássio e água	68

4.4 Desempenho do modelo	72
4.5 Análise de sensibilidade do modelo	74
5 CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS	101
ANEXOS	109

RESUMO

Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino

A demanda alimentar vem aumentando de acordo com o crescimento populacional e com isso há uma necessidade de que as práticas agrícolas tornem-se cada vez mais intensas e tecnificadas, mediante o incremento, entre outros, da utilização de insumos químicos. Porém, uma vez aplicados de maneira desorganizada, sem a devida preocupação com os possíveis impactos aos recursos naturais, tais produtos podem vir a provocar danos ao solo, contaminação de águas subterrâneas (mediante sua lixiviação) e em alguns casos, podem ser responsáveis pelo aumento da salinidade em alguns solos da região do semiárido do nordeste brasileiro. Nesse sentido, devido ao fato de envolverem processos físicos na natureza, o estudo da dinâmica desses produtos químicos têm motivado diversos pesquisadores a aplicarem ferramentas matemáticas (modelos matemáticos) na área de engenharia de água e solo, buscando entender a correlação entre a dinâmica da água e o movimento de solutos no perfil do solo. Portanto, a presente pesquisa tem como objetivo a aplicação do modelo matemático HYDRUS-1D para a simulação do movimento da água e do íon potássio, em condições de laboratório, utilizando-se colunas preenchidas com dois tipos de material de solos salinos e não saturados: Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2). Além disso, buscou-se também avaliar tanto o desempenho do referido modelo, em condições salinas, quanto proceder a uma análise de sensibilidade. Para alcançar tais objetivos, foram conduzidas as seguintes etapas: 1) elaboração de curvas de distribuição de efluentes (*Breakthrough Curves* - BTC) para obtenção dos parâmetros de transporte do íon potássio, com a aplicação de soluções de 1000 ppm, 2000 ppm e 3000 ppm de concentração de potássio, nos dois tipos de solos salinos, 2) Aplicação dessas soluções de potássio na coluna preenchida com o mesmo material de solo salino não saturado, 3) Simulação dos perfis de água e potássio para os diferentes materiais de solo salino pelo modelo HYDRUS-1D e 4) Avaliação de desempenho e análise de sensibilidade do modelo HYDRUS-1D. A avaliação de desempenho foi feita levando-se em conta os seguintes índices estatísticos: erro máximo, erro absoluto médio, raiz quadrada do erro médio normalizado, coeficiente de massa residual, coeficiente de determinação, eficiência e índice de concordância de Willmott e a análise de sensibilidade foi feita mediante a determinação do erro padrão, por meio de variações positivas (+ 10%, + 20%, + 30%, + 40%, + 50%) e negativas (- 10%, - 20%, - 10%, - 40%, - 50%), dos valores de: umidade volumétrica do solo saturado, condutividade hidráulica e os parâmetros n e α do modelo de van Genuchten (1980). Diante dos resultados obtidos, pôde-se perceber que os procedimentos experimentais (BTC's) para a estimativa dos parâmetros de transporte do íon potássio em condições de solo salino, foram suficientes para descrever a movimentação do íon potássio no solo, gerando informações de entrada precisas para os modelos de simulação. Em termos do modelo HYDRUS-1D, observou-se que o deslocamento do íon potássio acompanhou a frente de molhamento e que o modelo foi eficiente nas simulações de deslocamento do íon potássio e da água para ambos os solos, em condições salinas. A análise de sensibilidade evidenciou que o modelo apresentou-se sensível, às variações negativas dos dados de entrada: umidade volumétrica do solo saturado, condutividade hidráulica do solo saturado e parâmetros " n " e " α " do modelo de van Genuchten (1980).

Palavras-chave: Modelagem numérica; Fertirrigação; Fluxo de água no solo; Transporte de solutos

ABSTRACT

Dynamic simulations of potassium transport under saline soil conditions using HYDRUS-1D

The increased demand for food due to population growth requires that agricultural practices become increasingly intensive and very technical, including the increased use of agricultural chemicals (fertilizers). If improperly applied without considering possible impacts on natural resources, agricultural chemicals may lead to soil and groundwater contamination through their leaching from the soil root zone. They may be responsible also for increased salinity in some soils of semiarid regions in northeastern Brazil. Since many transient physical and chemical processes affect their transport in the subsurface, mathematical models have become popular tools in soil and water engineering and management in order to understand the correlation between water dynamics and solute movement in soils. Thus, this research aimed at using the HYDRUS-1D software package to simulate water and potassium movement, under laboratory conditions, in unsaturated saline soil columns filled with two soil types: an Ultisol (S1) and an Oxisol (S2). Comparisons were made with experimental data while also a sensitivity analysis was carried out to evaluate the effect of various parameters on solute transport under saline conditions. For this purpose the following studies were performed: 1) Measurement of solute breakthrough curves (BTCs) to estimate the transport parameters of the potassium ion by applying potassium solutions of 1,000 ppm, 2,000 ppm and 3,000 ppm to both soil types, 2) Application of similar potassium solutions to columns containing the same saline unsaturated soils, 3) Simulation of water and potassium distributions for different saline soil materials using HYDRUS-1D, and 4) Performance evaluation and sensitivity analyses of the HYDRUS-1D numerical model. The performance evaluation was conducted using the following statistical indices: maximum error, mean absolute error, normalized root mean square error, coefficient of residual mass, coefficient of determination, efficiency and Willmott's concordance index. The sensitivity analyses considered standard deviations resulting from positive and negative changes (+ 10% + 20% + 30% + 40% + 50%) (-10%, -20%, -10%, -40%, -50%) in the values of the saturated volumetric soil moisture content, the saturated hydraulic conductivity, and the parameters n and α of van Genuchten's (1980) model for the unsaturated soil hydraulic functions. Results indicate that the experimental procedures (BTCs) for estimating the transport parameters of potassium for saline soil conditions were sufficient to describe potassium ion transport in the soils by generating the required input information for the simulation models. Relative to HYDRUS-1D model, the displacement of potassium was found to follow closely the wetting front, with the model providing a very efficient means for simulating the movement of both water and potassium in the two soils during saline conditions. The sensitivity analysis showed that the model was relatively sensitive to negative variations of the input data, notably the saturated water content, the saturated hydraulic conductivity, and the n and α soil hydraulic parameters.

Keywords: Numerical modeling; Fertigation; Soil water flow; Solute transport

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Procedimento de coleta do material de solo, com abertura das trincheiras (a) e medição da camada de interesse do solo (b).	40
Figura 2: Procedimento de saturação ascendente do solo para elaboração das curvas de distribuição de efluentes para o íon potássio.	42
Figura 3: Esquema montado em laboratório para elaboração das curvas de distribuição de efluentes, para o íon potássio, em condições salinas, visando a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos: coeficiente de dispersão (D), dispersividade (λ) e o fator de retardamento (R) (SILVA, 2013).	43
Figura 4: Esquema ilustrativo montado em laboratório para elaboração dos perfis de teores de água e solutos em coluna segmentada (PINHO, 2009).	46
Figura 5: Detalhes do preenchimento e da montagem das colunas segmentadas.	46
Figura 6: Curvas de distribuição de potássio (KCl), para a concentração de 1000 ppm, ajustadas pelo modelo STANMOD, para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (em que C/Co é a concentração relativa).	54
Figura 7: Curvas de distribuição de potássio (KCl), para a concentração de 2000 ppm, ajustadas pelo modelo STANMOD, para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (em que C/Co é a concentração relativa).	58
Figura 8: Curvas de distribuição de potássio (KCl), para a concentração de 3000 ppm, ajustadas pelo modelo STANMOD para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (em que C/Co é a concentração relativa).	61
Figura 9: Concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, ao longo da coluna segmentada, em três repetições, preenchidas com solo não saturado (S1), diante da aplicação de KCl com 1000, 2000 e 3000 ppm de potássio.	65
Figura 10: Concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, ao longo da coluna segmentada, em três repetições, preenchidas com solo não saturado (S2), diante da aplicação de KCl com 1000, 2000 e 3000 ppm de potássio.	67
Figura 11: Simulação dos perfis de concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, pelo modelo HYDRUS-1D, para o solo S1 (Argissolo Amarelo), comparada com a média das três repetições, para os tratamentos 1000, 2000 e 3000 ppm de concentração de potássio.	69
Figura 12: Simulação dos perfis de concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, pelo modelo HYDRUS-1D, para o solo S2 (Latosolo Vermelho Amarelo),	

comparada com a média das três repetições, para os tratamentos 1000, 2000 e 3000 ppm de concentração de potássio..... 71

Figura 13: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na umidade volumétrica do solo saturado para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm. 75

Figura 14: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro de entrada umidade volumétrica do solo saturado..... 77

Figura 15: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na umidade volumétrica do solo saturado para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm..... 78

Figura 16: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro de entrada umidade volumétrica do solo saturado..... 79

Figura 17: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na condutividade hidráulica do solo, para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm..... 81

Figura 18: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro condutividade hidráulica do solo. 82

Figura 19: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na condutividade hidráulica do solo para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm. 84

- Figura 20: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro condutividade hidráulica do solo. 85
- Figura 21: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm. 87
- Figura 22: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980). 88
- Figura 23: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm. 90
- Figura 24: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980). 91
- Figura 25: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm. 93
- Figura 26: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980). 94
- Figura 27: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “ α ” da equação de van

Genuchten para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm..... 96

Figura 28: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980). 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análises físicas para os solos: ArgilosoAmarelo (S1) e LatossoloVermelho Amarelo (S2), realizada no Laboratório de Solos-UFERSA	40
Tabela 2: Análise química para os solos: ArgilosoAmarelo (S1) e LatossoloVermelho Amarelo (S2), realizada no Laboratório de Solos-UFERSA	40
Tabela 3: Parâmetros da curva de retenção de água para os dois solos estudados: Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2).....	48
Tabela 4: Parâmetros de transporte de potássio para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) na concentração de 1000 ppm.	56
Tabela 5: Parâmetros de transporte de potássio para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) na concentração de 2000 ppm.	59
Tabela 6: Parâmetros de transporte de potássio para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) na concentração de 3000 ppm.	62
Tabela 7: Índices estatísticos para comparação entre os valores de teor de água e solutos simulados pelo modelo HYDRUS-1D e obtidos experimentalmente, para as diferentes concentrações de Potássio (1000; 2000 e 3000 ppm).	73

1 INTRODUÇÃO

A região semiárida é caracterizada por longos períodos de estiagem, na qual a disponibilidade das águas superficiais pode diminuir ou até mesmo se extinguir, tornando necessária, na maioria das vezes, a utilização de águas subterrâneas. Cabe-se ressaltar que mesmo com o baixo índice pluviométrico da região ainda existem aquíferos em quase sua totalidade, porém aqueles mais superficiais, comumente são compostos por águas salinas. Tendo em vista a busca e manutenção de uma produção agrícola consciente e sustentável, torna-se necessário o uso de práticas de irrigação diferenciadas, onde o consumo de água seja minimizado e o mais eficiente possível. Com isso, o uso da fertirrigação tem se tornado uma prática comum na região.

Apesar da eficiência da aplicação de fertilizantes pela fertirrigação, o uso inadequado de insumos, de uma maneira geral, pode causar danos às plantas e contaminar águas subterrâneas mediante a sua lixiviação. Sendo assim, o conhecimento da dinâmica dos fertilizantes nos solos, facilita a racionalização de sua aplicação e busca amenizar os problemas causados pelo seu excesso. Sabe-se ainda que os produtos químicos encontram-se entre os maiores poluidores ambientais, por contaminar tanto a superfície dos solos, quanto as fontes de água, além das perdas econômicas ligadas à sua dinâmica no solo, fora do alcance da zona radicular.

Os solutos são transportados no solo pelas chuvas ou água da irrigação, com isso o cuidado com a qualidade da água utilizada na produção agrícola é essencial. A solução no solo movimenta-se por infiltração ou escoamento superficial, podendo carrear substâncias químicas até horizontes mais profundos. Os solutos no solo encontram-se nos estados associados, formando compostos, e dissociados, na forma de íons positivos e negativos. No estado associado os solutos formam os sais, sendo os mais presentes nos solos salinos os NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 , Na_2SO_4 e MgSO_4 . A contaminação dos reservatórios de água subterrânea e a salinização gradual dos solos são resultantes dos incrementos de lâminas de irrigação em locais onde a drenagem é ineficiente.

Apesar da importância das pesquisas que avaliem o impacto desta contaminação às águas subterrâneas, elas ainda são escassas no Brasil. Assim, a preocupação com o destino destes contaminantes e a motivação da problemática envolvida, despertaram em diversos pesquisadores o anseio de desenvolverem modelos teóricos, com o objetivo de descrever os processos físicos envolvidos no transporte destes contaminantes no perfil do solo. O conhecimento das interações e propriedades das substâncias químicas com o meio, e, da

movimentação e persistência no solo, possibilitam um manejo eficiente, com objetivo de manter e disponibilizar os nutrientes na zona radicular. A aplicação de modelos físico-matemáticos para descrever e explicar o transporte dos solutos no solo é uma valiosa ferramenta, e sua utilização tem se tornado desejável, tendo em vista o número de variáveis que envolvem o transporte de solutos no solo, por ser mais rápido e preciso, permitindo que um grande número de fatores e efeitos seja contabilizado (MIRANDA, 2001).

O uso dos modelos já desenvolvidos, em diferentes condições de laboratório e de campo, possibilita melhorias nas rotinas computacionais, fornecendo informações acerca do processo para os quais os modelos podem ser aplicados com confiança. É proposta a utilização do HYDRUS-1D para descrição do transporte dos solutos no solo, pois resolve a problemática nos aspectos físico e químico de forma integrada. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo a aplicação do modelo HYDRUS-1D para simulação de perfis de umidade do solo e de concentrações de potássio, em diferentes solos salinos, do semiárido do nordeste brasileiro (Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo), acondicionados em colunas de solo não saturado (preparadas em laboratório), bem como, realizar uma análise de desempenho e sensibilidade do modelo HYDRUS-1D, aplicado nessas condições de solo salino.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Semiárido do Nordeste Brasileiro

A expressão semiárida normalmente é utilizada para descrever o clima e regiões onde ocorrem baixas precipitações médias anuais e cuja vegetação é composta prioritariamente por arbustos que perdem suas folhas em meses mais secos ou por pastagens que secam na época de estiagem (CIRILO, 2008).

Uma parte significativa do Nordeste brasileiro é considerada como sendo semiárida, com evaporação média anual superior a 2.000 mm, temperatura média elevada (23 a 27 °C), com amplitude térmica anual em torno de 5°C, grande insolação (média de 2.880 h ano⁻¹) e precipitações pluviais bastante irregulares, em torno de 500 a 600 mm ano⁻¹, tendo assim poucas opções agrícolas rentáveis, que sustentem os produtores nas áreas rurais (SUDENE, 1996).

O semiárido brasileiro é uma área geográfica onde as chuvas são bastante irregulares e os solos são geralmente rasos, com deficiência hídrica e alta concentração de sais, com cobertura vegetal escassa e espaçada, caracterizando o predomínio de espécies xerófilas (CONTI, 1997). Essas características acarretam longos períodos de seca. Responsável por cerca de quase 11% do território brasileiro e com área de superior a 900 mil km², o semiárido brasileiro abrange os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e norte de Minas Gerais (MDS, 2014).

No semiárido do nordeste brasileiro, onde a precipitação pluviométrica anual varia de 300 a 800 mm com chuvas distribuídas geralmente durante o período de três meses, ocorre evapotranspiração excedente e as plantas sofrem déficit hídrico; desta forma, a irrigação se torna na prática mais segura para garantir a produção agrícola na região (NOGUEIRA, 2011).

O solo do semiárido, por ser muito raso, não consegue armazenar essa água, sendo esse espessamento rochoso denominado de cristalino. A água da chuva infiltra-se no solo, encontra o cristalino, escoar e é drenada rapidamente para os córregos e rios que se enchem e secam em pouco intervalo de tempo (MDS, 2014).

Os solos que ocorrem com maior abrangência nas regiões semiáridas são os Latossolos, os Argissolos, os Neossolos Quartzarênicos e Litólicos, os Planossolos e os Vertissolos (EMBRAPA, 2005). De acordo com Sumner (1995), vários solos que ocorrem em climas semiáridos apresentam quantidades apreciáveis de minerais intemperizáveis (feldspatos, hornblendas, plagioclásios, calcita e gipsita), os quais podem manter altas

atividades de íons cálcio, magnésio e sódio em solução. Além desses fatores, têm-se ainda a alta taxa de evapotranspiração e a presença de aquíferos subterrâneos com água enriquecida por sais (RICHARDS, 1954; SZABOLCS, 1995). Portanto, a identificação da mineralogia é importante, pois alguns solos têm em sua constituição elementos que podem contribuir com a salinização e, ou, alcalinização do solo, com fundamental importância para o entendimento deste processo que mantém um estreito relacionamento com a sustentabilidade agrícola.

2.2 Salinização dos solos

O problema da salinidade ocorre com mais frequência em regiões áridas e semiáridas, como é o caso do nordeste brasileiro, pois a lixiviação e o transporte de sais solúveis são restritos devido às baixas precipitações e às altas taxas de evaporação, sendo esse processo acelerado, usualmente, pelas irrigações irracionais e pela drenagem natural deficiente (GHEYI, 2000).

Apesar da fonte principal e direta dos sais ser o intemperismo, os problemas de salinidade geralmente estão associados à utilização da irrigação, à drenagem deficiente e a presença de águas sub-superficiais ricas em sais. Conhecida como salinização secundária, por ser provocada por interferência antrópica, esta ainda é agravada pelo uso de fertilizantes com altos índices salinos (DIAS, 2004). Silva (2002) atribui como uma das principais causas da salinização em ambientes protegidos, a fertirrigação, pela utilização em excesso de fertilizantes de altos índices salinos, aplicados para a nutrição das plantas.

Os sais da água com alta salinidade podem acumular-se no solo, prejudicando o desenvolvimento e produção das culturas. Os efeitos negativos da salinização no solo são o aumento da densidade aparente e da retenção de água no solo, devido à redução da macroporosidade, desestruturação, devido às interações eletroquímicas entre os cátions e argila promovendo a dispersão das argilas e redução da infiltração de água pelo excesso de íons sódicos (RHOADES *et al.*, 2000). Os principais cátions responsáveis por essa dispersão de partículas, quando estão em excesso, são o sódio, lítio, magnésio e potássio sendo mais comum o sódio, por isso na avaliação de um solo são analisados os teores relativos de sódio chamados de sodicidade (DIAS; BLANCO, 2010). A predominância de sódio em relação aos demais cátions no complexo de troca pode promover a dispersão e migração dos colóides no perfil do solo, com obstrução de poros, e reduzindo a movimentação de ar e água, dificultando o crescimento dos vegetais (FREIRE *et al.*, 2003).

A sodicidade refere-se à proporção de sódio trocável adsorvido em relação à capacidade de troca catiônica, expressa por porcentagem de sódio trocável (PST), não utilizando o valor absoluto de sódio trocável. A razão de adsorção de sódio do extrato de saturação (RAS_{es}), ou a PST são os principais parâmetros para avaliar o risco de sodificação do solo. A RAS da água de irrigação em conjunto e a concentração total de sais, expressa em condutividade elétrica (CE) são utilizadas comumente como índice para avaliar o risco de determinada água em proporcionar sodicidade ao solo, com a redução da capacidade de infiltração do solo e dispersão de argilas (PIZARRO, 1985; AYERS; WESTCOT, 1999).

Os solos sódicos podem ter a permeabilidade fortemente reduzida e ser de difícil preparação, porque certas reações físico-químicas associadas, em grande parte, a fração coloidal do solo, são manifestadas, principalmente, pela desestruturação dos agregados e dispersão dos argilo-minerais (RHOADES; KANDIAH; MASHALI, 1992), assim afetando a permeabilidade e condutividade hidráulica do solo que são os principais problemas em áreas irrigadas.

Em certos casos, alguns íons apresentam concentração elevada no solo causando perdas de rendimento à cultura por efeitos indiretos desses íons que passam a alterar o equilíbrio natural do solo, ou sofrer efeitos diretos destes íons quando a cultura passa a absorver em quantidade elevada junto com a solução do solo, ocasionando efeito tóxico causado pelos sais, principalmente nas folhas onde se pode destacar as bordas e o ápice. Os danos de toxidade geralmente são provocados pelos íons cloreto, sódio e boro podendo reduzir drasticamente a produção (DIAS; BLANCO, 2010).

2.3 Fertirrigação

A irrigação é apontada como sendo uma das alternativas para o desenvolvimento socioeconômico de regiões semiáridas, quando há disponibilidade de água, desde que seja manejada adequadamente, a fim de se evitar problemas de salinização e de degradação dos recursos hídricos e edáficos (SOUZA, 2000).

No Brasil, o uso da fertirrigação confunde-se com a história da irrigação por gotejamento, sendo introduzida no início da década de 70. Primeiramente, foi utilizada na aplicação de vinhaça na cultura de cana-de-açúcar, principalmente no Estado de São Paulo, e em meados dos anos 80 teve grande impulso pela expansão da irrigação por pivô central. Finalmente, a partir dos anos 90, a fertirrigação foi efetivamente adotada como uma prática eficiente de fornecimento de nutrientes as plantas, especialmente com o crescimento da

microirrigação no país (CARRIJO *et al.*, 1999).

A fertirrigação é o processo de aplicação de fertilizantes juntamente com a água de irrigação visando fornecer as quantidades de nutrientes requeridas pela cultura no momento adequado, buscando a obtenção de altos rendimentos e produtos de qualidade. Por meio da fertirrigação, há possibilidade de um ajuste mais eficiente às diferentes fases fenológicas das culturas resultando em uma maior eficiência de uso da água e economia de fertilizantes (CARRIJO *et al.*, 2004).

A principal vantagem da fertirrigação é o ganho de eficiência no uso dos fertilizantes, em razão da maior facilidade de parcelamento da adubação, que permite melhor ajuste no fornecimento de nutrientes com a demanda da planta, nos diferentes estádios de desenvolvimento. A fertirrigação contribui também para a redução das perdas por lixiviação (DUENHAS *et al.*, 2002).

Para Barros *et al.* (2010), quando se utiliza a fertirrigação, é importante acompanhar a dinâmica e a distribuição dos nutrientes no perfil do solo, pois isso permite estabelecer ou ajustar a aplicação dos fertilizantes, além de prevenir danos ambientais como a salinização dos solos e a contaminação das águas.

Para a seleção correta dos fertilizantes e a determinação das doses a serem aplicadas, é necessário um equilíbrio entre a quantidade de nutrientes e a quantidade de água a ser aplicada durante cada fase da cultura, ou seja, a concentração de fertilizantes na água de irrigação deve ser observada principalmente quanto à solubilidade e salinidade da solução (BLANCO; FOLEGATTI, 2002).

A fertirrigação em doses excessivas e a inexistência de chuvas promotoras de lixiviação do excesso dos sais tem como consequência a salinização dos solos, prejudicando o rendimento das culturas, dificultando o manejo e desenvolvimento (AYERS; WESTCOT, 1991). A salinização dos solos pode também originar-se da utilização de águas salinas na confecção das doses de fertirrigação, as águas podem ser oriundas de mananciais superficiais, como barragens, lagoas, rios ou poços.

O manejo da fertirrigação, normalmente, é efetuado ao ministrarem-se quantidades pré-estabelecidas de fertilizantes, parceladas de acordo com a marcha de absorção da cultura não existindo, comumente, monitoramento da concentração de íons na solução do solo nem do estado nutricional da planta (PAPADOPOULOS, 1999); neste contexto, seria mais adequado racionalizar o manejo da fertirrigação por meio da determinação da condutividade elétrica e/ou da concentração parcial de íons na solução do solo. Caso a condutividade elétrica da solução do solo apresentasse valores inferiores ao máximo tolerado pela cultura, sem

decréscimo no rendimento relativo, e superiores ao mínimo necessário para sua nutrição, a salinização estará controlada (BURGUEÑO, 1996).

2.4 Importância do potássio para as culturas

Nos solos tropicais, o potássio (K^+) é um dos nutrientes que mais limita a produção e geralmente aparece como nutriente obrigatório nas formulações de fertilizantes, respaldado pelo paradigma de que os teores trocáveis no solo são baixos. Assim, é necessário preservá-los com adubações potássicas para garantir o desenvolvimento das plantas (KAMINSKI *et al.*, 2007).

O potássio, dentre os macronutrientes, é o segundo elemento requerido em maiores quantidades pelas espécies de plantas cultivadas (NACHTIGALL; VAN RAIJ, 2005). Na planta, está envolvido no metabolismo do nitrogênio, transporte de açúcar, extração, transporte e uso da água e resistência ao estresse (KRAUSS, 2005).

Ele tem alta mobilidade na planta, em qualquer concentração, seja dentro da célula, no tecido vegetal, no xilema ou no floema. Esse nutriente não é metabolizado na planta e forma ligações com moléculas orgânicas de fácil reversibilidade, além de ser o íon mais abundante nas células vegetais (MARSCHNER, 1995).

Ele é bastante móvel no solo cujas principais funções estão ligadas a processos vitais, tais como: fotossíntese, translocação e balanço iônico (MARSCHNER, 1995). O fluxo de massa pode ter contribuição significativa no processo quando a concentração de K^+ na solução do solo é elevada (RUIZ *et al.*, 1999).

Na maioria dos casos, ele se movimenta com limitação no solo. Este movimento depende do tipo de solo, podendo ser lixiviado em solos arenosos e com baixa CTC. Porém, quando se aplicam doses normais de fertilizantes, as perdas por lixiviação são extremamente baixas para a maioria das condições.

Na planta, o potássio tem ação de catalisador de algumas reações enzimáticas, estando envolvido com a turgidez das células, abertura e fechamento dos estômatos, e no processo de síntese, acumulação e transporte de carboidratos. Teores adequados de potássio na planta podem aumentar a resistência ao armazenamento pós-colheita. Plantas com deficiência de potássio produzem frutos de pior qualidade, com menor teor de sólidos solúveis e mais azedos, com maturação desuniforme, ocos e com manchas esverdeadas na parte basal, o que também prejudica a maturação (CARRIJO *et al.*, 2004).

Participa direta e indiretamente de inúmeros processos bioquímicos envolvidos com o

metabolismo dos carboidratos, como a fotossíntese e respiração. Além de desempenhar a função de ativador de grande número de enzimas relacionadas com os processos de assimilação de CO₂ e de nitrogênio, ele tem ação na translocação e armazenamento de carboidratos (FAQUIN, 1994).

2.5 Dinâmica do íon potássio no solo

No processo de absorção, as interações catiônicas nos sítios de adsorção e a concentração de íons nutrientes na solução do solo, constituem aspectos de importância na nutrição das plantas e produção das culturas (KHASAWNEH, 1971). A taxa de absorção de um nutriente pela planta depende dos cátions dissolvidos na solução de solo em equilíbrio dinâmico com os cátions do complexo de troca (BULL, 1986). A absorção de um nutriente é afetada também pela natureza dos cátions complementares, isto é, há influência de um íon adsorvido sobre a liberação de um outro, para a solução do solo, a partir da superfície trocadora, além das relações que envolvem os cátions no solo (TISDALE *et al.*, 1985).

Na avaliação da capacidade potencial de fertilidade dos solos, devem ser ajustadas as relações entre cátions para a cultura, em vista das interações competitivas entre diferentes íons nutrientes que influem na disponibilidade e possibilidade de absorção da célula através da membrana (EPSTEIN, 1975).

O potássio do solo, por sua vez, é formado pelo K⁺ da solução, o K⁺ trocável, o K⁺ não trocável (fixado) e o K⁺ estrutural, e o suprimento de K⁺ para as plantas advém da solução e dos sítios de troca dos colóides do solo, que estão em equilíbrio com o K⁺ não trocável e com o K⁺ estrutural dos minerais (SPARKS; HUANG, 1985).

Segundo Malavolta (1980), é um macronutriente que tem caminamento no solo, predominantemente pelo processo de difusão. Porém, alta parcela desse nutriente pode movimentar-se no solo por fluxo de massa, desde que sejam aplicadas doses elevadas do elemento no solo (neste caso, alguma fração imobilizada do elemento é devida à adsorção à matriz do solo), de acordo com Malavolta (2005). No Brasil, a aplicação de potássio às culturas é feita quase que totalmente no plantio e/ou cobertura, em aplicação direta ao solo ou via fertirrigação. Algumas vezes, a aplicação é complementada com adubações foliares (ZANINI, 1991).

Zanini (1991) verificou que, de maneira geral, os locais de maiores concentrações de K⁺ coincidiram com os locais de maiores valores de umidade, evidenciando seu caminamento por fluxo de massa, concordando com Malavolta (1980), isto é, a distribuição

de potássio no solo correlacionou-se com a distribuição de água no solo, indicando que se pode ter elevado controle da localização desse íon no solo em função da fertirrigação e da irrigação.

No que diz respeito às propriedades químicas do solo serem importantes para determinar a mobilidade do potássio, Rivera *et al.* (2008) observaram que a distribuição do elemento é significativamente afetada pelas propriedades físico-hídricas do meio e pela taxa de aplicação de água no solo. Ao estudarem os fatores que afetam a lixiviação de potássio em diferentes solos, Alfaro *et al.* (2004), encontraram que as perdas eram dependentes das quantidades do elemento disponível no solo e que, embora estivessem relacionadas ao tipo de solo, a química não era tão importante em controlar a dinâmica da liberação do potássio tanto quanto as propriedades hidráulicas.

Em virtude da condição de salinização do solo, podem ocorrer desordens nutricionais, induzindo relações antagônicas entre nutrientes na planta, o que reduz significativamente os rendimentos das culturas (GRATTANS; GRIEVE, 1993). Essas interações também podem ocorrer entre os nutrientes na solução do solo, afetando a disponibilidade, quais sejam: antagonismo, inibição competitiva e inibição não competitiva, além de sinergismo (MALAVOLTA, 1987), o que pode causar uma dinâmica diferenciada entre cátions nas folhas e raízes das plantas. No entanto, pouco se conhece sobre as interações entre cátions causadas por doses em excesso de K_2O induzidas por diferentes fontes (KCl e K_2SO_4). O principal uso do cloreto de potássio é como fertilizante na agricultura sendo a principal fonte de utilização o cloreto de potássio seguido do sulfato de potássio em menor escala. O sulfato de potássio tem um efeito menos salino que o cloreto de potássio. Seu índice salino por unidade de K_2O é a metade do índice do cloreto de potássio, o que o torna mais indicado para solos com tendência à salinização (NOGUEIRA *et al.*, 2001).

2.6 Dinâmica de solutos e transporte de solutos no solo

2.6.1 Aplicação da modelagem matemática

Por meio do deslocamento de fluidos miscíveis em colunas de solo e de modelos físico-matemáticos é possível avaliar a mobilidade dos íons e moléculas no solo. Os dados experimentais provenientes de ensaios de lixiviação de íons em coluna de solo, em condições de laboratório ou de campo, se utilizados em modelos físico-matemáticos, resultantes de soluções de equação diferencial de transporte de solutos no solo, possibilitam a caracterização

da mobilidade dos solutos no solo com base nos processos de dispersão-difusão e no retardamento do avanço dos solutos em relação ao avanço da interface entre o líquido deslocador e o deslocado (FERREIRA, 2007).

Os modelos matemáticos são uma ferramenta importante na avaliação da adsorção e transporte dos íons (MAISEL; GNUGNOLI, 1972). Com auxílio de simulação, o modelo procura descrever o estado atual ou prever o comportamento futuro dos íons, estimando o potencial de contaminação de aquíferos subterrâneos, constituindo um critério mais seguro e confiável para o uso dos resíduos na agricultura.

Os métodos numéricos e analíticos, aliados à tecnologia dos novos computadores, têm possibilitado o desenvolvimento de modelos que descrevem, de forma mais efetiva, o transporte de solutos no solo. O uso de modelos tem como principal vantagem a economia de tempo e de capital investido, uma vez que experimentos de campo e laboratórios são, geralmente, laboriosos, caros e morosos (MARTINEZ *et al.*, 2010).

De forma geral, as equações desenvolvidas para os modelos matemáticos de transporte de solutos no solo têm sido utilizadas para: (a) avaliar o tempo necessário para que uma solução com determinada concentração atinja certa profundidade e (b) calcular a concentração na solução em dado tempo e profundidade, conhecendo-se a concentração no líquido de entrada (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2001).

Para que os modelos matemáticos, desenvolvidos para descrever o transporte de solutos no solo, possam obter sucesso, eles dependem, em grande parte, do grau de confiabilidade das variáveis de transporte envolvidas. De forma que, as variáveis relativas às características das colunas, como a taxa de avanço da solução deslocadora, a porosidade, a distância a ser percorrida (altura do solo na coluna) e o volume de poros aplicado possam influenciar sobremaneira a movimentação de solutos. Para Matos (1995), outros parâmetros importantes, como o coeficiente de dispersão-difusão e o fator de retardamento, devem também, necessariamente, ser determinados com exatidão. Tais parâmetros, por estarem intimamente relacionados com a interação solo-soluto, seriam fundamentais para estimar o deslocamento de solutos no solo.

Existe uma grande dificuldade em envolver todas as características pertinentes ao meio ambiente, a fim de se obter um modelo realmente capaz de prever o processo de deslocamento e retenção dos solutos ao meio. A presença de diferentes espécies de cátions na solução do solo proporciona competição entre eles pelos sítios de adsorção, favorecendo a lixiviação daqueles com menor energia de adsorção, o que constitui um alerta quanto ao perigo de contaminação dos mananciais de água subterrânea (COSTA *et al.*, 1999).

Pode-se constatar nos solos que, os solutos encontram-se nos estados associados, formando compostos, e dissociados, na forma de íons positivos e negativos. Em estado associado, os solutos combinam-se formando os sais. Os sais mais presentes nos solos salinos são: NaCl, CaCl₂, MgCl₂, Na₂SO₄ e MgSO₄ (MARTINEZ *et al*, 2010).

Diante disso, a utilização de modelos físico-matemáticos constitui-se em uma valiosa ferramenta no estudo do transporte de solutos no solo. Nesses modelos, procura-se tanto descrever o estado atual como prever o comportamento futuro do movimento dos solutos no perfil do solo. Assim, a modelagem permite compreender, dentre outros aspectos, a distribuição de nutrientes na solução do solo, a lixiviação de sais em solos salinos, além de possibilitar propor formas de reduzir a poluição das águas subterrâneas (MARTINEZ *et al*, 2010).

Tendo em vista o deslocamento e o movimento do potássio nos solos, a mobilidade deste íon tem sido estudada por diversos autores Silva (2009) avaliou a mobilidade do potássio em colunas de solo estruturado e desestruturado para dois tipos de solo do município de Viçosa-MG, Oliveira *et al*. (2004) observaram a mobilidade do potássio para cinco solos do Estado de Minas Gerais, variando a concentração deste e dos íons amônio e fosfato na solução deslocadora, porém os autores não observaram relação nítida entre as concentrações dos solutos e os parâmetros de transporte obtidos. Devido à falta de padronização da velocidade de escoamento das soluções aplicadas e nas colunas de solo, a comparação entre os resultados de diferentes trabalhos e tipos de solo torna-se um trabalho improvável.

2.6.2 Modelo RETC

O RETC (Retention Curve) é um modelo utilizado para ajustar numericamente os parâmetros da curva de retenção de água no solo, podendo ser utilizado para analisar a retenção de água no solo e as funções de condutividade hidráulica de solos saturados. Estas propriedades hidráulicas são parâmetros fundamentais em qualquer descrição quantitativa do fluxo de água para dentro e através da zona não saturada dos solos. Foi desenvolvido pela EPA (United States Environmental Protection Agency) para analisar a retenção de água no solo e condutividade hidráulica de solos não saturados.

Vários modelos analíticos são utilizados para estimar a retenção de água, condutividade hidráulica insaturada, ou difusividade de água no solo para um solo. O RETC utiliza os modelos paramétricos de Brooks-Corey (1964) e van Genuchten (1980) para representar a curva de retenção de água no solo e os modelos de distribuição de poros de

tamanho teóricos de Mualem (1976) e Burdine (1953) para prever a função condutividade hidráulica não saturada, a partir de dados observados de retenção de água do solo. O método de mínimos quadrados não linear do parâmetro otimizado é utilizado na estimativa dos coeficientes desconhecidos nos modelos hidráulicos. O modelo também permite que se encaixem funções analíticas simultaneamente aos dados observados de retenção de água e dados de condutividade hidráulica do solo.

2.6.3 Modelo STANMOD

Vários modelos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para descrever o transporte de solutos no solo (van GENUCHTEN e WIERENGA, 1986). O êxito dos modelos depende, portanto, da capacidade de quantificar os parâmetros de transporte de solutos no solo de acordo com as variáveis de entrada. Os parâmetros mais importantes são: o fluxo do fluido, o coeficiente de dispersão (D) e o fator de retardamento (R).

O STANMOD (Studio of Analytical Models) é um pacote de modelos para avaliar transporte de solutos em meios porosos utilizando soluções analíticas da equação de transporte de solutos de convecção-dispersão. O pacote inclui um software com versão modificada e atualizada do código CXTFIT de Toride *et al.* (1995) para estimar os parâmetros de transporte de solutos por intermédio de um método não-linear de otimização de parâmetros de mínimos quadrados, aplicado para a estimativa dos parâmetros a partir de concentrações observadas (problema inverso) ou para prever a concentração de solutos (problema direto), utilizando equações de convecção-dispersão como modelo de transporte, utilizando um método de otimização não linear (minimização da soma dos desvios) para a obtenção dos parâmetros. Há também um grande número de modelos incorporados a esse software, incluindo ainda os seguintes modelos para problemas de transporte unidimensionais: CFITM (VAN GENUCHTEN, 1980), CFITIM (VAN GENUCHTEN, 1981), CHAIN (KOOL; PARKER; VAN GENUCHTEN, 1985), 3DADE (LEIJ; BRADFORD, 1994) E N3DADE (LEIJ; TORIDE, 1997).

Visando a determinação, a partir dos modelos, para que se obtenha certa precisão do movimento de solutos no solo, é necessária a determinação de alguns parâmetros de transporte relativos a cada tipo de solo, tais como: o coeficiente de dispersão (D), a dispersividade (λ) e o fator de retardamento (R). Os parâmetros de transporte podem ser obtidos mediante o uso de softwares, dentre eles enquadra-se o STANMOD (ŠIMŮNEK *et al.*, 2008), o qual estima parâmetros de transporte de solutos por meio de concentrações

obtidas em laboratório (chamado de problema inverso) ou prediz as concentrações de solutos em condições de escoamento permanente (chamado de problema direto) usando para isso as equações de convecção-dispersão.

2.6.4 Modelo HYDRUS-1D

O modelo HYDRUS-1D, versão 3.0, desenvolvido por J. Šimůnek, M. Th. Van Genuchten e M. Sejna (2008), do Departamento de Ciências Ambientais da Universidade de Riverside Califórnia, Califórnia, é um “pacote computacional” utilizado para simular o movimento unidimensional de água, calor e solutos em um meio variável. Apesar de ter sua eficiência verificada por diversos casos-teste, sempre é bom ter seu desempenho ainda avaliado em condições específicas de campo e laboratório.

Assume-se que os solutos podem existir em três fases: gasosa, dissolvido na água do solo e adsorvido na matriz do solo (matéria orgânica e superfícies minerais) e os processos de produção e “transformação” podem ser diferentes em cada fase. Os solutos podem ser transportados por convecção e dispersão na fase líquida, bem como, por difusão na fase gasosa. As equações diferenciais parciais governam o transporte químico em situação de não equilíbrio dos solutos e envolvem uma sequência de primeira ordem durante o fluxo transiente de água em um meio poroso variavelmente saturado, dada pela equação 1:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{ck}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{sk}}{\partial t} + \frac{\partial a_v g_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_k^w \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_v D_k^g \frac{\partial g_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial qc_k}{\partial x} - \\ - (\mu_{w,k} + \mu'_{w,k}) \theta_{ck} - (\mu_{s,k} + \mu'_{s,k}) \rho_{sk} - (\mu_{g,k} + \mu'_{g,k}) a_v g_k + \mu'_{w,k-1} \theta c_{k-1} \\ + \mu'_{s,k-1} + \mu'_{g,k-1} a_v g_{k-1} + \gamma_{w,k} \theta + \gamma_{s,k} \rho + \gamma_{g,k} a_v - S c_{r,k} \quad k \in (2, n_s) \end{aligned} \quad (1)$$

A formulação unidimensional é utilizada, para simplicidade. Na equação acima c , s e g são concentrações do soluto nas fases líquida, sólida e gasosa, respectivamente, q é a densidade de fluxo, μ_w , μ_s e μ_g são constantes de primeira ordem para solutos nas fases líquida, sólida e gasosa, respectivamente, μ'_w , μ'_s e μ'_g são similarmente constantes de primeira ordem promovendo conexões entre reações de espécies de solutos, γ_w , γ_s e γ_g são constantes de ordem zero para as fases líquida, sólida e gasosa, respectivamente; ρ é a densidade do solo, a_v é o volume de ar, S é o termo de sumidouro da equação de fluxo, c_r é a concentração do termo sumidouro, D^w é o coeficiente de dispersão para a fase líquida, D^g é o coeficiente de difusão para a fase gasosa. Os subscritos w , s e g , correspondem às fases líquida, sólida e gasosa, respectivamente, o subscrito k representa o número de reações e o n_s

é o número de solutos envolvidos nas reações.

O modelo HYDRUS-1D pode ser utilizado para simular interações em situações de não equilíbrio entre a solução (c) e a concentração adsorvida (s), e interações de equilíbrio entre a solução (c) e as concentrações de gás (g) do soluto no solo.

A isoterma de equilíbrio de adsorção relacionando “s” e “c” é descrita por uma equação geral não-linear, da seguinte forma (equação 2).

$$s = \frac{K_s c^\beta}{1 + \eta c^\beta} \quad (2)$$

em que: K_s , β e η são coeficientes empíricos.

As concentrações “g” e “c” são expressas por uma equação da forma (equação 3).

$$g = k_g c \quad (3)$$

em que: k_g é uma constante empírica, geralmente conhecida como constantes de Henry.

A difusão é um processo espontâneo que resulta do movimento natural térmico de íons e moléculas dissolvidos. O transporte por difusão nos solos tende a diminuir os gradientes de concentração e, em analogia com a lei de Fick, pode ser descrito como:

$$J_d = -\theta D_m \frac{\partial C}{\partial X} \quad (4)$$

em que:

J_d = fluxo de difusão do soluto no solo, $M L^{-2} T^{-1}$;

θ = umidade volumétrica, $L^3 L^{-3}$;

C = concentração do soluto, $M L^{-3}$;

D_m = coeficiente de difusão molecular do soluto na solução do solo, $L^2 T^{-1}$; e

X = distância, L .

O processo de dispersão deve-se às variações de velocidade da água nos poros. Existem, portanto, variações devido à resistência da matriz do solo bem como devido ao avanço da frente de molhamento. Portanto, o movimento por dispersão resulta do fato de que a velocidade do fluido dentro de poros individuais e entre poros de diferentes formas, tamanhos e direções, desvia-se da velocidade média da água nos poros e é dado por:

$$J_h = -\theta D_h \frac{\partial C}{\partial X} \quad (5)$$

em que:

J_h = fluxo de dispersão do soluto no solo, $M L^{-2} T^{-1}$; e

D_h = coeficiente de dispersão mecânica, $L^2 T^{-1}$ (BEAR, 1972).

Esse coeficiente é geralmente assumido como sendo função da velocidade do fluido, cujo valor pode ser obtido pela relação entre o fluxo de água no solo e a umidade volumétrica.

$$D_h = \lambda v^n \quad (6)$$

em que:

λ = dispersividade do meio poroso, L;

v = velocidade da água no poro (q/θ), $L T^{-1}$; e

n = constante empírica, aproximadamente igual a 1,0.

Combinando as equações 5 e 6, considerando D ao invés de D_m obtém-se a expressão para o fluxo de solutos no solo, isto é:

$$J_s = -\theta D \frac{\partial C}{\partial X} + qC \quad (7)$$

em que:

J_s - fluxo de solutos no solo, $M L^{-2} T^{-1}$.

Substituindo a equação 7 na equação da continuidade obtém-se a equação 8. Deste modo a equação de transporte de solutos pode ser obtida (equação 9):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + \rho S) = -\frac{\partial J_s}{\partial X} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + \rho S) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial X} - qC \right) \quad (9)$$

em que:

S = concentração adsorvida (massa de soluto por unidade de massa de solo), $M M^{-1}$;

ρ = densidade do solo, $M L^{-3}$; e

t = tempo, T.

Para linearizar a adsorção e o fluxo dinâmico de água em um perfil de solo homogêneo, assume-se que θ e q são constantes no tempo e no espaço, e a partir da equação 8, obtém-se a equação 10.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial X} \quad (10)$$

Sendo:

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta} \quad (11)$$

em que:

R = fator de retardamento, adimensional; e

k = coeficiente empírico de distribuição (se não há interação entre o soluto e o solo, k

assume o valor igual a zero), $M^{-1} L^3$.

Conforme visto anteriormente, a equação 9 é a mais utilizada para descrever o transporte de solutos no solo. Soluções analíticas dessa equação têm sido desenvolvidas para um número específico de condições de contorno e para vários problemas importantes da ciência do solo, os quais envolvem a estimativa de parâmetros de transporte baseados no ajuste dessas soluções ou em modelos alternativos para medir curvas de eluição a partir de experimentos de deslocamento miscível.

A distribuição da concentração dos solutos em uma coluna de solo com uma concentração inicial uniforme sob equilíbrio dinâmico, a qual será substituída em um tempo $t = 0$ por uma solução de concentração constante, está apta para ser submetida a uma solução analítica. As condições iniciais e de contorno são dadas pelas equações 12, 13, 14.

$$c(x, 0) = C_i \quad (12)$$

$$c(0, t) = C_0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(\infty, t) = 0 \quad (14)$$

A solução para a equação de convecção-dispersão sujeita a esses valores iniciais e de condições de contorno pode ser obtida pela equação 15 (NIELSEN & BIGGAR, 1963; van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986):

$$\frac{c(x, t) - c_i}{c_0 - c_i} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx - vt}{\sqrt{4DRt}}\right) + \frac{1}{2} e^{\frac{vx}{D}} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx + vt}{\sqrt{4DRt}}\right) \quad (15)$$

em que: $\operatorname{erfc}(u)$ é a função erro complementar.

Valores tabulados de $\operatorname{erf}(u)$ podem ser encontrados em tabelas ou aproximados. Recentes versões de planilha incluem rotina para cálculo de $\operatorname{erf}(u)$ (equação 16).

$$\operatorname{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erfc} \quad (16)$$

Para valores negativos do argumento (u) utiliza-se a identidade (equações 17 e 18):

$$U > 0 \rightarrow 1 - \operatorname{erf}(u) \quad (17)$$

$$U < 0 \rightarrow 1 + \operatorname{erf}(u) \quad (18)$$

Uma solução simples comumente utilizada em experimentos de deslocamento miscível é obtida retendo somente o primeiro termo do lado direito da equação anterior (para C_i desprezível) (equação 19).

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_x - vt}{\sqrt{4DRt}} \right) \quad (19)$$

A solução apresentada anteriormente pode ser obtida desprezando a difusão molecular e não se considerando um sistema infinito.

Os parâmetros de transporte D, R e v são baseados na otimização dos dados, mediante a minimização da soma dos quadrados dos desvios, medidos na equação anterior.

2.7 Parâmetros de transporte de solutos no solo

A determinação do transporte dos solutos nos solos ainda é equacionada de acordo com modelos desenvolvidos para diferentes condições de transporte, normalmente os parâmetros desses modelos são estimados pelo ajuste dos resultados experimentais, sob determinada condição específica de fluxo (ÁLVAREZ-BENEDÍ *et al.*, 1999).

Um modelo frequentemente utilizado é o STANMOD (ŠIMŮNEK *et al.*, 2008), que, além de verificar o ajuste entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo, fornece dois importantes parâmetros de transporte: o fator de retardamento (R) e o coeficiente de dispersão (D).

Para o bom desenvolvimento dos modelos matemáticos na descrição do transporte de solutos no solo, deve-se ter alto grau de confiabilidade das variáveis de transporte envolvidas. Assim, variáveis importantes como fator de retardamento e coeficiente dispersivo-difusivo, as quais expressam a maior ou menor capacidade de um soluto em se mover no solo, devem ser determinadas com exatidão (VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986). Por estarem intimamente relacionadas com a interação solo-soluto, essas determinações são fundamentais na descrição do deslocamento de solutos no solo.

O fator de retardamento (R) representa uma medida da capacidade de retenção ou efeito tampão do solo para o deslocamento de determinado elemento ou composto existente em um solvente (MATOS, 1995). De acordo com Valocchi (1984), o fator de retardamento pode ser entendido como a defasagem existente entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante; o fator de retardamento, por ser um parâmetro que indiretamente expressa a capacidade do solo em reter íons, dependerá das interações entre a fase líquida e sólida que ocorram durante a percolação da solução do solo. A obtenção do R pode ser feita de modo direto ou indireto.

O coeficiente de dispersão-difusão (D), também chamado de coeficiente de difusão aparente ou de coeficiente de dispersão longitudinal, é um parâmetro físico da equação de

transporte de solutos no solo. Representa o efeito combinado da dispersão mecânica e da difusão iônica. A dispersão mecânica é um movimento proporcionado por variações na velocidade de deslocamento da solução, através de poros individuais e entre poros de diferentes tamanhos, formas e direções. A difusão iônica origina-se em resposta à existência de gradientes de concentração (NIELSEN *et al.*, 1986).

O número de Peclet (P) é um número adimensional utilizado no estudo da difusão através de um meio poroso, identificando qual mecanismo (convecção-dispersão ou difusão) domina o processo de transferência de solutos (ROTH, 1996; GONÇALVES, 2007), exprimindo a relação entre a velocidade de transporte por convecção e a velocidade de transporte por difusão molecular. Quanto à natureza dos processos físicos, pode-se dizer que para: $P < 0,01$, há o domínio de fluxo difusivo; para P entre 0,01 e 50 há domínio do fluxo difusivo e advectivo e para $P > 50$, há predomínio do fluxo advectivo de transporte de poluentes (MONCADA, 2004).

As curvas de distribuição de efluentes ou *Breakthrough Curves* (BTC), segundo Correa *et al.* (1999) tem proximidade entre os valores estimados e os obtidos experimentalmente em toda a faixa de variação de C/C_0 , mostrando a eficiência do modelo dispersivo-convectivo em descrever a mobilidade de soluto nos solos, devendo-se analisar um aspecto importante que é seu formato e desenvolvimento. A curva relaciona no eixo “x”, o número de poros percolados (volume percolado/volume de vazios) e no eixo “y” a concentração relativa do contaminante (C/C_0). O ensaio é realizado até a relação C/C_0 chegar ao valor unitário, ou seja, até quando ocorre um regime permanente de fluxo do contaminante pelo solo, que já estará saturado e não possui mais capacidade de retenção (KORF *et al.*, 2008).

Segundo Nielsen e Biggar (1962), o número de volume de poros correspondente à concentração relativa 0,5 é uma primeira indicação, no sentido da existência ou não de interações soluto-solo. Quando o valor correspondente a 0,5 da concentração relativa (C/C_0) é 1 volume de poros, significa que o soluto não está interagindo com a fração coloidal do solo. Por outro lado, quando o valor é maior que 1, isto é, a curva de efluente se apresenta deslocada para a direita, significa que ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, resultando um fator de retardamento acima da unidade. Portanto, quanto maior é o fator de retardamento maior será a interação soluto-solo. Como a fase sólida do solo interage com os íons em solução (adsorção), eles têm seu transporte retardado em relação à água.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação, Drenagem e Salinidade, do Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), situado em Mossoró – RN (5° 11' de latitude sul, 37° 20' de longitude oeste, com 18 m de altitude) nas seguintes etapas: 1) coleta e caracterização do material de solo salino; 2) elaboração das curvas de distribuição de efluentes (obtenção dos parâmetros de transporte do íon potássio em condições de solos salinos); 3) análise química dos efluentes e ajuste numérico dos dados; 4) ensaio experimental em coluna segmentada preenchida com material de solo salino não saturado (Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo); 5) informações computacionais para as simulações pelo modelo HYDRUS-1D; 6) comparações entre os valores simulados pelo modelo e observados na coluna preenchida com material de solo salino e 7) análise de sensibilidade do modelo HYDRUS-1D.

3.1 Coleta e caracterização do material de solo

O material de solo foi coletado no município de Mossoró, RN, na camada de 0,20 a 0,40 m de profundidade, sendo provenientes de dois tipos de solo distintos: Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2), classificação da EMBRAPA (1999) (Figura 1). Depois de coletado, esse material, para cada tipo de solo, passou por um processo de secagem e destorroamento, em seguida foi peneirado através de uma malha de 2 mm para se obter a terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida, foram submetidos às análises físicas e químicas, a fim de se prover informações sobre as condições iniciais dos solos.

Na Tabela 1 podem ser conferidas as análises físicas, e na Tabela 2 podem ser conferidas as análises químicas, para os dois tipos de solos salinos, realizadas no Laboratório de Solos da UFERSA.

(a)

(b)

Argissolo Amarelo (S1)

Latosolo Vermelho Amarelo (S2)

Figura 1: Procedimento de coleta do material de solo, com abertura das trincheiras (a) e medição da camada de interesse do solo (b).

Tabela 1: Análises físicas para os solos: Argiloso Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2), realizada no Laboratório de Solos-UFERSA

Características	S1	S2
Granulometria (kg kg^{-1})		
Argila ($< 0,002 \text{ mm}$)	0,08	0,08
Silte ($0,053 - 0,002 \text{ mm}$)	0,02	0,02
Areia total	0,90	0,90
Areia grossa ($2,00 - 0,210 \text{ mm}$)	0,67	0,62
Areia fina ($0,210 - 0,053 \text{ mm}$)	0,23	0,28
Classe textural*	Areia	Areia
Densidade aparente (kg dm^{-3})	1,5	1,5
Densidade real (kg dm^{-3})	2,54	2,54

*Classificação segundo EMBRAPA (1999)

Tabela 2: Análise química para os solos: Argiloso Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2), realizada no Laboratório de Solos-UFERSA

Parâmetros	S1	S2
pH (água)	6,63	7,06
CE (dS m^{-1})	2,00	4,00
P (mg dm^{-3})	47,5	47,5
K ⁺ (mg dm^{-3})	30,2	58,6
Na ⁺ (mg dm^{-3})	95,2	306,6
Ca ²⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	1,02	1,91
Mg ²⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,59	1,15
Al ³⁺ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,00	0,00
(H+Al) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,41	0,33
SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	2,10	4,54
t ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	2,10	4,54
CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	2,51	4,87
Saturação por bases (V%)	84	93
Saturação de Al (m%)	0	0
PST (%)	16	27

EMBRAPA (2006)

3.2 Elaboração das curvas de distribuição de efluentes

Para a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos no solo foram feitas em laboratório as chamadas “*Breakthrough Curves*” (BTC’s) ou curvas de distribuição de efluentes. Os parâmetros de transporte de solutos, no caso o íon potássio, em condições de solos salinos, a serem determinados foram: coeficiente de dispersão (D), número de Peclet (P), dispersividade em função de P (λ), velocidade da água nos poros em função do P (v) e o fator de retardamento (R). O conhecimento desses parâmetros de transporte de solutos relativos a cada tipo de solo é de extrema importância para a aplicação em modelos de simulação do movimento de solutos no solo. O diferencial dessa pesquisa é que foram utilizados solos previamente salinizados, naturalmente.

As concentrações de potássio utilizadas foram superestimadas para se observar o movimento e comportamento no solo, assim foram usadas 1000, 2000 e 3000 ppm, aplicados em solução nos solos, sendo que cada um apresentava os seguintes valores iniciais de condutividade elétrica (CE): Argissolo Amarelo (S1) 2 dS m⁻¹ e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) 4 dS m⁻¹.

Foram utilizadas colunas de PVC, onde foi colocado, em sua parte inferior, um círculo de manta sintética sobre uma tela fixada por um “cap” de pressão. O preenchimento das colunas foi feito com o material dos solos salinos, em camadas constantes, equivalentes e homogêneas, com o objetivo de proporcionar uniformidade e homogeneidade ao longo da coluna, tentando-se evitar a compactação da massa de solo ou a formação de canais preferenciais, mantendo a mesma densidade do solo em todas as colunas. Para a manutenção de uma carga hidráulica constante de 1 cm, foi instalado na parte superior da coluna um dreno, para retirar o excesso. A coluna de solo apresenta as seguintes dimensões: 20,5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, dando um volume total de 402,52 cm³.

Para realização das BTC’s normalmente se utiliza água destilada ou deionizada, no processo de lavagem, para retirar o excesso de sais no solo, no caso dessa pesquisa a intenção era eliminar apenas os demais íons, mantendo, em sua totalidade, os íons responsáveis pela salinização do solo. Assim, para o início do teste, a coluna foi saturada com solução salina conhecida, usando sais na forma comercial, (para o S1: 332,3 mg L⁻¹ de CaCl₂; 97,25 mg L⁻¹ de MgCl₂ e 216,0 mg L⁻¹ de NaCl, para manutenção da CE em 2 dS m⁻¹, e para o S2: 2770 mg L⁻¹ de CaCl₂; 476 mg L⁻¹ de MgCl₂ e 730,0 mg L⁻¹ de NaCl, para manutenção da CE em 4 dS m⁻¹) de maneira lenta, por capilaridade, colocando-se a coluna em um balde e em seguida adicionando-se a solução salina por gotejamento, junto às paredes do balde, até

atingir cerca de 2/3 da altura da coluna de solo. Após isso, o conjunto permaneceu em repouso por 24 horas para a completa saturação (Figura 2).

Após 24 horas de repouso (saturação), iniciou-se o processo de “lavagem” do solo o qual consistiu de passagem da solução salina através da coluna durante um período de tempo variável para cada uma, em que fosse drenado um volume de solução superior a quatro vezes o volume da coluna, para que todos os íons presentes na solução do solo sejam removidos pela solução percolante. Este processo demandou intervalos de tempo distintos para cada tipo de solo. Em razão desta variação, o processo foi conduzido, para cada solo, com o acompanhamento frequente da condutividade elétrica (CE). Assim, o final da “lavagem” foi indicado pela igualdade entre os valores de CE da solução salina aplicada na superfície da coluna e da amostra coletada abaixo da coluna (Figura 3).

Figura 2: Procedimento de saturação ascendente do solo para elaboração das curvas de distribuição de efluentes para o íon potássio.

Figura 3: Esquema montado em laboratório para elaboração das curvas de distribuição de efluentes, para o íon potássio, em condições salinas, visando a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos: coeficiente de dispersão (D), dispersividade (λ) e o fator de retardamento (R) (SILVA, 2013).

Para obtenção dos parâmetros do soluto no solo foram realizadas 18 BTC's no total, sendo relacionadas a 3 soluções potássicas, 2 solos com diferentes condutividades elétricas e 3 repetições.

Com este esquema, as colunas se comportaram como permeâmetros de carga constante, sendo possível, portanto determinar a condutividade hidráulica dos solos saturados (K_0), por meio da equação de Darcy (equação 20).

$$q = -K_0 \cdot \text{grad } \psi \quad (20)$$

em que;

q = densidade de fluxo, $L^3 L^{-2} T^{-1}$;

K_0 = condutividade hidráulica na saturação, $L T^{-1}$; e

$\text{grad } \psi$ = gradiente de potencial total, $L L^{-1}$.

Ao final do processo de lavagem deu-se início à passagem das três soluções potássicas analisadas ($1,91 \text{ g L}^{-1}$ de KCl, $3,81 \text{ g L}^{-1}$ de KCl e $5,72 \text{ g L}^{-1}$ de KCl correspondendo respectivamente a 1000, 2000 e 3000 ppm de K).

A partir desse instante, os efluentes foram coletados sequencialmente por frascos de acrílicos, em volumes de 15 ml, cujos valores dos volumes de poros, estão em função do volume da coluna ($402,52 \text{ cm}^3$) e da porosidade do solo em questão (equação 21).

$$VP = \alpha \cdot V \quad (21)$$

em que:

VP = volume de poros; L³;

α = porosidade do solo em questão, decimal; e

V = volume da coluna, L³.

A obtenção dos parâmetros de transporte de solutos referentes a cada curva de distribuição de efluentes (*Breakthrough Curve*) foi feita mediante o ajuste dos dados obtidos em laboratório, utilizando-se para tal o modelo STANMOD (versão 2.2.) (ŠIMŮNEK, 1999).

3.3 Análise química dos efluentes e ajuste numérico dos dados

As análises químicas dos efluentes coletados foram realizadas no Laboratório de Irrigação e Drenagem, do Departamento de Engenharia, da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA, Mossoró-RN). As determinações de potássio foram realizadas por espectrofotometria de chama.

O ajuste numérico dos parâmetros de transporte de solutos, referentes às curvas de distribuição de efluente, foi feito por meio do modelo STANMOD (versão 2.2.) (ŠIMŮNEK, 1999). O modelo permite a entrada dos valores obtidos em laboratório, são eles: concentração relativa (CE) em função do volume de poros (VP), unidade volumétrica (cm³ cm⁻³), densidade do solo (g cm⁻³), densidade do fluxo (cm h⁻¹) e comprimento da coluna de solo (cm).

Os parâmetros de saída do modelo são: número de Peclet (P), fator de retardamento (R), difusividade (D), soma dos quadrados dos resíduos (Rs) e o coeficiente de determinação (R²).

O número de Peclet (P) é adimensional e relaciona a velocidade de advecção de um fluxo com sua velocidade de difusão, considerando o comprimento da coluna de solo, por meio da equação 22:

$$P = \frac{v L}{D} \quad (22)$$

em que:

v = velocidade da água nos poros, L T⁻¹;

L = comprimento da coluna de solo, L; e

D = difusividade da solução, L² T⁻¹.

O fator de retardamento (R), segundo Valocchi (1984), representa a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante, representando, portanto, a interação entre o soluto e a fase sólida do solo. Este

processo é descrito pela equação 23:

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta} \quad (23)$$

em que:

R = fator de retardamento, adimensional;

ρ = densidade do solo, $M L^{-3}$;

k = coeficiente empírico de distribuição (igual a zero quando não há interação entre o soluto e o solo), adimensional; e

θ = conteúdo volumétrico de água, $L^3 L^{-3}$.

3.4 Ensaio experimental em coluna segmentada

Em laboratório, foi montado um ensaio experimental para representar o processo de infiltração de uma solução de potássio, em solos salinos (Solos S1 e S2). Dessa forma, foram obtidos os perfis de umidade do solo e concentrações de potássio, nos respectivos solos salinos, e após essa obtenção, tais perfis foram simulados pelo modelo HYDRUS-1D.

Para tal, foi utilizada uma coluna segmentada de acrílico, que recebeu, em seu interior, um tratamento com lixa de polimento, com o objetivo de aumentar sua rugosidade interna e evitar possíveis fluxos preferenciais, entre a passagem da solução salina e a parede da coluna segmentada, durante os ensaios.

A coluna utilizada apresentava as seguintes dimensões: 0,75 m de altura e 0,05 m de diâmetro, estando dividida em 11 anéis, 10 com 0,07 m de altura e o anel superior com apenas 0,05 m. Este anel superior tem a função de proteção no momento da aplicação e também de auxiliar na verificação da formação de uma possível lâmina da solução aplicada. Eventualmente pode haver a formação de lâmina, principalmente, se a vazão estiver excessiva ou por conta das variações da densidade global do solo ao longo da coluna, que podem estar relacionadas à forma inadequada de preenchimento com o solo ou à própria disposição vertical dos anéis. Quando era constatada a formação de lâmina, o ensaio era interrompido e a coluna desmontada, e realizado um novo ensaio em substituição (Figura 4 e 5).

Figura 4: Esquema ilustrativo montado em laboratório para elaboração dos perfis de teores de água e solutos em coluna segmentada (PINHO, 2009).

Figura 5: Detalhes do preenchimento e da montagem das colunas segmentadas.

No total foram montadas 18 colunas segmentadas, sendo relacionadas a três soluções potássicas, dois solos com diferentes níveis salinos e três repetições. As colunas foram preenchidas de forma homogênea e uniforme, do décimo ao primeiro anel, sendo utilizada fita adesiva para vedar e unir os anéis. Sobre a superfície do solo, no primeiro anel, colocou-se uma manta acrílica de forma circular, de área igual à área da seção interna da coluna, para evitar o selamento da camada superficial, devido ao gotejamento da solução, e para melhorar a distribuição de aplicação sobre a superfície do solo. Todo o material (coluna vazia, manta acrílica e as fitas adesivas) foi pesado antes e depois do preenchimento da coluna, para

obtenção da densidade do material de solo, dentro da coluna.

Foram utilizadas soluções de 1,91 g L⁻¹ de KCl, 3,81 g L⁻¹ de KCl e 5,72 g L⁻¹ de KCl, correspondendo respectivamente a 1000, 2000 e 3000 ppm de K. A vazão de aplicação das soluções esteve em torno de 2,0 mL min⁻¹ para o S1 e de 1,5 mL min⁻¹ para o S2. Estes valores se demonstraram satisfatórios porque, para as condições de densidade dos solos nas colunas, não ocasionaram formações de lâmina de água e nem prolongamento do tempo de aplicação da solução nos ensaios, que duraram em torno de 37 min para o S1 e 27 min para o S2, a diferença de variação na vazão em comparação com o tempo dos ensaios pode ser explicado pelo preenchimento das colunas.

O tempo total de aplicação compreendeu desde o início do gotejamento com cada solução até a chegada da frente de molhamento à metade do oitavo anel. Esta medida foi adotada com a finalidade de que a solução não chegasse ao final da coluna e de que houvesse três condições distintas de umidade. Estas condições estavam normalmente distribuídas assim: nos primeiros anéis, solo úmido; no sétimo e oitavo anéis, fase de transição; nono e décimo anéis, solo seco. Após o período de aplicação da solução, relativo para cada tipo de solo e cada coluna, os anéis foram desmontados rapidamente e separados em recipientes numerados. Em seguida, de cada recipiente, foi retirada uma amostra de solo para determinação da umidade do solo, relativa a cada anel, e foi feita a pasta de saturação, retirando-se novamente uma amostra para determinação do conteúdo de água da pasta saturada, para fazer a correção da concentração do potássio retirado da pasta de saturação. Para finalizar, as concentrações do íon potássio foram obtidas pela utilização do fotômetro de chama, para cada anel, permitindo a elaboração dos perfis de concentração de potássio, para os respectivos solos salinos, ao longo de toda a coluna de solo não saturado (PINHO 2009).

O teor de água foi obtido pelo método gravimétrico, pesando as amostras de solo de cada anel, secando-as em estufa a 110 °C por 24 horas e pesando-as novamente. Para obtenção das concentrações do soluto, foram analisadas as soluções provenientes da pasta de saturação de cada anel, retiradas por sucção. As análises foram realizadas no Laboratório de Irrigação, Drenagem e Salinidade, da UFERSA. Os valores encontrados foram então corrigidos, por meio do fator de diluição da pasta, para que ficassem em função do conteúdo de água após o término da aplicação da solução, conforme a Equação 24:

$$C_{ion\ corrigida} = \frac{U_{pasta} \cdot C_{ion}}{U_{anel}} \quad (24)$$

em que:

$C_{ion\ corrigida}$ = concentração corrigida do íon potássio, em função do conteúdo de água

após o término da aplicação da solução, mh L^{-1} ;

U_{pasta} = conteúdo de água, com base em massa, da pasta utilizada para a extração da solução do solo, kg kg^{-1} ;

$C_{\text{íon}}$ = concentração do íon potássio, determinado na extração da solução mg L^{-1} ;

U_{anel} = teor de água do solo, com base em massa, em cada anel da coluna, após o término da aplicação da solução, kg kg^{-1} .

3.5 Informações computacionais para as simulações

3.5.1 Entrada de dados para o modelo RETC

Para o ajuste dos parâmetros da curva de retenção pelo modelo RETC, foram escolhidas as unidades de comprimento (cm) e tempo (min), o modelo de ajuste em questão, foi utilizado o modelo de van Genuchten (1980), para parâmetros do fluxo da água escolheu-se o que mais se aproximou do solo em questão, como uma condição inicial, e foram inseridos os dados obtidos em laboratório (ANEXO A), durante a montagem da curva de retenção de água no solo, com as unidades em base de peso e volume. Assim sendo, após o ajuste numérico pela minimização dos erros, o modelo RETC apresentou os parâmetros físicos do solo: θ_r (umidade volumétrica residual); θ_s (umidade volumétrica saturada); α e n definem o formato da curva sendo que o primeiro representa o inverso do potencial de entrada de ar e o segundo é um índice da distribuição dos tamanhos de poros (Tabela 3).

Tabela 3: Parâmetros da curva de retenção de água para os dois solos estudados: Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2).

Tipo de solo	θ_r	θ_s	α	n	m
	$(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$		(cm^{-1})		
S1	0,100	0,39	0,059	1,48	0,3243
S2	0,034	0,46	0,016	1,37	0,2700

* $m = 1 - \frac{1}{n}$, $n > 1$ * $\theta(\phi m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot |\phi m|)^n\right]^m}$ (van Genuchten, 1980)

3.5.2 Entrada de dados para o modelo STANMOD

De posse dos valores de concentração de potássio e dos dados experimentais de cada coluna de solo foram elaboradas as curvas de distribuição de potássio. Para fins da simulação

tendo como objetivo o ajuste numérico dos parâmetros de transporte do soluto (íon potássio), no modelo STANMOD, foi escolhida a opção CFITIM (VAN GENUCHTEN, 1981), código do modelo de adsorção de equilíbrio linear, problema inverso, que tem como dados de entrada: concentração relativa (C/C_0) do soluto e o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna (VP), o número de dados experimentais, os dados obtidos previamente em laboratório, a partir das curvas de distribuição de efluentes, os “valores” iniciais de 100 para o número de Peclet, e 1 para fator de retardamento. Os dados de saída do modelo STANMOD foram: número de Peclet (P) e fator de retardamento (R), a partir destes foram determinados os parâmetros de coeficiente de dispersão (D) e dispersividade (λ) mediante as equações (24 e 25). A velocidade da água no solo foi determinada medindo-se o tempo de coleta das amostras e o volume de efluente coletado. O conhecimento destes parâmetros de transporte de solutos relativos a cada tipo de solo é de extrema importância para a aplicação dos modelos de simulação do movimento de solutos no solo.

$$D = VP * \frac{A}{P} \quad (25)$$

em que:

D = dispersão, adimensional;

VP = volume de poros, $L T^{-1}$;

A = área da coluna, L;

P = número de Peclet, adimensional.

$$\lambda = \frac{D}{VP} \quad (26)$$

em que:

λ = dispersividade.

3.5.3 Entrada de dados para o modelo HYDRUS-1D

Por meio desses parâmetros obtidos, foi possível realizar as simulações pelo modelo HYDRUS-1D, para as três concentrações da solução do íon potássio, para os dois tipos de solos salinos estudados. Como a coluna era composta da subdivisão de dez anéis com 0,07 m cada e para aumentar o detalhamento espacial do modelo, adotou-se as variações de 0,01 m para as simulações. Em relação ao tempo, foram mantidos valores iguais para todas as simulações: passo de tempo inicial de 0,0024 h, com mínimo de 0,000024 h e máximo de 24 h. O tempo inicial foi considerado como tempo zero e o tempo final como o tempo

decorrido até a finalização de cada ensaio, indicado pela chegada da frente de molhamento à metade do oitavo anel. Considerando a área da seção da coluna (19,63 cm²), e com os valores da vazão de aplicação (citados anteriormente), pôde-se determinar o fluxo de entrada para cada simulação.

O modelo adotado para as propriedades hidráulicas do solo foi o de van Genuchten (1980), sem considerar o fenômeno da histerese. Para as condições de contorno das colunas, foi adotado fluxo constante como condição superior e frente de infiltração ($h=0$) como inferior, estando as condições iniciais de solo determinadas pelo conteúdo de água. O valor de fluxo na superfície do solo variou de acordo com cada ensaio e foi utilizado o valor médio das três repetições, (ANEXO A) para cada soluto aplicado e para cada solo utilizado. Para o transporte de solutos, o modelo de equilíbrio foi o adotado em todas as simulações, considerando uma duração de pulso sempre superior ao tempo total de aplicação de solutos, o que representou uma aplicação contínua da mesma concentração durante todo o ensaio. As condições de contorno para o transporte de solutos foram: superior, concentração do fluxo de entrada; inferior, gradiente de concentração zero; e condições iniciais baseadas nas concentrações tomadas na fase líquida.

Foram atribuídos valores iniciais de temperatura, conteúdo de água e teor de solutos na coluna por meio do editor gráfico. Foi fixada a temperatura em 25°C para todas as simulações. Para o valor inicial da umidade do solo, foi adotado o valor de umidade do solo seco quando foi preenchida a coluna. O valor da concentração inicial de solutos no solo foi adotado como sendo igual ao valor obtido pela análise química dos solos para potássio, a qual foi determinada diretamente pelas análises químicas.

3.6 Comparação entre valores simulados e observados (Análise de Desempenho)

Para a comparação dos resultados obtidos pela simulação do modelo com os obtidos em laboratório, foram utilizados os seguintes índices: índice de concordância de Willmott (d); erro máximo (E_{max}); erro absoluto médio (EAM); raiz quadrada do erro médio normalizado (RQEM); coeficiente de determinação (CD); coeficiente de massa residual (CMR); e eficiência (E). Estes indicadores podem ser conferidos a partir das equações 26 a 32:

$$d = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2 \right] \quad (27)$$

$$E_{max} = \max(|O_i - P_i|)_{i=1}^n \quad (28)$$

$$EAM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \right] \quad (29)$$

$$RQEM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \times \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (30)$$

$$CD = \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2 \quad (31)$$

$$CMR = \left[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right] / \sum_{i=1}^n O_i \quad (32)$$

$$E = \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (33)$$

em que:

P_i = dados padrão, obtidos nos ensaios experimentais;

O_i = dados simulados pelo modelo HYDRUS-1D;

N = número de observações; e

$\bar{O}$ = média dos valores simulados.

3.7 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo tem aplicação em diversas áreas do conhecimento e foi desenvolvida, inicialmente, com o objetivo de avaliar o comportamento dos modelos físicos e matemáticos, em que os dados de entrada estivessem incertos ou errôneos. Segundo Goldenfum *et al.* (1991) apud Evangelista e Ferreira (2006), para modelos simples é possível obter expressões das saídas em função dos dados de entrada, expressando a sensibilidade do modelo como funções explícitas. No entanto, à medida que os modelos tornam-se mais complexos, a sensibilidade é expressa mais facilmente na forma de mudanças relativas, gráficos e tabelas, em vez de funções. Essa análise permite que o usuário saiba que parâmetros devem ser medidos com maior precisão.

Os resultados da concentração de potássio e da umidade do solo obtidos nas simulações foram submetidos a uma análise de sensibilidade mediante a obtenção de valores do erro padrão (equação 33) variando-se, individualmente, os seguintes parâmetros de entrada: umidade volumétrica do solo saturado, condutividade hidráulica do solo saturado, parâmetro n da equação de van Genuchten (1980) e o parâmetro α da equação de van

Genuchten (1980). Estes parâmetros foram, então, alterados em relação ao seu valor padrão, mantendo-se todos outros dados de entrada fixos, observando a sensibilidade do modelo a estas alterações. A determinação do erro padrão do valor final de θ foi obtido comparando o valor obtido em relação ao valor padrão (equação 33).

$$e = \sqrt{\frac{\sum (y_m(i) - y_s(i))^2}{N}} \quad (34)$$

em que:

$y_m(i)$ = erro padrão;

$y_s(i)$ = valor simulado pelo modelo variando parâmetro de entrada;

As variações dos parâmetros de entrada do modelo foram feitas tomando-se o resultado de cada simulação e seguindo acréscimos positivos, +10%, +20%, +30%, +40%, +50%, e negativos, -10%, -20%, -30%, -40%, -50%.

Conforme Chaves (2009), valores de sensibilidade entre 0,5 e 1,5 são considerados intermediários, acima de 1,5 são altos e abaixo de 0,5 são baixos. Valores negativos indicam que o modelo é correlacionado negativamente com o parâmetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curvas de distribuição de efluentes

As curvas de distribuição de efluente do potássio (BTC'S), para a concentração de potássio a 1000 ppm, para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (3 repetições de cada solo), podem ser conferidas através da Figura 6. As BTC's, para os dois tipos de solo salinos, foram ajustadas pelo modelo STANMOD ($r^2 > 0,90$ em todos os casos) e evidenciam o efeito adsorativo entre o íon potássio e o solo estudado e servem para a obtenção dos respectivos parâmetros de transporte do íon potássio em condições de solo com índices de salinidade.

De acordo com Álvarez-Benedí *et al.* (1999), a estimativa dos parâmetros de transporte é realizada pelo ajuste do modelo aos resultados experimentais sob condições específicas de fluxo, portanto o ajuste do modelo para cada BTC foi realizado separadamente, bem como a estimativa dos parâmetros de transporte do potássio para cada soluto aplicado.

Em meio poroso, como o solo, os solutos podem reagir com a fase sólida do solo afetando o seu deslocamento. O deslocamento miscível de um determinado íon é caracterizado pelo formato e desenvolvimento das curvas de distribuição de efluentes; logo, indica a existência ou não de interação entre o solo e o soluto aplicado. Nos meios porosos reativos há uma tendência natural da curva de efluentes deslocar-se para a direita, isto é, sua inflexão ocorre quando volume de poros (VP) > 1 , indicando um retardamento na velocidade de avanço do soluto em relação à velocidade média de avanço da solução deslocadora.

Pôde-se observar que a inclinação nas curvas de distribuição de K, em todas as repetições, ocorreram de forma gradual, notando-se também que nas amostras do S1 em relação às amostras do S2 a inclinação das curvas ocorreu suavemente mais tardiamente necessitando de uma maior quantidade de VP. Verificou-se também o deslocamento das curvas do S2 para esquerda, indicando uma menor interação entre o S2 e o potássio (Figura 6).

Ainda em comparação com o S1, percebeu-se que o S2 necessitou de maior volume de poros (VP) para atingir a máxima concentração relativa ($C/C_o = 1$), 1,8 VP para S2 e 1,6 VP para S1, valores médios das repetições. Isto indica que o S1 tem maior repulsão com o soluto, podendo esta repulsão estar relacionada à predominância de cargas positivas provenientes dos cátions já aplicados previamente. Como a solução aplicada é rica em diferentes íons, na maioria cátions, estes podem sobrecarregar os sítios, diminuindo, interferindo e/ou modificando a movimentação do íon estudado.

Figura 6: Curvas de distribuição de potássio (K), para a concentração de 1000 ppm, ajustadas pelo modelo STANMOD, para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (em que C/C_o é a concentração relativa).

Ainda pela Figura 6, observando-se as repetições 1, 2 e 3 do S2, verificou-se que as BTC's começaram a ascender, por volta de 0,45 VP, anteriormente à ascensão das curvas do S1, em que ocorre após 0,6 VP. Quando as curvas se apresentam mais verticalizadas, com maior declividade, indica que existe baixa dispersão-difusão do soluto no meio, o que é observado nas repetições 3 do S1 e S2, que se apresentaram mais verticais que as demais. Porém quando as curvas se apresentaram mais horizontais indicam a existência de maior dispersão-difusão do soluto com o solo.

Pode-se verificar ainda, nas repetições 1 e 2 do S1, que foi necessário a aplicação de um menor volume de solução, em torno de 1,8 VP, em relação às repetições 1, 2 e 3 do S2, onde foi necessário cerca de 2,5 VP, para que a concentração do efluente coletado atingisse a concentração aplicada. Este fato pode ser mais bem explicado pela Tabela 4, onde podem ser observados os valores das velocidades das soluções, verificando-se que a solução do S1 se apresentou com velocidade superior a solução do S2.

Segundo Nielsen e Biggar (1962), na concentração relativa de 0,5, o VP correspondente é o primeiro indício, no sentido da existência ou não, de interação soluto-solo, sendo assim, pode-se verificar que as “setas” nas curvas indicam o valor de VP em que a concentração relativa (C/C_o) corresponde a 0,5. Observa-se, pelas curvas, que os valores de VP para $C/C_o = 0,5$ foram inferiores a 1. Desta forma, pode-se observar que o ajuste do modelo STANMOD foi satisfatório, quando são comparados os valores obtidos de $C/C_o \cong 0,5$ com os valores do parâmetro fator de retardamento (R), estimado pelo modelo (Tabela 4), pois segundo van Genuchten e Wierenga (1986) o valor de R é considerado igual ao número de volume de poros, para $C/C_o = 0,5$. Quando o valor correspondente a 0,5 da concentração relativa é 1,0 VP, significa que o soluto não está interagindo com a fração coloidal do solo, o que pode ser observado pela repetição 1 do S1. Por outro lado, quando o valor é maior que 1,0, isto é, a curva de distribuição de efluentes apresenta-se deslocada para a direita, significa que ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, resultando um fator de retardamento acima da unidade. Portanto, quanto maior é o fator de retardamento maior será a interação soluto-solo.

Quando as curvas de distribuição de efluentes encontram-se deslocadas para a direita, evidenciam maior adsorção do íon para com o meio, e consequentemente maior fator de retardamento. Este comportamento é visto mais claramente nas repetições 1 e 2 do S2, onde pôde-se verificar ainda que as curvas se apresentam com menor declividade que as demais.

O fator de retardamento, por ser um parâmetro que indiretamente expressa a capacidade do solo em reter íons, dependerá das interações entre a fase líquida e sólida que

ocorram durante a percolação da solução do solo. Na Tabela 4, os dados obtidos demonstram que R foi maior no S1 em relação ao S2, refletindo qual solo pode apresentar maior capacidade adsorativa.

Na Tabela 4 estão apresentadas as características das colunas e os parâmetros de transporte do potássio na concentração de 1000 ppm, quais sejam o número de Peclet (P), o fator de retardamento (R), a velocidade da solução no solo (v), a dispersividade (λ), o coeficiente de dispersão (D), o fluxo (q), a densidade do solo (ρ) e a porosidade (α) do solo nas colunas preenchidas com os respectivos solos salinos.

Tabela 4: Parâmetros de transporte de potássio para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) na concentração de 1000 ppm.

Solo	BTC	P	R	v (cm min ⁻¹)	λ (cm)	D (cm ² min ⁻¹)	q (cm min ⁻¹)	ρ (kg dm ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)
S1	1	21,97	1,06	2,76	0,93	2,57	1,37	1,31	0,49
	2	26,77	0,95	3,23	0,76	2,47	1,63	1,29	0,50
	3	43,41	0,96	2,91	0,47	1,37	1,45	1,30	0,50
S2	1	11,43	0,99	2,52	1,79	4,52	1,24	1,39	0,49
	2	9,47	0,93	2,51	2,16	5,44	1,31	1,31	0,52
	3	26,90	0,80	2,81	0,76	2,14	1,38	1,38	0,49

Os valores obtidos de número de Peclet (P) para o S1, em todas as repetições, foram superiores aos obtidos para o S2 o que confirma as maiores velocidades no primeiro caso, devido à predominância de macroporos, responsáveis diretos pela condução da água no solo durante os processos de infiltração, conforme Libardi (2005). Estes efeitos podem ser confirmados pelos valores obtidos para o fator de retardamento (R), onde os maiores valores ocorreram no S1, indicando existir interação entre o cátion e as cargas negativas do solo.

O fator de retardamento também é chamado de coeficiente de partição, pois representa a razão entre a concentração dos solutos na fase sólida e líquida. Aumentando-se R aumenta-se a adsorção. De forma inversa, quando o fator de retardamento é inferior a um, há uma passagem de soluto adsorvido para a fase líquida. Quanto mais próximo a unidade mais saturado encontra-se os poros, assim as trocas são poucas ou inexistentes.

O valor da dispersividade (λ) varia com a escala do problema (ZHENG; BENNETT, 2002). Em coluna de solo destorroado, em laboratório, o valor de λ varia entre 0,5 e 2,0 cm e em condições de campo, entre 5 e 20 cm (FRIED, 1975).

O fluxo q é um dos parâmetros a influenciar o deslocamento de solutos no solo. Procurou-se manter o fluxo constante para colunas de um mesmo solo, aplicando-se uma

lâmina uniforme do líquido a ser lixiviado (pulso e solução deslocadora) de 0,01 m na superfície. Os valores de fluxo da solução diferentes entre as repetições de um mesmo tratamento podem ser devido ao processo de preenchimento das colunas.

As curvas de distribuição de efluentes caracterizam o deslocamento miscível das soluções, enquanto que os parâmetros de transporte, obtidos por meio de seus ajustes, quantificam esta movimentação (Tabela 4, 5 e 6).

Na Figura 7 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do potássio, para a concentração de potássio a 2000 ppm, para os solos S1 e S2 (3 repetições para cada solo). As curvas de distribuição de efluentes, para os dois tipos de solo, foram ajustadas, $r^2 > 0,95$ na maioria dos casos, exceto o ajuste da repetição 1, e representaram de forma satisfatória o comportamento do íon potássio.

Verificou-se ainda pela Figura 7, que na concentração relativa (C/C_0) de 0,5, o comportamento foi semelhante, porém ao observar o volume de solução coletado para atingir a concentração aplicada ($C/C_0 = 1,0$), pôde-se observar que nas repetições 1, 2 e 3 das curvas de efluentes do S1, foram necessários um menor volume de solução, em torno de 1,3 VP, enquanto que para as repetições 1, 2 e 3 das curvas de efluentes do S2, foram necessários cerca de 2,1 VP. Entretanto, verificou-se que o início da ascensão das curvas de efluentes do S2, por volta de 0,4 VP, foi anterior a ascensão das curvas do S1, ocorrendo somente após 0,6 VP.

O fator de retardamento (R) em meio poroso não reativo apresenta o valor igual a “um” enquanto que em meio poroso reativo é menor do que “um”. No entanto, em alguns casos, o valor de R pode tornar-se menor que a unidade, indicando exclusão iônica e/ou ocorrência de regiões onde o líquido está relativamente imobilizado como dentro de agregados e, portanto, não contribuindo com o fluxo de massa. Ao se aumentar a carga iônica do potássio, para 2000 ppm, aplicado às colunas, pôde-se observar que o S2 apresentou um comportamento ligeiramente diferente, apresentando-se com maior adsorvidade em comparação com o S1, e ainda em comparação com o tratamento anterior (1000 ppm). Isto pode ser visto, ainda, nos valores médios de R , que obtiveram comportamento diferente nos dois tratamentos, bem como a dispersividade com valores superiores neste tratamento.

Pelas curvas de distribuição de efluentes (Figura 7), pôde-se observar que as curvas do S2 apresentam-se menos declivosas, que as do S1, indicando maior dispersão do soluto neste solo. Este comportamento pode estar associado à maior velocidade de escoamento da solução deslocadora nos perfis do S2 (Tabela 5).

Figura 7: Curvas de distribuição de potássio (K), para a concentração de 2000 ppm, ajustadas pelo modelo STANMOD, para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (em que C/C_o é a concentração relativa).

Como se pôde observar o valor correspondente a 0,5 da concentração relativa não se apresentou igual a 1,0 volume de poros, em nenhuma das repetições ou amostras, estando sempre abaixo da unidade. Isto indica que o soluto interagiu com a fração coloidal do solo.

Estes efeitos podem ser confirmados pelos valores obtidos para o fator de retardamento (R), onde os maiores valores ocorreram no S2, indicando forte interação entre o cátion e as cargas negativas do solo.

Pela Tabela 5 pode-se verificar que os valores de porosidade (α) do solo, apresentaram-se estatisticamente iguais para os dois solos estudados, bem como a densidade do solo (ρ) e o fluxo da solução (q). Isto indica que os solos apresentam características físicas semelhantes, podendo as diferenças nos parâmetros do soluto serem influenciados pelas cargas iônicas contidas nestes.

Tabela 5: Parâmetros de transporte de potássio para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) na concentração de 2000 ppm.

Solo	BTC	P	R	v (cm min ⁻¹)	λ (cm)	D (cm ² min ⁻¹)	q (cm min ⁻¹)	ρ (kg dm ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)
S1	1	96,79	0,92	2,22	0,21	0,47	1,14	1,33	0,51
	2	33,70	0,80	2,56	0,61	1,56	1,30	1,35	0,51
	3	20,59	0,87	2,58	0,99	2,57	1,31	1,34	0,51
S2	1	10,23	1,00	2,83	2,00	5,68	1,47	1,31	0,52
	2	7,94	0,98	3,03	2,58	7,82	1,49	1,38	0,49
	3	11,65	0,97	2,04	1,76	3,60	1,00	1,39	0,49

Os valores da velocidade da solução no solo (v) e do fluxo da solução (q) no S2 foram inferiores na repetição 3 (Tabela 5) diante as demais colunas, este resultado pode ser creditado ao processo de preenchimento das colunas.

O número de Peclet é um dado adimensional que relaciona o fluxo convectivo de soluto ao fluxo dispersivo. Valores elevados do “Número de Peclet” significa que o fluxo convectivo predomina sobre o fluxo dispersivo, o que acontece, normalmente, quando a velocidade média do escoamento (v) é elevada; caso contrário há predomínio do fluxo dispersivo (MARTINEZ *et al.*, 2010). Porém, apesar da repetição 1 do S1 apresentar alto valor do número de Peclet, a velocidade da solução no solo foi baixa, quando comparada com as demais repetições. Este comportamento pode estar relacionado ao preenchimento da coluna uma vez que existe a capacidade de ocasionar o adensamento e desuniformidade no solo das colunas.

A dispersividade (λ) é afetada pela uniformidade na distribuição do tamanho dos poros, em que, solos mais argilosos apresentam maior quantidade de microporos que aumentam a heterogeneidade do meio poroso. Houve semelhança na dispersividade para os

dois solos, devido à estrutura granular que tanto o Argissolo quanto o Latossolo possuem, que propicia porosidade elevada, principalmente de macroporos, o que os torna semelhantes aos solos arenosos.

A variação na velocidade de escoamento da solução pode afetar os outros parâmetros da equação de transporte. A influência da velocidade sobre o coeficiente dispersivo-difusivo (D) tem sido bem relatada na literatura (BIGGAR e NIELSEN, 1976; SHUKLA *et al.*, 2003; COSTA E PRUNTY, 2006. BROMLY *et al.*, 2007).

Na Figura 8 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do potássio, para a concentração de potássio a 3000 ppm, para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (3 repetições para cada solo). As curvas de distribuição de efluentes, para os dois tipos de solo, foram ajustadas ($r^2 > 0,90$ na maioria dos casos) e representaram de forma satisfatória o comportamento do íon potássio.

Pôde-se observar pela Figura 8, que na concentração relativa (C/C_0) de 0,5, o comportamento foi semelhante, porém ao observar o volume de solução coletado para atingir a concentração aplicada ($C/C_0 = 1,0$), pode-se notar que nas repetições 1, 2 e 3 das BTC's do S1, foram necessários um menor volume de solução, em torno de 1,4 VP, em relação às repetições 1, 2 e 3 das BTC's do S2, neste solo foram necessários cerca de 1,6 VP, isto pode ser explicado pelo maior fluxo da solução (q) no S1 em relação ao S2, o que também explica a maior velocidade da solução no S1 em relação ao S2, estes dados podem ser observados na Tabela 6. Pode-se verificar que o início da ascensão das curvas das BTC's do S2, foi relativamente semelhante à ascensão das curvas do S1, ocorrendo após 0,4 VP.

O fator de retardamento (R) apresentou-se menor no S1 em relação ao S2 indicando uma maior capacidade adsorptiva do S2, podendo ser explicado pela maior velocidade da solução (v) no S1 em relação ao S2, tendo como resultado a maior defasagem entre o avanço do solvente e o avanço do soluto no solo (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2001), assim, o fluxo de solução foi maior no S1 em relação ao S2.

Figura 8: Curvas de distribuição de potássio (K), para a concentração de 3000 ppm, ajustadas pelo modelo STANMOD para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) (em que C/Co é a concentração relativa).

Tabela 6: Parâmetros de transporte de potássio para os solos Argissolo Amarelo (S1) e Latossolo Vermelho Amarelo (S2) na concentração de 3000 ppm.

Solo	BTC	P	R	ν (cm min ⁻¹)	λ (cm)	D (cm ² min ⁻¹)	q (cm min ⁻¹)	ρ (kg dm ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)
S1	1	19,11	0,81	2,50	1,07	2,68	1,27	1,34	0,51
	2	16,49	0,74	2,46	1,24	3,06	1,24	1,35	0,50
	3	20,57	0,76	1,86	0,99	1,85	1,11	1,09	0,60
S2	1	11,29	0,82	2,35	1,81	4,26	1,16	1,38	0,49
	2	33,98	0,77	2,26	0,60	1,36	1,09	1,41	0,48
	3	4,07	0,94	1,73	5,03	8,68	0,79	1,47	0,46

Os valores de fluxo da solução (q) foram inferiores na repetição 3 do S1 e S2 (Tabela 6) diante as demais colunas, estes resultados podem ser creditados ao processo de preenchimento das colunas.

Os valores obtidos de número de Peclet (P) para o S1 (média de 18,72), em todas as repetições (Tabela 6), foram superiores aos obtidos para o S2 (média de 16,45) o que confirma as maiores velocidades (média de 2,27) no primeiro caso, devido à predominância de macroporos, responsáveis diretos pela condução da água no solo durante os processos de infiltração, concordando com o comportamento obtido no tratamento 2 (2000 ppm).

Contrariando o fator de retardamento (R), onde os maiores valores ocorreram no S2, assim como o comportamento obtido para o tratamento 2 (2000 ppm), indicando forte interação entre o cátion e as cargas negativas do solo.

Observando-se as médias das repetições, de cada tratamento, para cada solo, pôde-se constatar que o número de Peclet apresentou-se superior nas amostras de S1, com a média de 33,26, e com o tratamento de 2000 ppm apresentando um P médio de 50,36, enquanto que nas amostras de S2 a média dos tratamentos foi de 14,11, sendo o tratamento de 3000 ppm que apresentou maior número de Peclet médio de 16,45. De acordo com Libardi (2005), esta superioridade de um solo sobre o outro está relacionada com a velocidade de advecção, devido à predominância de macroporos, responsáveis diretos pela condução da água no solo durante os processos de infiltração.

O número de Peclet é, de acordo com Nkedi-Kizza *et al.* (1983) e Schulin *et al.* (1987), considerado mais uma característica do meio poroso do que do soluto utilizado, desde que o coeficiente de difusão deste seja insignificante. Pode existir linearidade entre a velocidade e o coeficiente de dispersão, caso o número de Peclet mantenha-se aproximadamente constante com a variação da velocidade de escoamento.

Os valores do parâmetro fator de retardamento de potássio nos solos apresentaram-se estatisticamente semelhantes, com valores médios totais de 0,87 e 0,91, para S1 e S2 respectivamente, apresentando menores valores nos tratamentos 3 do S1 e do S2, com R médio 0,77 e 0,84, respectivamente, o que pode se explicado pelas características físicas dos solos, onde os dados de porosidade (ρ) e densidade (α) são muito próximos, (ρ de 1,3 g cm⁻³ e 1,38 g cm⁻³ e α de 0,51 g cm⁻³ e 0,49 g cm⁻³ para o S1 e S2, respectivamente), característica de solos arenosos, nestes, a quantidade de argila e matéria orgânica, normalmente são baixas, o que diminui a capacidade de troca catiônica. Os valores de R foram inferiores ao valor unitário em todas as repetições e tratamentos nos dois solos analisados, os casos em que isto ocorre, são caracterizados como, apenas uma fração da fase líquida que participa no processo de transporte, podendo ser o caso em que a substância química está sujeita a exclusão aniônica ou quando há presença relativa de regiões de água imóvel que não participa do transporte convectivo (WIERENGA; VAN GENUCHTEN, 1989). Schulin *et al.* (1987) atribuíram a diminuição do R ao menor tempo de residência do soluto na solução do solo à medida que a velocidade aumenta, provocando menor transferência de massa por difusão para dentro e fora da região com água móvel. Porém, resultados diferentes foram observados por Shukla *et al.* (2003) e Wierenga e van Genuchten (1989) que constataram aumento do R com o aumento da velocidade, para condição de solo saturado e não saturado, respectivamente.

A velocidade de escoamento da solução no solo está diretamente ligada ao fator de retardamento, assim, notou-se que esta foi inferior nos tratamentos 3 do S1 e S2 (v médio 2,27 e 2,11 cm min⁻¹), respectivamente. De acordo com Álvarez-Benedí (1999), a variação na velocidade de escoamento aplicada nas colunas pode afetar os parâmetros de transporte obtidos. Esta variação na velocidade de escoamento pode ter tido influência na determinação do parâmetro R, pois o v médio obtido foi superior no S1 ao S2 (2,56 e 2,45 cm min⁻¹, respectivamente), contrariando os resultados de R médio expostos previamente.

Para a dispersividade, as médias de todos os tratamentos, para cada solo, foram de 0,81 cm e 2,05 cm para S1 e S2 respectivamente, apresentando os menores valores no tratamento 2 do S1 e o tratamento 1 do S2 com valores de λ médio 0,60 cm e 1,57 cm, respectivamente. De acordo com a teoria de transporte de solutos, o coeficiente de dispersão (D) é proporcional à velocidade da solução no solo, tendo como coeficiente de proporcionalidade a dispersividade (λ); logo, este concorda com a dispersividade, sendo assim apresentou resultados médios corroborando com os valores da dispersividade, sendo de

2,06 cm² min⁻¹ e 4,83 cm² min⁻¹ para S1 e S2, respectivamente, e com os valores inferiores nos mesmos tratamentos, D médio de 1,53 cm² min⁻¹ no tratamento 2 do S1 e 4,03 cm² min⁻¹ no tratamento 1 do S2.

O fluxo leva em consideração a velocidade de escoamento, o volume coletado e a área da coluna, sendo assim corrobora com a velocidade de escoamento, apresentando resultados médios superiores no S1 (1,31 cm min⁻¹) em relação ao S2 (1,21 cm min⁻¹), apresentando-se inferior nos tratamentos 3 do S1 e do S2 com valores de q médio em 1,20 cm min⁻¹ e 1,01 cm min⁻¹, respectivamente. A influência da velocidade sobre o coeficiente dispersivo tem sido bem relatada na literatura (BROMLY *et al.*, 2007; LEWIS e SJÖSTROM, 2010).

4.2 Concentração de potássio e umidade do solo ao longo da coluna segmentada

Os valores das concentrações do potássio no perfil da coluna segmentada foram variáveis, de acordo com cada tratamento. Na Figura 9, observa-se o comportamento da concentração de potássio no perfil do Solo 1 (Argissolo Amarelo). Notou-se que as maiores concentrações ocorreram no segundo anel, com as repetições apresentando comportamentos diferentes, percebeu-se ainda que em cada tratamento os valores observados superaram o valor aplicado, em algum momento, no primeiro tratamento dos 1000 ppm aplicados o máximo valor encontrado foi de 1082 ppm, no segundo tratamento dos 2000 ppm aplicados o máximo valor foi de 2099 ppm e no terceiro tratamento dos 3000 ppm aplicados o máximo valor foi de 3939 ppm, a explicação para esse desempenho pode ser advinda da concentração residual de potássio no solo, do adensamento do solo na confecção das colunas, do fator de diluição da pasta saturada, ou ainda a diluição da solução no momento da leitura, o que pode ter influenciado no resultado final.

A maior diferença entre os tratamentos (1000, 2000 e 3000 ppm) foi notada por meio dos valores de concentração relativos aos cinco primeiros anéis, demonstrando que a textura dos solos diferenciou os perfis de potássio principalmente quanto à profundidade de alcance da frente de molhamento na coluna. Esta influência da textura no deslocamento de íons também foi observada por Pinho (2009), analisando a aplicação de potássio em dois diferentes solos. A distribuição de potássio ao longo da coluna apresentou uma tendência típica em todas as repetições para cada tipo de solo. Em todos os tratamentos o íon alcançou o último anel, tal fato pode estar relacionado à concentração residual de potássio no solo, porém as maiores concentrações relativas obtidas foram retidas nos primeiros anéis da coluna. Este efeito está diretamente relacionado à interação do potássio, um cátion, com as cargas negativas

existentes no solo, fazendo com que o mesmo fique eletrostaticamente retido à sua micela.

S1 (Argissolo Amarelo) com solução de K com 1000 ppm de Potássio

S1 (Argissolo Amarelo) com solução de K com 2000 ppm de Potássio

S1 (Argissolo Amarelo) com solução de K com 3000 ppm de Potássio

Figura 9: Concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, ao longo da coluna segmentada, em três repetições, preenchidas com solo não saturado (S1), diante da aplicação de K com 1000, 2000 e 3000 ppm de potássio.

Para a mesma profundidade (20 cm), foram observadas umidades volumétricas médias, no tratamento 1, 28,75%, 28,42% e 21,19%, no tratamento 2, 17,96%, 19,22% e 20,34% e no tratamento 3, 23,39%, 24,07% e 26,25%, respectivamente. O conteúdo de água em cada profundidade, considerando os 3 tratamentos no S1, apresentou-se mais uniforme no tratamento 2, do que nos demais. As variações de densidade ao longo dos anéis são responsáveis pelo comportamento diferente entre as repetições e os tratamentos, apesar do critério estabelecido para preenchimento das colunas, em que se manteve densidade do solo aproximada entre as repetições, provocando as diferenças pontuais de porosidade resultante e os diferentes conteúdos de água observados. A menor capacidade de retenção de água, típica dos solos de textura arenosa ainda pode ter potencializado este efeito.

O sensível aumento da concentração de potássio nos dois últimos anéis em relação aos anéis superiores aconteceu, provavelmente, por causa da diluição no momento de preparo da pasta de saturação. Como não há presença dos íons aplicados nesta fase, o ponto correto da pasta de saturação é mais difícil de ser obtido, sendo superestimado o fator de multiplicação, utilizado para correção das concentrações à umidade final do ensaio experimental. Provavelmente os valores reais de potássio destas camadas são menores do que os mostrados nos gráficos e devem se aproximar da concentração inicial deste íon para cada tipo de solo, como consta na análise química (Tabela 2). Portanto, é importante o correto preparo da pasta de saturação neste tipo de ensaio, já que as concentrações finais de cada soluto aplicado dependem dela.

Na Figura 10, observa-se o comportamento da concentração de potássio no perfil do Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), nota-se que as maiores concentrações ocorreram no segundo e terceiro anéis, exceto para o tratamento com 3000 ppm, onde as maiores concentrações ocorreram nos quarto e quinto anéis. Pode-se verificar ainda que os resultados das repetições divergiram bastante, percebe-se também que os valores observados encontram-se em algum momento superiores aos valores aplicados, assim, no primeiro tratamento, dos 1000 ppm aplicados o máximo valor encontrado foi de 1281 ppm, no segundo tratamento dos 2000 ppm aplicados o máximo valor foi de 2345 ppm e no terceiro tratamento dos 3000 ppm aplicados o máximo valor foi de 3730 ppm, a explicação para este desempenho pode ser devido à concentração residual de potássio no solo ou ainda ao fator de diluição da pasta saturada, o que pode ter mascarado o resultado. A maior diferença entre os tratamentos (1000, 2000 e 3000 ppm), semelhante ao S1, foi notada por meio dos valores de concentração relativos aos cinco primeiros anéis, demonstrando que a textura dos solos diferenciou os perfis de potássio principalmente quanto à sua profundidade de alcance na coluna.

S2 (Latossolo Vermelho Amarelo) com solução de K com 1000 ppm de Potássio

S2 (Latossolo Vermelho Amarelo) com solução de K com 2000 ppm de Potássio

S2 (Latossolo Vermelho Amarelo) com solução de K com 3000 ppm de Potássio

Figura 10: Concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, ao longo da coluna segmentada, em três repetições, preenchidas com solo não saturado (S2), diante da aplicação de K com 1000, 2000 e 3000 ppm de potássio.

Para a mesma profundidade (20 cm), foram observadas umidades volumétricas médias, no tratamento 1, 25,41%, 28,05% e 24,45%, no tratamento 2, 30,43%, 27,17% e 19,39% e no tratamento 3, 27,01%, 24,25% e 32,52%, respectivamente. O conteúdo de água em cada profundidade, considerando os 3 tratamentos, apresentou-se mais uniforme no tratamento 1, do que nos demais, porém comparando o S2 com o S1, pôde-se observar um desempenho do conteúdo de água mais constante ao longo do perfil nos tratamentos. As variações nos perfis já foram previamente explicadas, e a menor capacidade de retenção de água, típica dos solos de textura arenosa pode ter potencializado as variações nas repetições. A explicação para os altos valores de potássio nas camadas superficiais do solo pode ser a retenção natural que ocorre na superfície deste.

4.3 Simulações pelo modelo HYDRUS-1D no deslocamento de potássio e água

Pela Figura 11, podem ser verificados os dados observados e simulados pelo modelo HYDRUS-1D para o deslocamento de potássio e água nas colunas segmentadas de todos os tratamentos do S1 (Argissolo Amarelo). Percebe-se que os perfis de deslocamento de potássio representados pelas simulações comportaram-se próximos dos valores observados, com as concentrações de potássio simuladas concordando com as observadas ao longo das curvas para os três tratamentos. Apresentando concordância com o processo físico experimental, com tendências de deslocamento bem próximas às observadas.

Ainda na Figura 11, para o perfil volumétrico, observa-se que no tratamento 1 a simulação apresentou valores inferiores aos valores observados em todos o perfil da coluna. A média da umidade volumétrica, simulada até a profundidade de 0,49 m, foi de 18% enquanto o valor médio observado foi de 26%. Enquanto que no tratamento 2 observa-se que a simulação obteve valores próximos aos valores observados, mostrando concordância entre ambos, embora os valores observados ainda se encontrem sensivelmente superiores aos valores simulados, a média volumétrica observada, até os 0,49 m, foi de 19% enquanto que a média simulada foi de 16%, já para o tratamento 3 a simulação apresentou valores superiores aos valores observados no perfil da coluna, sendo a média volumétrica observada, na mesma profundidade, de 25%, inferior a simulada, que foi de 39%, isto pode ter sido ocasionado pelo valor médio inicial ter sido alto, o que proporcionou uma simulação superestimada.

Médias das repetições do S1 no tratamento com 1000 ppm

Médias das repetições do S1 no tratamento com 2000 ppm

Médias das repetições do S1 no tratamento com 3000 ppm

Figura 11: Simulação dos perfis de concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, pelo modelo HYDRUS-1D, para o solo S1 (Argissolo Amarelo), comparada com a média das três repetições, para os tratamentos 1000, 2000 e 3000 ppm de concentração de potássio.

Pela Figura 12, verificam-se os dados observados e simulados para o deslocamento de potássio e água das colunas segmentadas de todos os tratamentos do S2 (Latossolo Vermelho Amarelo). Percebe-se que o comportamento dos perfis de deslocamento de potássio representados pelas simulações comportaram-se semelhantemente ao Solo 1, apresentando concordância entre os valores observados e os valores simulados, ao longo das curvas para os três tratamentos, apesar dos valores simulados serem inferiores àqueles observados ao longo das colunas. As médias das concentrações de potássio observadas até a profundidade de 0,49 m, foram de 846 ppm, 1631 ppm e 2390 ppm para os tratamentos 1, 2 e 3, enquanto que as médias simuladas foram de 676 ppm, 1175 ppm e 1907 ppm para os mesmos tratamentos, na mesma profundidade.

Nota-se por meio dos gráficos que, durante as simulações, o modelo assumiu que a frente de molhamento avançou ao passo que satura todos os poros da camada onde se encontra o que pode não ocorrer em condições experimentais ou de campo, pois as soluções a serem aplicadas podem avançar ao longo da coluna, mesmo sem ter saturado a camada em que se encontra, em razão da quantidade de macroporos existentes no solo.

Ainda na Figura 12, para o perfil volumétrico observa-se que os valores observados foram levemente superiores aos valores simulados, em todos os tratamentos. Para o tratamento 1, até a profundidade de 0,49 m, a umidade volumétrica média observada foi de aproximadamente 26%, enquanto que a média simulada, na mesma profundidade foi de 21%, para o tratamento 2, na mesma profundidade obteve-se médias de 26% e 23% para umidade observada e simulada, respectivamente, no tratamento 3 as médias foram de 27% e 24%, para umidade observada e simulada, respectivamente, sendo a simulação subestimada em todos os tratamentos.

O fluxo descendente de solução, por gotejamento, e o fato de não haver lâmina acima da superfície do solo contribuem significativamente para a formação e o aprisionamento de bolhas de ar ao longo da coluna, o que torna a saturação das camadas ainda mais difícil. Uma frente de molhamento mais uniforme e valores de umidade próximos ao da saturação ocorreriam de houvesse um fluxo maior de solução, devido ao incremento do potencial de pressão, relacionado a uma lâmina de água, no potencial total na superfície do solo (PINHO, 2009).

Médias das repetições do S2 no tratamento com 1000 ppm

Médias das repetições do S2 no tratamento com 2000 ppm

Médias das repetições do S2 no tratamento com 3000 ppm

Figura 12: Simulação dos perfis de concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, pelo modelo HYDRUS-1D, para o solo S2 (Latossolo Vermelho Amarelo), comparada com a média das três repetições, para os tratamentos 1000, 2000 e 3000 ppm de concentração de potássio.

Nas simulações para o deslocamento do potássio, no Solo 1, o modelo descreveu de forma satisfatória o comportamento observado em laboratório, descrevendo o processo de movimentação característica do íon potássio, que tende a acompanhar a frente de molhamento ao longo do solo, simulando bem o perfil de umidade volumétrica. Enquanto que, para as simulações no Solo 2 o modelo subestimou os valores observados, porém ainda descreveu de forma satisfatória o movimento de potássio no solo, já para o perfil de umidade volumétrica a simulação apresentou valores muito próximos aos valores observados, tendo descrito satisfatoriamente o processo de deslocamento de água no perfil do solo.

4.4 Desempenho do modelo

Para se obter uma avaliação adequada sobre o desempenho do modelo de simulação foi realizada uma análise conjunta de diversos índices de avaliação, pois, devido às variáveis de cada modelo, pode-se obter concordância ou bom ajuste aos dados experimentais, sem que o processo real em questão tenha sido bem representado. Para o modelo HYDRUS-1D, as simulações realizadas para a dinâmica de potássio e água no solo apresentaram índices aceitáveis de concordância e eficiência.

Observa-se pela Tabela 7 que, ao comparar-se o desempenho do modelo em todas as simulações de potássio no solo realizadas, não houve boa concordância nos tratamentos 1 e 3 do S1, ocorrendo valores negativos de “E” (-26,43 e -0,54, respectivamente) e altos valores de “EAM”, até 617 mg L⁻¹, como também altos valores de “RQEM”, até 169%. Os índices “E_{max}” e “EAM”, que têm unidade variável analisada, têm os valores para cada tratamento só podendo ser comparados entre si, se forem contabilizados percentualmente, uma vez que foram aplicadas concentrações distintas para cada tratamento. Assim, o maior valor de “E_{max}” (353,9 mg L⁻¹), em relação ao valor de aplicação, representa um erro de 35,39% para a simulação do tratamento 1 (1000 ppm de K), porém nos demais tratamentos o “E_{max}” representou um erro inferior a 10%.

O erro absoluto médio (EAM) é a média de todos os erros absolutos percentuais, fornecendo uma indicação do tamanho médio do erro, expresso como uma porcentagem do valor observado, independentemente do erro ser positivo ou negativo (LOPES, 2002).

Para Lewis (1997), o EAM é considerado como uma das medidas de erro mais utilizadas para se avaliar os métodos de previsão. Os altos valores de “EAM” indicam que o modelo subestimou os dados obtidos experimentalmente.

Tabela 7: Índices estatísticos para comparação entre os valores de teor de água e solutos simulados pelo modelo HYDRUS-1D e obtidos experimentalmente, para as diferentes concentrações de Potássio (1000; 2000 e 3000 ppm).

Solo	Tratamento	Índice de comparação*						
		E _{max}	E _{AM}	RQEM	CMR	CD	E	d
Concentração		mg L ⁻¹		%				
S1	1000	353,90	353,90	169,75	0,25	0,31	-26,43	0,62
	2000	139,11	218,15	51,59	-0,23	0,86	0,39	0,94
	3000	292,12	617,17	48,70	-0,21	0,48	-0,54	0,83
S2	1000	63,62	215,61	40,72	-0,48	0,32	0,40	0,92
	2000	176,60	350,00	66,88	-0,59	0,41	0,04	0,94
	3000	62,45	607,59	14,73	-0,45	0,43	0,95	0,92
Teor de água		m³ m ⁻³		%				
S1	1000	0,041	0,071	87,347	-0,543	0,138	-9,695	0,78
	2000	0,012	0,030	29,446	-0,329	0,336	-0,037	0,92
	3000	0,204	0,204	224,204	0,359	0,703	-39,800	-0,30
S2	1000	0,011	0,045	19,818	-0,311	0,308	0,503	0,89
	2000	0,003	0,028	5,022	-0,236	0,487	0,969	0,94
	3000	0,002	0,008	2,618	-0,264	0,990	0,995	0,98

* E_{max} = Erro máximo; E_{AM} = Erro absoluto médio; RQEM = Raiz quadrada do erro médio; CMR = Coeficiente de massa residual; CD = Coeficiente de determinação; E = Eficiência; e d = Índice de concordância de Willmott.

Pelo valor do “RQEM” pode-se ter a ideia do efeito de proporcionalidade entre os diferentes valores observados. Constata-se pelo “RQEM” que, as simulações para os teores de água, mantiveram-se próximas entre si particularmente em cada solo, apresentando no S1 o maior valor no tratamento 3 e no S2 no tratamento 1, sendo de 224% e 19%, respectivamente e, em relação ao soluto, o maior valor ocorreu para as simulações do tratamento 1 do S1 e no S2 no tratamento 2, sendo de 169% e 66%, respectivamente.

Os valores negativos de “CMR” indicam que o modelo superestimou os valores observados de teor de potássio em todas as simulações, e em quase todas as simulações dos teores de água, para o tratamento que apresentou valor positivo de “CMR” indica que o modelo subestimou os dados observados.

Os valores negativos de “E” para as simulações dos teores de solutos no solo indicam que um valor médio dos dados experimentais representa melhor os teores dos solutos do que os valores simulados, corroborando com a inadequação na escolha do modelo de equilíbrio para o transporte de solutos. Para a simulação dos teores de água, onde o “E” aproximou-se a unidade, os resultados indicam pouca diferença entre os valores simulados e observados.

O índice de concordância, “d”, quantifica numericamente a exatidão entre valores estimados e observados de um determinado parâmetro. Variando entre 0 (não há concordância

entre parâmetros estimados e observados) e 1 (concordância total) essa ferramenta indica o quanto a linha de tendência de uma regressão linear difere da linha 1:1, ou seja, o quanto a inclinação desta difere de 1 e o quanto o intercepto desta difere de 0. Para as simulações dos teores de potássio, observa-se que alguns dos valores foram baixos (0,62 e 0,83, para os tratamentos 1 e 3 so S1), comprovando a dificuldade de predição do movimento deste íon, nestes tratamentos, utilizando o modelo de equilíbrio para o transporte de solutos, porém nos demais tratamentos o “d” variou de 0,92 a 0,94, mostrando boa concordância entre os valores simulados e observados, enquanto que, para os teores de água os valores variaram de 0,78 a 0,98, mostrando boa concordância entre os valores simulados e observados, porém pode-se observar que no tratamento 3 do S1 o “d” apresentou-se com valor negativo e baixo (-0,30) o que foi observado previamente através de gráfico no momento da simulação, este valor indica que a simulação apresentou dados divergentes dos dados observados.

4.5 Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade do modelo foi feita com o objetivo de verificar o efeito da variação dos parâmetros de entrada (umidade volumétrica do solo saturado, condutividade hidráulica e os parâmetros n e α da equação de van Genuchten (1980)), sobre as simulações do modelo em relação aos perfis de concentração de potássio e umidade volumétrica do solo, na coluna segmentada de solo. Os parâmetros de entrada sofreram variações de -50% a +50%, e os efeitos foram analisados calculando-se o erro padrão em relação aos resultados simulados com os dados originais, obtidos em laboratório.

Para a variação de $\pm 50\%$ na umidade volumétrica do solo saturado, no Solo 1 (Argissolo Amarelo), com salinidade média de 2 dS m^{-1} e aplicações de potássio (1000, 2000 e 3000 ppm), pode-se observar pela Figura 13A, 13C e 13E que a umidade volumétrica do solo saturado é mais sensível a variações negativas das concentrações de potássio, com maiores erros de 367 ppm, 573 ppm e 1274 ppm para os tratamentos 1, 2 e 3 no perfil de concentração de potássio e tendo-se obtido menores valores de erro padrão nas variações positivas na concentração de 2000 ppm (Figura 13C). Ainda pela Figura 13B, 13D e 13F pode-se verificar que na faixa de $\pm 50\%$ de variação da umidade volumétrica do solo saturado o modelo apresentou-se ligeiramente mais sensível à variação positiva deste parâmetro (Figura 13B; 13F), com valores de erro padrão em 0,09 e 0,19, exceto no tratamento 2 (2000 ppm), que apresentou-se mais sensível à variação negativa com erro padrão em 0,06%, Figura 13D.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 13: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na umidade volumétrica do solo saturado para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Pela Figura 14, pode-se verificar o comportamento da concentração de potássio e umidade volumétrica no perfil do solo saturado. Assim, pelas Figuras 14A, 14C e 14E, verificou-se que ao aplicar o valor da umidade do solo saturado maior que a simulada originalmente a profundidade de alcance da frente de molhamento foi reduzida, sendo esta atingida aos 38, 31 e 35 cm nos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente, enquanto que no padrão simulado pelo modelo o alcance da frente de molhamento foi de 58, 51 e 52 cm respectivamente para os tratamentos 1, 2 e 3. Tal comportamento foi semelhante no perfil de umidade do solo, onde se pôde verificar que o movimento da água no solo da coluna foi influenciado pelas variações, observando redução na profundidade da frente de molhamento ao se aumentar em 50% o valor da umidade volumétrica saturada. Esta redução foi em média de 35 cm e ainda verificando as Figuras 14B, 14D e 14F, pode-se verificar que ao se reduzir o valor da simulação em 50% do valor da umidade volumétrica do solo saturado os valores apresentados ficaram constantes e iguais à umidade inicial do solo na coluna, isto ocorre devido a redução aplicada a este parâmetro ter sido muito alta, característica esta que pode ser bem observada no perfil de concentração de potássio no solo.

Para a variação de ± 50 na umidade volumétrica do solo saturado, no Solo 2 (Latosolo Vermelho Amarelo), com salinidade média de 4 dS m^{-1} e aplicações de potássio (1000, 2000 e 3000 ppm), pode-se observar pelas Figuras 15A, 15C e 15E, comportamento semelhante ao Solo 1, onde a variação da concentração de potássio, foi mais sensível a valores negativos, apresentando valores de erro padrão iguais a 269 ppm, 534 ppm e 865 ppm para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente, sendo estes valores de erros representativos a 437%, 551% e 437% superiores aos menores valores de erros obtidos, que nestas simulações foram os valores relativos as simulações negativas e positivas de 10%, no perfil de concentração de potássio.

Nas Figuras 15B, 15D e 15F, verifica-se que para a variação da umidade volumétrica do solo saturado, o modelo comportou-se da mesma maneira que para a variação da concentração, sendo mais sensível à variação negativa deste parâmetro, com valores de erros de 0,08%, 0,09% e 0,10% para os tratamentos 1, 2 e 3, sendo estes erros representativos a 323%, 367% e 371% superiores aos menores valores de erros obtidos, estes valores foram relativos as simulações negativas e positivas de 10%, no perfil de umidade volumétrica.

Figura 14: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro de entrada umidade volumétrica do solo saturado.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 15: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na umidade volumétrica do solo saturado para o Solo 2 (Latosolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 16: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latosolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro de entrada umidade volumétrica do solo saturado.

Pela Figura 16, pode-se verificar o comportamento da concentração de potássio e umidade volumétrica no perfil do solo saturado para o S2. Assim, pelas Figuras 16A, 16C e 16E, no perfil da concentração de potássio no solo, observou-se que o aumento do valor da umidade do solo saturado diminuiu a profundidade de alcance da frente de molhamento,

sendo esta em média 32 cm para todos os tratamentos, enquanto que a simulação padrão teve média de 51 cm. Tal comportamento foi observado para a aplicação de diferentes concentrações de potássio, porém ao se reduzir em 50% o valor de umidade volumétrica, pôde-se notar que o carreamento do potássio no solo é mais lento, chegando em alta concentração até o final da coluna, não atingindo a concentração inicial do solo. Nas Figuras 16B, 16D e 16F, constatou-se comportamento semelhante ao apresentado pelo Solo 1 e ao perfil de concentração de potássio no solo, tendo a simulação aumentada de 50% uma diminuição na profundidade da frente de molhamento, essa redução foi semelhante ao observado no perfil de concentração de potássio, que ao se reduzir em 50% o valor do parâmetro umidade volumétrica do solo saturado, o perfil de infiltração no solo, para este caso, diferenciou-se dos demais, pois apresentou valores iniciais constantes iguais à umidade inicial aplicada para as profundidades superiores, em média, dos 0 aos 30 cm, obtendo, nas maiores profundidades do perfil na coluna, valores superiores aos valores iniciais de umidade aplicado. Para a variação de $\pm 50\%$ na condutividade hidráulica do solo, no Solo 1 (Argissolo Amarelo), com salinidade média de 2 dS m^{-1} e aplicações de potássio (1000, 2000 e 3000 ppm), pôde-se observar pelas Figuras 17A, 17C e 17E, comportamento semelhante às aplicações anteriores de potássio, onde a variação da concentração de potássio apresentou maior sensibilidade aos valores negativos em relação às variações positivas deste mesmo parâmetro, apresentando os maiores erros de 137 ppm, 141 ppm e 327 ppm para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente. Estes valores representam uma superioridade de 349%, 643% e 346% em relação aos menores valores de erros obtidos, simulações negativas e positivas de 10%, no perfil de concentração de potássio. Corroborando com este resultado, verifica-se pelas Figuras 17B, 17D e 17F, que o modelo apresentou o mesmo comportamento com maior sensibilidade à variação negativa deste parâmetro, com maiores erros de 0,028%, 0,02% e 0,037% para os tratamentos 1, 2 e 3, representando superioridade de 529%, 654% e 408% em relação aos menores valores de erros obtidos, simulações negativas e positivas de 10%. Nas Figuras 18A a 18F, pode-se verificar o comportamento do potássio e umidade volumétrica no perfil do solo. Portanto, nas Figuras 18A, 18C e 18E, nota-se que o aumento do valor da condutividade hidráulica do solo diminui sensivelmente a profundidade de alcance da frente de molhamento, comportamento elucidado nas Figuras 18B, 18D e 18F, onde verifica-se que a simulação aumentada de 50% provocou a diminuição na profundidade da frente de molhamento, essa redução foi, na média, em torno de 5 cm, a profundidade da frente de molhamento do solo padrão foi em média 52 cm, enquanto que ao aumentar o valor deste parâmetro, a frente de molhamento foi de 47 cm, em média, e ao se reduzir em 50% o

valor da condutividade hidráulica do solo nota-se que o perfil apresenta pequenas variações, mostrando um aprofundamento da frente de molhamento. Este comportamento esclarece que a variação da condutividade hidráulica nesse solo, causa pouca influência na profundidade da frente de molhamento para o movimento do potássio e na umidade volumétrica no perfil da coluna segmentada.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 17: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na condutividade hidráulica do solo, para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Figura 18: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro condutividade hidráulica do solo.

Para a variação de $\pm 50\%$ na condutividade hidráulica do solo, no Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), com salinidade média de 4 dS m^{-1} e aplicações de potássio (1000, 2000 e 3000 ppm), notou-se pelas Figuras 19A, 19C, 19E, que a variação da concentração de

potássio, apresentou maior sensibilidade aos valores negativos, apresentando os maiores erros (106, 141 e 284 ppm) sendo estes valores de erros representativos a 1824%, 644% e 567% superiores aos menores valores de erros obtidos, que nestas simulações foram os valores relativos as simulações positivas de 20% e 10%, para os tratamentos 1, 2 e 3 respectivamente, no perfil de concentração de potássio. Corroborando com o perfil de concentração de potássio, verifica-se o perfil da umidade do solo, Figuras 19B, 19D e 19F, na faixa de $\pm 50\%$ de variação da condutividade hidráulica do solo, que o modelo comportou-se de forma semelhante, sendo mais sensível à variação negativa deste parâmetro, com valores de erro de 0,04%, 0,03% e 0,04% para os tratamentos 1, 2 e 3 respectivamente, sendo estes valores representativos a 2085%, 622% e 609% superiores aos menores valores de erros obtidos, que nestas simulações foram os valores relativos as simulações positivas de 20% e 10%, para os tratamentos 1, 2 e 3 respectivamente, no perfil de umidade volumétrica.

Pela Figura 20 verifica-se o desempenho da concentração de potássio e umidade volumétrica no perfil do solo ao se variar o parâmetro condutividade hidráulica do solo, nas Figuras 20A, 20C e 20E, aumentando em 50% o valor da condutividade hidráulica, tem-se uma sensível redução na profundidade atingida pela frente de molhamento, em média 7 cm, ao se reduzir em 50% o valor da condutividade hidráulica a frente de molhamento tem um leve retardamento, em média 3 cm, em comparação com os dados da simulação padrão.

Pelas Figuras 20B, 20D e 20F, observa-se que o perfil de umidade volumétrica segue o mesmo comportamento da concentração de potássio, existindo a diminuição da frente de molhamento ao se aumentar em 50% a variação da condutividade hidráulica do solo, sendo esta diminuição em média de 8 cm.

O perfil de umidade do solo que preenche a coluna assume papel de importância principalmente quando simulado com redução de 50% dos valores originais. O modelo evidenciou que o movimento do potássio é influenciado pelo movimento da solução no solo, observando os gráficos da Figura 20 isto se torna evidente. Quando se reduziu o valor da condutivida hidráulica, o perfil de concentração de potássio se comportou de forma semelhante ao perfil de umidade volumétrica, pois a frente de molhamento obteve as mesmas profundidades.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 19: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação na condutividade hidráulica do solo para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Figura 20: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro condutividade hidráulica do solo.

Para a variação de $\pm 50\%$ no parâmetro “n” do modelo de van Genuchten (1980), no Solo 1 (Argissolo Amarelo), com salinidade média de 2 dS m^{-1} e aplicação de 1000, 2000 e 3000 ppm de potássio, não foi possível simular na variação de -50% do parâmetro “n”, assim,

utilizou-se como último ponto da curva o valor de - 40%. Pôde-se verificar nas Figuras 21A, 21C e 21E, e nas Figuras 21B, 21D e 21F que os comportamentos das variações, da concentração de potássio e da umidade volumétrica foram muito próximos, assim, para as simulações com aplicação de potássio de 1000 e 2000 ppm, ocorreu maior sensibilidade aos valores negativos, apresentando os maiores valores de erros aos 173 e 369 ppm para os tratamentos 1 e 2, respectivamente, estes valores representam uma superioridade de 250% e 554% sobre os menores valores de erros obtidos, relativos as simulações positivas de 10%, no perfil de concentração de potássio. Enquanto que, na aplicação de 3000 ppm pôde-se verificar leve sensibilidade aos valores positivos, sendo o modelo mais sensível à variação positiva deste parâmetro, com o valor de maior erro em 397 ppm, representando um valor de 240% superior ao menor valor de erro obtido, para variação positiva de 10%. Para o perfil de umidade do tratamento 1 (Figura 21B) o maior valor de erro ocorreu na variação de - 30% do valor original, sendo o valor do erro de 0,037%, sendo 315% superior a variação + 10% enquanto que os maiores valores de erros para os tratamentos 2 e 3 foram na variação de - 40%, sendo de 0,057% e 0,047%, respectivamente, significando superioridade de 519% e 326% às variações de + 10%, para o perfil de umidade volumétrica do solo.

Na Figura 22 observa-se o desempenho da concentração de potássio e umidade volumétrica no perfil do solo saturado, assim, na Figura 22A, 22C e 22E, verifica-se que quando se aumenta em 50% o valor do parâmetro “n” aumenta-se a profundidade atingida pela frente de molhamento, em média 10 cm para a aplicação de 1000 e 3000 ppm de potássio, e 20 cm para a aplicação de 2000 ppm de potássio, atingindo, neste caso, o valor inicial de potássio no perfil apenas na última camada da coluna, porém ao se reduzir em 50% o valor do parâmetro “n” a simulação não foi possível, sendo portanto utilizado o valor da redução na variação de 40%, apresentando neste caso, redução na profundidade da frente de molhamento, sendo mais evidente a redução ao se aplicar a simulação com 2000 ppm de potássio, que teve uma diminuição de 20 cm na profundidade atingida pela frente de molhamento, quando comparado com o valor padrão simulado. Nas Figuras 22B, 22D e 22F, observam-se comportamentos semelhantes aos obtidos nos perfis de concentração de potássio, corroborando com a teoria de que o movimento do potássio no solo é influenciado pelo movimento da solução no solo, nitidamente observado pela Figura 22.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 21: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Figura 22: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980).

Para a variação de $\pm 50\%$ no parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980), no Solo 2 (Latosolo Vermelho Amarelo), com salinidade média de 4 dS m^{-1} e aplicação de 1000 ppm, 2000 ppm e 3000 ppm de potássio, pôde-se observar pela Figura 23, que os

comportamentos foram semelhantes, tanto entre os diferentes tratamentos, 1000 ppm, 2000 ppm e 3000 ppm de K, quanto entre os diferentes perfis, concentração de potássio e umidade volumétrica no solo. Observa-se que o parâmetro “n” foi mais sensível a variação negativa em todos os tratamentos, onde pode-se verificar os maiores valores de erros padrão, sendo eles de 147 ppm, 215 ppm e 416 ppm para os perfis de concentração de potássio dos tratamentos 1, 2 e 3, representando valores de 756%, 954% e 849% superiores a variação de +10% que apresentou menores valores de erro padrão obtidos nas simulações, e valores de erro de 0,05%, 0,06% e 0,05% para os perfis de umidade volumétrica dos tratamentos 1, 2 e 3, superiores em 782%, 1015% e 948% com relação a variação de + 10%.

Na Figura 24 ressalta-se o desempenho da concentração de potássio e umidade volumétrica no perfil do solo saturado, onde os comportamentos dos perfis do solo foram semelhantes entre os diferentes tratamentos, 1000 ppm, 2000 ppm e 3000 ppm de K.

Na Figura 24A, 24C e 24E, observa-se que ao se reduzir a variação em 50% do parâmetro “n” há um retardamento da frente de molhamento em comparação ao padrão simulado, sendo uma redução média de 10 cm, porém ao se aplicar variação positiva de 50%, existe um aumento na profundidade da frente de molhamento de 5 cm em média.

Nas Figuras 24B, 24D e 24F, onde é representado o perfil da umidade volumétrica do solo, as simulações variando em $\pm 50\%$ do parâmetro “n”, mostraram resultados semelhantes aos obtidos no perfil da concentração de potássio, mostrando a influência do movimento da água no solo sobre a movimentação do potássio. Ainda pode-se observar nas Figuras 24B, 24D e 24F que o modelo ao simular o movimento da água, tem tendência a aumentar a umidade volumétrica nas camadas inferiores, após atingir o valor de umidade volumétrica inicial aplicado.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 23: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Figura 24: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latosolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “n” da equação de van Genuchten (1980).

Para a variação de $\pm 50\%$ no parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980), no Solo 1 (Argissolo Amarelo), com salinidade média de 2 dS m^{-1} e aplicação de 1000 ppm, 2000 ppm e 3000 ppm de potássio, pôde-se verificar, que o comportamento foi semelhante, tanto na variação da concentração de potássio, Figuras 25A, 25C e 25E, quanto na umidade

volumétrica, Figuras 25B, 25D e 25F, corroborando com o comportamento natural, onde o soluto tem mobilidade de acordo com o movimento da água no solo. Verificou-se ainda que ocorreu maior sensibilidade aos valores negativos, sendo o modelo mais sensível à variação negativa deste parâmetro.

Como o modelo foi mais sensível à variação negativa em todos os tratamentos, pode-se conferir os maiores valores de erros padrão, sendo eles de 85, 39 e 273 ppm para os perfis de concentração de potássio dos tratamentos 1, 2 e 3, representando a superioridade de 586%, 989% e 622% em relação aos menores valores de erro obtidos, variações positivas e negativas de 10%, e para os perfis de umidade volumétrica observa-se valores de erros de 0,014%, 0,008% e 0,025% para os tratamentos 1, 2 e 3, representando superioridade de valores de erros padrão em 775%, 990% e 863% em relação aos menores valores de erro obtidos na variação positiva de 10%.

Na Figura 26 observa-se o comportamento da concentração de potássio e umidade volumétrica no perfil do solo saturado, assim, nas Figuras 26A, 26C, 26E, verifica-se que o comportamento das variações de $\pm 50\%$ no parâmetro “ α ” foi muito sutil tanto no perfil de concentração de potássio, com redução de apenas 1 cm, em média, na profundidade atingida pela frente de molhamento, ao se aumentar em 50% o valor do parâmetro “ α ”, e o aprofundamento da frente de molhamento, em média 2 cm, ao se reduzir em 50% o valor do parâmetro “ α ”, quanto no perfil de umidade volumétrica.

Nas Figuras 26B, 26D e 26F, observa-se comportamentos semelhantes aos obtidos nos perfis de concentração de potássio.

A umidade inicial do solo que preencheu a coluna também assume um valor expressivo, pois quando são aplicadas variações negativas, ou seja, quanto menor o valor da umidade inicial do solo, o processo de infiltração se destaca.

Nos tratamentos 1, 2 e 3 a frente de molhamento atinge maiores profundidades ao se reduzir em 50% o valor de “ α ”, porém ao observar-se mais detalhadamente o perfil de umidade volumétrica nota-se que o tratamento 3 tem uma queda antecipada na infiltração, começando a reduzir o valor de umidade aos 30 cm, apesar de atingir 53 cm na frente de molhamento até chegar na umidade inicial.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 25: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Figura 26: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 1 (Argissolo Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980).

Para a variação de $\pm 50\%$ no parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980), no Solo 2 (Latosolo Vermelho Amarelo), com salinidade média de 4 dS m^{-1} e aplicação de 1000 ppm, 2000 ppm e 3000 ppm de potássio, pôde-se observar pela Figura 27, que os comportamentos foram semelhantes, tanto entre os diferentes tratamentos 1000 ppm,

2000 ppm e 3000 ppm de K, quanto aos perfis de concentração de potássio e umidade volumétrica no solo. Observa-se que o parâmetro “ α ” foi mais sensível à variação negativa, onde se podem verificar os maiores valores de erros padrão.

Como o modelo apresentou maior sensibilidade às variações negativas em todos os tratamentos, verificou-se para os perfis de concentração de potássio os maiores valores de erros padrão de 36 ppm, 51 ppm e 126 ppm, para os tratamentos 1, 2 e 3, representando superioridade de 943%, 755% e 711% em relação aos menores valores de erro obtidos, variações positivas e negativas de 10%, e para os perfis de umidade volumétrica observa-se valores de erro de 0,016%, 0,014% e 0,018% para os tratamentos 1, 2 e 3, representando superioridade de valores de erro padrão em 907%, 1012% e 898% com relação aos menores valores de erro obtidos nas variações negativas e positivas de 10%, para os tratamentos 1, 2 e 3.

Nas Figuras 28A, 28C e 28E, pode-se verificar que com o aumento na variação de 50% o valor do parâmetro “ α ” reduz sensivelmente a profundidade atingida pela frente de molhamento, em média 2 cm, quando comparada aos valores padrões simulados, porém reduzindo em 50% o valor do parâmetro “ α ” tem-se sutil aprofundamento da frente de molhamento, em média 5 cm, quando comparado com o valor padrão simulado.

Nas Figuras 28B, 28D e 28F, observa-se comportamentos semelhantes aos obtidos nos perfis de concentração de potássio.

Nos tratamentos 1, 2 e 3 a frente de molhamento atinge maiores profundidades ao se reduzir em 50% o valor de “ α ”, porém ao observar-se mais detalhadamente o perfil de umidade volumétrica nota-se que os tratamentos têm uma queda antecipada na infiltração, começando a reduzir os valores de umidade em média aos 20 cm, apesar de atingir 57 cm na frente de molhamento até chegar na umidade inicial.

Conclui-se mediante a análise de sensibilidade que os todos os parâmetros de entradas analisados, umidade volumétrica do solo saturado, condutividade hidráulica e os parâmetros n e α do ajuste da curva de retenção foram mais sensíveis em relação às variações negativas. Efeito diferente foi encontrado apenas no Solo 1 (Argissolo Amarelo), na aplicação de 3000 ppm de K, onde a sensibilidade da umidade volumétrica do solo saturado apresentou-se mais sensível em relação às variações positivas deste parâmetro.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 27: Erro padrão obtido pela análise de sensibilidade do modelo em relação à simulação da concentração de potássio (a; c; e) e do perfil de umidade do solo (b; d; f) na coluna, aplicando de - 50% a + 50% de variação no parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo), concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm.

Figura 28: Perfis de concentração de potássio (a; c; e) (para as concentrações de 1000, 2000 e 3000 ppm) e da umidade volumétrica do solo (b; d; f) para o Solo 2 (Latossolo Vermelho Amarelo) quando submetido às variações positivas e negativas do parâmetro “ α ” da equação de van Genuchten (1980).

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- a) O software HYDRUS-1D mostrou-se diferenciado nas simulações dos perfis de umidade do solo e eficiente para o deslocamento de potássio, para ambos os solos (Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo), em condições salinas;
- b) Utilizando-se o modelo de equilíbrio para o transporte de solutos no solo, o *software* HYDRUS-1D mostrou-se eficiente para simular o deslocamento do íon potássio em ambos os solos (Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo), em condições salinas;
- c) Mediante a análise de desempenho, para simulação do deslocamento do íon potássio, em condições de solos salinos, o *software* HYDRUS-1D revelou-se eficiente, mas indicou que dependendo da situação poderá ser necessária a estimativa de um maior número de parâmetros para uma melhor simulação de movimento de um determinado íon;
- d) Mediante a análise de sensibilidade, ao simular as concentrações de potássio e umidade do solo, analisando-se os parâmetros de umidade volumétrica do solo saturado, condutividade hidráulica e os parâmetros n e α do ajuste da curva de retenção, o *software* mostrou-se com maior sensibilidade quando foi submetido às variações negativas de seus valores.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, M.A.K.; CAMARGO, O.A. Fator de Retardamento e Coeficiente de Dispersão-Difusão para o Crômio (III) em Solos muito intemperizados, influenciados pelo pH, Textura e Matéria Orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 209-216, 2001.
- ALFARO, M.A.; JARVIS, S.C.; GREGORY, P.J. Factors affecting potassium leaching in diferente soil. **Soil use and Management**, Denmark, v. 20, n.2, p. 182-189, 2004.
- ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; ISLA, T.; CARTÓN, A.; BOLADO, Y.S. Efecto de la velocidade de flujo em los parámetros de transporte de solutos. In: MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; TASCÓN, C. (Ed.). **Estudios em la zona no saturada del suelo**. La Laguna: ICIA, p. 157-161, 1999.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade de água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. FAO. Estudos Irrigação e Drenagem, 29.
- BARROS, A.C.; FOLEGATTI, M.V.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Irriga**, v.15, p.361-372, 2010.
- BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: American Elsevier, 1972. 764 p.
- BIGGAR, J.W., NIELSEN, D.R. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. **Water Resources Research**, v. 12, p. 78-84, 1976.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Manejo da água e nutrientes para o pepino em ambiente protegido sob fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 251-255, 2002.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome. **Seminário**. Disponível em < <http://www.mds.gov.br/segurancaalimentar/desenvolvimentoterritorial/semiarido>> acesso em 15/04/2014.
- BROMLY, M., HINZ, C. AYLMORE, L.A.G. Relation of dispersivity to properties of homogeneous saturated repacked soil columns. British Society of Soil Science, **European Journal of Soil Science**, v. 58, p. 293-301, 2007.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**, Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins, 1964.
- BULL, L.T. **Influência da relação K/(Ca + Mg) do solo na produção de matéria seca e na absorção de potássio por gramínea e leguminosa forrageiras**. 1986. 107 p. Tese. (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1986.
- BURDINE, N.T. **Relative permeability calculation from size distribution data**. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineering 198, 71-78. 1953.

BURGUEÑO, H. **La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico.**

Culiacán: BURSAR, 1996. v.1, 45p.

CARRIJO, A.O.; SILVA, W.L.C.; MAROUELLE, W.A.; SILVA, H.R. Tendências e desafios da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V. (Org.). **Fertirrigação: citros, flores e hortaliças.** Guaíba-RS: Agropecuária, cap. 1, p.155-169, 1999.

CARRIJO, O.A., SOUZA, R.B. DE, MAROUELLI, W.A., ANDRADE, R.J. DE.

Fertirrigação de hortaliças. Brasília: DF EMBRAPA-HORTALIÇAS, 13p. (Circular Técnica n. 32), 2004.

CHAVES, H.M.L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do solo em diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 33-37, 2009.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **SciELO**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

CONTI, J. B. As consequências de uma relação conflituosa Homem x meio: desmatamento e desertificação. In: CONTI, J. B. **A geografia Física e as relações sociedade/natureza no mundo tropical.** USP. P. 19-22. São Paulo. 1997.

CORREA, M.M.; LIMA, L.A.; MARTINEZ, M.A.; RIGINATO, R.L.O.; SAMPAIO, S.C. Deslocamento miscível de sulfona de aldicarbe em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 217-221, 1999.

COSTA, J.L. PRUNTY, L. Solute transport in fine sandy loam soil under diferente flow rates. **Agricultura Water Management**, v. 83, p. 111-118, 2006.

COSTA, S.N.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; RAMOS, V. B. N. Mobilidade de nitrato em coluna de solo sob condições de escoamento não permanente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 190-194, 1999.

DIAS, N.S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido.** Piracicaba, 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.

DIAS, N.S.; BLANCO, F.F. **Efeito dos sais no solo e na planta.** In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C.F. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados.** Fortaleza: INCT sal, 2010. 472 p.

DUENHAS, L.H.; VILLAS BÔAS, R.L.; SOUZA, C.M.P.; RAGOSO, R.A.; BULL, L.T. Fertirrigação com diferentes doses de NPK e seus efeitos sobre a produção e qualidade de frutos de laranja (*Citrus sinensis* O.) ‘Valência’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, p.214-218, 2002.

EMBRAPA. **Principais solos do semi-árido do nordeste do Brasil.** 2005. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/34392/1/OPB1114.pdf>>. Acesso em: 16 abril 2014.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: CNPS, 1999. 412p.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas**: princípios e perspectivas. São Paulo: EDUSP, 341p. 1975

EVANGELISTA, A.W.P.; FERREIRA, P.A. Análise de sensibilidade do sistema de drenagem agrícola-DAS mediante variação dos parâmetros de entrada. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 30, n. 1, 133-139, jan./fev. 2006.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL; FAEPE, 1994. 227 p.

FERREIRA, P.A. **Transporte de solutos no solo**. Viçosa-MG: UFV, 2007. 30p. (Apostila).

FREIRE FILHO, F.R. RIBEIRO, V.Q., ROCHA, M.M., LOPES, A.C.A. Adaptabilidade e estabilidade da produtividade de grãos de caupi enramador de tegumento mulato. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.5, p.591-598, 2003.

FRIED, J. J. **Groundwater pollution**. New York: Elsevier, 1975.p. 330.

GHEYI, H.R. Problemas de salinidade na agricultura irrigada. In: OLIVEIRA et al.(Orgs). **Agricultura, sustentabilidade e o semiárido**. Fortaleza: UFS/SBCS. p. 123-145, 2000.

GONÇALVES, A.D.M.A. **Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo**. 2007. 83 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

GRATTANS, S.R.; GRIEVE, C.M. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. In: Pessarakli, M. (Ed). **Plant and Crop Stress**. Tucson: Marcel Dekker, pp. 203-226, 1993.

KAMINSKI, J. BRUNETTO, G., MOTERLE, D.F., RHEINHEIMER, D.S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1003-1010, 2007.

KHASAWNEH, F.E. Solution ion activity on plant growth. **Soil Science Society of America Proceedings**, 35 (3): 426-436. 1971

KOOL, J.B.; PARKER, J.C.; VAN GENUCHTEN, M.Th. **ONESTEP**: A nonlinear parameter estimation program for evaluating soil hydraulic properties from one - step outflow experiments. 1985.

KORF, E.P.; MELO, E.F.R.Q.; THOMÉ, A.; ESCOSTEGUY, P.A.V. Retenção de metais em solo da antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de passo fundo – RS. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.2, n.2, p. 43 a 60, 2008.

KRAUSS, A. Potassium effects on yield quality. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, cap. 11, p. 281-299, 2005.

LEIJ, F.J.; BRADFORD, S.A. 3DADE: A computer program for evaluating three-dimensional equilibrium solute transport in porous media, **Research Report No. 134**, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1994.

LEIJ, F. J.; TORIDE, N. N3DADE: A computer program for evaluating nonequilibrium

three-dimensional equilibrium solute transport in porous media, **Research Report No. 143**, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1997.

LEWIS, C. D. **Demand Forecasting and Inventory Control**. New York: Wiley, 1997.

LEWIS, J., SJÖSTROM, J. Optimizing the experimental design of soil columns in saturated and unsaturated transport experiments. **Journal os Contaminant Hydrology**, v. 115, p. 1-13, 2010.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 329 p.

LOPES, R.D. Previsão de Autopeças: Estudo de Caso em uma Concessionária de Veículos. Dissertação de Mestrado. UFSC, 2002.

MAISEL, H., GNUGNOLI, G. Simulation of discrete stochastic systems. Chicago, **Science Research Association**, 465p, 1972.

MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. 2.ed. Piracicaba: Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa, 91 p. (Boletim Técnico, 4), 1980.

MALAVOLTA, E. Nutrição mineral das plantas. In: **Curso de Atualização em Fertilidade do Solo**. Campinas: Fundação Cargill. 33-101, 1987.

MALAVOLTA, E. Potássio – absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfatos, cap. 8, p. 179-238, 2005.

MARSCHNER, H. Functions of mineral nutrients: macronutrients. In: MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, p.231-255, 1995.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2.ed. Academic Press, San Diego, 889 p, 1995.

MARTINEZ, M.A.; SILVA, J.B.G.; PEREIRA, D.R. Modelagem do movimento de sais no solo. In: Hans Raj Gheyi; Nildo da Silva Dias; Claudivan Feitosa de Lacerda. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 1ed. Fortaleza. INCTsal, v. 1, p. 93-113, 2010.

MATOS, A.T. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa-MG**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 110p. (Tese de Doutorado).

MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado**. 2001. 79 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MONCADA, M.P.H. **Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de soluto associadas à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico**. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

MUALEM, Y. A new model of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**. 12, 513–522, 1976.

NACHTIGALL, G.R.; VAN RAIJ, B. Análise e interpretação do potássio no solo. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005, cap. 5, p. 93-118.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Missible displacement: III Theoretical considerations. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 26, p. 216-211, 1962.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Miscible displacement: V. Exchange processes. **Soil Science Society American Proceedings**, v.27, p.623-627, 1963.

NIELSEN, D.R.; VAN GENUCHTEN, M.T.; BIGGAR, J.W. Water flow and solute transport process in the unsaturated zone. **Water Resources Research**, Washington, v.22, n.9, p.89-108, 1986.

NKEDI-KIZZA, P., BIGGAR, J.W., van GENUCHTEN, M.Th., WIERENGA, P.J., SELIM, H.M., DAVIDSON, J.M., NIELSEN, D.R. Modeling tritium and chloride 36 transport through an aggregated Oxisol. **Water Resources Research**, v.19, n.3, p. 691-700, 1983.

NOGUEIRA, F.D.; SILVA, E.B.E.; GUIMARÃES, P.T.G. Adubação potássica do cafeeiro: sulfato de potássio. Washington, DC: SOPIB. 81 p, 2001.

NOGUEIRA, F.P. **Produção, crescimento e marcha de absorção de nutrientes da melancia irrigada com doses crescentes de N e K**. 66f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró-RN, 2011.

OLIVEIRA, R.H.; ROSOLEM, C.A.; TRIGUEIRO, R.M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 439-445, 2004.

PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M.V. (Org.). **Fertirrigação: citros, flores e hortaliças**. Guaíba-RS: Agropecuária. cap. 1, p.1-74, 1999.

PINHO, R.E.C. **Teores de água e solutos no solo: desempenho e sensibilidade do modelo HYDRUS-1D**. 2009. 81 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Española. 1985, 542 p.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **The use saline water for cropproduction**. Rome: FAO, 1992. 133p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 48).

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000. 117p. (Estudos FAO. Irrigação e drenagem, 48).

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1954. 160p. Agriculture Handbook, 60.

RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelos aplicados à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento – Análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n. 3, p. 448-459, 2008.

ROTH, K. **Lecture notes in soil physics**: version 3.2 Stuttgart: University of Hohenheim, Insititute os Soil Science, 180 p. 1996.

RUIZ, H. A.; MIRANDA, J. E.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca, Mg às plantas de arroz. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 1015-1018, 1999.

SCHULIN, R., WIERENGA, P.J., FLÜHLER H., LEUENBERGER, J. Solute transport through a Stony soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 36-42, 1987.

SHUKLA, M.K., ELLSWORTH, T.R., HUDSON, R.J., NIELSEN, D.R. Effect of water flux on solute velocity and dispersion. **Soil Science Society of America Journal**. V. 67, p. 449-457, 2003.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. Piracicaba, 2002. 136p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2002.

SILVA, J.B.G. Tecnologia inovadora para retirada de amostras de solo com estrutura indeformada. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 57p. 2009.

SILVA, L.P. **Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo**. 2013. 106 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

ŠIMŮNEK, J.; KÖHNE, J.N.; KODEŠOVÁ, R.; ŠEJNA, M. Simulating non equilibrium movement of water, solutes and particles using HYDRUS – A review of recent applications. **Soil and Water Resources**, Athens, v. 3, p. 42-51, (Special Edition 1), 2008.

ŠIMŮNEK, J.; van GENUCHTEN, M. Th.; ŠEJNA, M.; TORIDE, N., F. J. LEIJ. The STANMOD Computer Software for Evaluating Solute Transport in Porous Media Using Analytical Solutions of Convection-Dispersion Equation, Versions 1.0 and 2.0, **U.S. Salinity Laboratory**, USDA, ARS, Riverside, California, 1999.

ŠIMŮNEK, J., M. Th. van GENUCHTEN, M. ŠEJNA, Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes, **Vadose Zone Journal**, doi:10.2136/VZJ2007.0077, Special Issue “Vadose Zone Modeling”, 7(2), 587-600, 2008.

SOUZA, F. **Irrigação, desenvolvimento e tecnologia**. Fortaleza: Imprensa Universitária: UFC, 2000, 94 p.

SPARKS, D.L.; HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1985. p. 201-276.

SUDENE. **Pacto Nordeste**: ações estratégicas para um salto do desenvolvimento regional. Recife, 1996. 77p.

SUMNER, M. E. Sodic soils: New perspectives. In: Naidu, R.; SUMNER, M. E.; RENGASAMY, P. (ed). **Australian sodic soils**: Distribution, properties and management. Adelaide: First National Conference and Workshop on Sodic Soils, p. 1-34, 1995.

SZABOLCS, I. Global overview of sustainable management of salt affected soils. **International Workshop on Integrated Soil Management for Sustainable use of Salt Affected Soils**. Filipinas, 1995. Proceeding... Filipinas, Bureau of Soil and Water Management, p.19-38, 1995.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. Soil fertility and fertilizers. 4. ed. **New York: MacMilan Publication**, 754p. 1985.

TORIDE, N.; LEIJ, F.J.; van GENUCHTEN, M. Th. The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. Version 2.0, **Research Report No. 137**, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1995.

VALOCCHI, A.J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective K_d approach. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, n. 4, p. 499-503, 1984.

van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.

van GENUCHTEN, M. Th. Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero order production and first order decay. **Journal of Hydrology** (Amsterdam), v. 49, p. 213-233, 1981.

van GENUCHTEN, M. Th.; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: **Methods of soil analysis**, Part 1. Madison: American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, p.1025-1054, 1986.

WIERENGA, P.J. van GENUCHTEN, M.Th. Solute transport through small and large unsaturated soil columns. **Ground Water**, Westerville, v. 27, n. 1, p. 35-42, 1989.

ZANINI, J.R. Distribuição de água e do íon K no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento. II - Teores de K no bulbo molhado. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v.46, n.1, p.24-38, 1991.

ANEXOS

ANEXO A – Dados de entrada utilizados no RETC, curva de retenção e valores iniciais de θ_r , θ_s , α e n .

Solo 1			
θ_r	θ_s	α	n
0,1	0,39	0,059	1,48
Solo 1	Pressão (cma)	Umidade volume	Umidade peso
1	0	0,35559	0,22955
2	10	0,30464	0,19666
3	20	0,26573	0,17154
4	40	0,15392	0,09937
5	100	0,09921	0,06404
7	300	0,03109	0,02007
8	500	0,05033	0,03249
9	1000	0,04756	0,0307
10	1500	0,04478	0,02891

Solo 2			
θ_r	θ_s	α	n
0,034	0,46	0,016	1,37
Solo 2	Pressão (cma)	Umidade volume	Umidade peso
1	0	0,34594	0,29881
2	10	0,32972	0,28479
3	20	0,29781	0,25723
4	40	0,17129	0,14795
5	100	0,07227	0,06242
7	300	0,05557	0,048
8	500	0,04074	0,03519
9	1000	0,03566	0,0308
10	1500	0,03159	0,02728

ANEXO B1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 1 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 1 (1000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste	VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste
0,075	0,001	0,000	1,200	0,700	0,713
0,150	0,001	0,000	1,275	0,760	0,778
0,225	0,001	0,000	1,350	0,760	0,831
0,300	0,001	0,000	1,425	0,780	0,873
0,375	0,001	0,000	1,500	0,890	0,906
0,450	0,003	0,002	1,575	0,930	0,931
0,525	0,001	0,012	1,650	0,950	0,949
0,600	0,015	0,037	1,725	1,110	0,963
0,675	0,059	0,084	1,800	0,990	0,974
0,750	0,176	0,154	1,875	1,030	0,981
0,825	0,243	0,243	1,950	1,060	0,987
0,900	0,380	0,344	2,025	1,100	0,991
0,975	0,450	0,447	2,100	1,100	0,993
1,050	0,570	0,546	2,175	1,090	0,995
1,125	0,640	0,635	2,251	1,050	0,997
Parâmetros S1 Repetição 1					
P	R	v (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
21,96	1,06	2,76	2,58	0,93	1,31

ANEXO B2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 2 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 1 (1000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,074	0,001	0,000	1,257	0,780	0,881
0,148	0,001	0,000	1,331	0,790	0,919
0,222	0,001	0,000	1,405	1,050	0,945
0,296	0,001	0,000	1,479	1,000	0,963
0,370	0,001	0,000	1,552	1,070	0,976
0,444	0,001	0,003	1,626	1,060	0,984
0,517	0,004	0,016	1,700	1,190	0,990
0,591	0,031	0,052	1,774	1,110	0,994
0,665	0,108	0,119	1,848	1,080	0,996
0,739	0,232	0,216	1,922	1,120	0,997
0,813	0,390	0,333	1,996	1,110	0,998
0,887	0,480	0,457	2,070	1,140	0,999
0,961	0,550	0,574	2,144	1,100	0,999
1,035	0,650	0,678	2,218	1,140	1,000
1,109	0,780	0,763	2,292	1,140	1,000
1,183	0,790	0,831	2,366	1,090	1,000
Parâmetros S1 Repetição 2					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
26,760	0,940	3,230	2,470	0,770	1,290

ANEXO B3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 3 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 1 (1000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,075	0,001	0,000	1,570	0,920	0,992
0,149	0,000	0,000	1,644	0,950	0,996
0,224	0,001	0,000	1,719	1,000	0,998
0,299	0,001	0,000	1,794	1,030	0,999
0,374	0,001	0,000	1,869	1,020	0,999
0,448	0,000	0,000	1,943	1,050	1,000
0,523	0,001	0,003	2,018	1,110	1,000
0,598	0,001	0,016	2,093	1,000	1,000
0,673	0,006	0,056	2,168	1,070	1,000
0,747	0,063	0,138	2,242	1,080	1,000
0,822	0,210	0,261	2,317	1,090	1,000
0,897	0,480	0,409	2,392	1,020	1,000
0,972	0,600	0,558	2,467	1,050	1,000
1,046	0,720	0,688	2,541	1,110	1,000
1,121	0,830	0,792	2,616	1,000	1,000
1,196	0,870	0,868	2,691	1,070	1,000
1,271	0,930	0,920	2,766	1,080	1,000
1,345	0,780	0,953	2,840	1,090	1,000
1,420	0,860	0,973	2,915	1,100	1,000
1,495	0,920	0,985	2,990	1,080	1,000
Parâmetros S1 Repetição 3					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
43,410	0,960	2,910	1,370	0,470	1,30

ANEXO C1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 1 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 2 (2000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,073	0,000	0,000	1,531	1,215	1,000
0,146	0,000	0,000	1,604	1,225	1,000
0,219	0,000	0,000	1,677	1,125	1,000
0,292	0,000	0,000	1,750	1,195	1,000
0,365	0,000	0,000	1,823	1,175	1,000
0,438	0,000	0,000	1,896	1,250	1,000
0,510	0,001	0,000	1,969	1,17	1,000
0,583	0,000	0,001	2,042	1,255	1,000
0,656	0,001	0,010	2,115	1,125	1,000
0,729	0,041	0,058	2,188	1,195	1,000
0,802	0,190	0,182	2,261	1,25	1,000
0,875	0,395	0,383	2,334	1,215	1,000
0,948	0,625	0,603	2,407	1,225	1,000
1,021	0,730	0,782	2,479	1,125	1,000
1,094	0,885	0,896	2,552	1,195	1,000
1,167	0,955	0,957	2,625	1,175	1,000
1,240	0,990	0,984	2,698	1,25	1,000
1,313	1,125	0,995	2,771	1,17	1,000
1,386	1,195	0,998	2,844	1,255	1,000
1,459	1,250	1,000	2,917	1,125	1,000
Parâmetros S1 Repetição 1					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
96,790	0,920	2,220	0,470	0,210	1,330

ANEXO C2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 2 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 2 (2000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,074	0,002	0,000	1,546	1,350	0,998
0,147	0,000	0,000	1,620	1,221	0,999
0,221	0,000	0,000	1,694	1,400	0,999
0,295	0,000	0,000	1,767	1,250	1,000
0,368	0,000	0,001	1,841	1,350	1,000
0,442	0,002	0,009	1,915	1,146	1,000
0,515	0,022	0,045	1,988	1,123	1,000
0,589	0,087	0,127	2,062	1,133	1,000
0,663	0,270	0,258	2,135	1,176	1,000
0,736	0,445	0,413	2,209	1,144	1,000
0,810	0,555	0,569	2,283	1,120	1,000
0,884	0,735	0,702	2,356	1,182	1,000
0,957	0,845	0,804	2,430	1,195	1,000
1,031	0,815	0,878	2,504	1,132	1,000
1,105	0,875	0,927	2,577	1,172	1,000
1,178	0,865	0,957	2,651	1,175	1,000
1,252	0,935	0,976	2,725	1,158	1,000
1,325	1,060	0,986	2,798	1,219	1,000
1,399	0,985	0,993	2,872	1,191	1,000
1,473	1,100	0,996	2,945	1,156	1,000
Parâmetros S1 Repetição 2					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
33,690	0,790	2,570	1,560	0,610	1,350

ANEXO C3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 3 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 2 (2000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,073	0,000350	0,000	1,539	1,085000	0,979
0,147	0,000250	0,000	1,612	1,100000	0,986
0,220	0,000300	0,000	1,685	0,960000	0,990
0,293	0,000250	0,000	1,759	1,000000	0,993
0,366	0,000250	0,003	1,832	1,025000	0,996
0,440	0,001050	0,018	1,905	1,005000	0,997
0,513	0,022000	0,057	1,979	1,020000	0,998
0,586	0,095500	0,128	2,052	1,035000	0,999
0,660	0,235000	0,228	2,125	1,015000	0,999
0,733	0,380000	0,344	2,198	1,045000	0,999
0,806	0,465000	0,463	2,272	0,960000	1,000
0,879	0,625000	0,575	2,345	1,000000	1,000
0,953	0,655000	0,674	2,418	1,025000	1,000
1,026	0,730000	0,755	2,491	1,005000	1,000
1,099	0,835000	0,820	2,565	1,020000	1,000
1,172	0,805000	0,870	2,638	1,035000	1,000
1,246	0,850000	0,908	2,711	1,015000	1,000
1,319	0,920000	0,935	2,785	1,045000	1,000
1,392	0,930000	0,955	2,858	1,150000	1,000
1,466	1,020000	0,969	2,931	1,100000	1,000
Parâmetros S1 Repetição 3					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
20,590	0,860	2,580	2,570	1,000	1,340

ANEXO D1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 1 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 3 (3000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,073	0,001	0,000	1,542	0,990	0,985
0,147	0,000	0,000	1,615	1,053	0,990
0,220	0,000	0,000	1,689	1,187	0,993
0,294	0,003	0,001	1,762	1,037	0,996
0,367	0,001	0,008	1,835	1,073	0,997
0,440	0,006	0,035	1,909	1,160	0,998
0,514	0,066	0,096	1,982	0,900	0,999
0,587	0,157	0,190	2,056	0,940	0,999
0,661	0,320	0,307	2,129	1,017	0,999
0,734	0,510	0,431	2,202	0,807	1,000
0,808	0,587	0,550	2,276	1,120	1,000
0,881	0,647	0,654	2,349	0,990	1,000
0,954	0,703	0,741	2,423	1,053	1,000
1,028	0,733	0,811	2,496	1,187	1,000
1,101	0,833	0,864	2,570	1,037	1,000
1,175	0,900	0,904	2,643	1,073	1,000
1,248	0,940	0,933	2,716	1,160	1,000
1,321	1,017	0,953	2,790	1,120	1,000
1,395	0,807	0,968	2,863	1,143	1,000
1,468	1,120	0,978	2,937	1,233	1,000
Parâmetros S1 Repetição 1					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
19,110	0,820	2,500	2,680	1,070	1,340

ANEXO D2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 2 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 3 (3000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,074	0,003	0,000	1,555	1,270	0,991
0,148	0,000	0,000	1,629	1,070	0,994
0,222	0,000	0,000	1,703	1,070	0,996
0,296	0,000	0,005	1,777	1,103	0,997
0,370	0,005	0,029	1,851	1,093	0,998
0,444	0,028	0,091	1,925	1,000	0,999
0,518	0,153	0,191	1,999	0,900	0,999
0,592	0,337	0,315	2,073	0,940	1,000
0,666	0,500	0,445	2,147	1,017	1,000
0,740	0,627	0,567	2,221	0,807	1,000
0,814	0,697	0,673	2,295	1,120	1,000
0,888	0,787	0,758	2,369	0,990	1,000
0,963	0,690	0,826	2,443	1,053	1,000
1,037	0,707	0,876	2,517	1,187	1,000
1,111	0,927	0,913	2,591	1,037	1,000
1,185	1,000	0,940	2,665	1,073	1,000
1,259	0,930	0,958	2,739	1,160	1,000
1,333	1,173	0,972	2,813	1,120	1,000
1,407	0,980	0,981	2,888	1,143	1,000
1,481	0,733	0,987	2,962	1,087	1,000
Parâmetros S1 Repetição 2					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
16,480	0,740	2,470	3,070	1,240	1,360

ANEXO D3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 3 do Argissolo Amarelo (S1), para o tratamento 3 (3000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,062	0,000	0,000	1,305	0,973	0,972
0,124	0,000	0,000	1,367	1,210	0,980
0,186	0,000	0,000	1,429	1,240	0,986
0,248	0,001	0,000	1,491	1,073	0,991
0,311	0,002	0,002	1,553	0,990	0,994
0,373	0,002	0,013	1,615	1,200	0,996
0,435	0,032	0,044	1,677	1,140	0,997
0,497	0,112	0,104	1,739	0,940	0,998
0,559	0,205	0,192	1,802	1,017	0,999
0,621	0,320	0,300	1,864	0,807	0,999
0,683	0,457	0,415	1,926	1,120	0,999
0,745	0,560	0,527	1,988	0,990	1,000
0,808	0,483	0,629	2,050	1,053	1,000
0,870	0,753	0,716	2,112	1,187	1,000
0,932	0,797	0,787	2,174	1,037	1,000
0,994	0,830	0,842	2,236	1,073	1,000
1,056	0,847	0,885	2,299	1,160	1,000
1,118	0,973	0,918	2,361	1,120	1,000
1,180	0,743	0,959	2,423	1,143	1,000
1,242	0,940	0,959	2,485	1,203	1,000
Parâmetros S1 Repetição 3					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
20,570	0,760	1,860	1,850	1,000	1,090

ANEXO E1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 1 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 1 (1000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste	VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste
0,076	0,012	0,000	1,598	0,900	0,913
0,152	0,007	0,000	1,674	0,955	0,930
0,228	0,010	0,000	1,750	0,965	0,944
0,304	0,011	0,002	1,826	1,030	0,955
0,380	0,008	0,012	1,902	1,070	0,964
0,457	0,009	0,040	1,979	1,040	0,971
0,533	0,044	0,088	2,055	1,050	0,977
0,609	0,130	0,155	2,131	1,070	0,982
0,685	0,275	0,236	2,207	1,080	0,986
0,761	0,350	0,323	2,283	1,080	0,989
0,837	0,472	0,411	2,359	0,930	0,991
0,913	0,534	0,495	2,435	0,930	0,993
0,989	0,585	0,572	2,511	0,930	0,099
1,065	0,605	0,642	2,587	0,930	0,995
1,141	0,660	0,702	2,663	0,930	0,996
1,218	0,696	0,755	2,740	0,930	0,997
1,294	0,750	0,799	2,816	1,070	0,998
1,370	0,780	0,836	2,892	1,050	0,999
1,446	0,850	0,867	2,968	1,030	1,000
1,522	0,860	0,893	3,044	1,050	1,000
Parâmetros S2 Repetição 1					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
11,430	0,990	2,520	4,520	1,790	1,390

ANEXO E2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 2 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 1 (1000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,072	0,009	0,000	1,507	0,890	0,904
0,144	0,013	0,000	1,579	0,900	0,921
0,215	0,016	0,000	1,651	0,960	0,935
0,287	0,012	0,005	1,723	0,960	0,947
0,359	0,023	0,023	1,794	0,940	0,956
0,431	0,048	0,062	1,866	0,970	0,964
0,502	0,095	0,119	1,938	1,020	0,970
0,574	0,160	0,192	2,010	1,020	0,976
0,646	0,260	0,275	2,081	1,010	0,980
0,718	0,389	0,359	2,153	1,020	0,984
0,790	0,485	0,442	2,225	1,030	0,987
0,861	0,545	0,519	2,297	1,060	0,989
0,933	0,630	0,590	2,369	1,040	0,991
1,005	0,660	0,653	2,440	0,960	0,993
1,077	0,695	0,709	2,512	0,990	0,994
1,148	0,720	0,755	2,584	0,995	0,995
1,220	0,770	0,796	2,656	1,020	0,996
1,292	0,780	0,830	2,727	1,020	0,997
1,364	0,855	0,859	2,799	1,020	0,997
1,436	0,820	0,884	2,871	1,020	0,998
Parâmetros S2 Repetição 2					
P	R	v (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
9,470	0,930	2,520	5,440	2,160	1,310

ANEXO E3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 3 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 1 (1000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste	VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste
0,076	0,006	0,000	1,589	1,340	0,996
0,151	0,008	0,000	1,665	1,700	0,998
0,227	0,006	0,000	1,741	1,620	0,999
0,303	0,007	0,000	1,816	1,270	0,999
0,378	0,007	0,003	1,892	1,420	1,000
0,454	0,011	0,022	1,968	2,300	1,000
0,530	0,033	0,076	2,043	1,200	1,000
0,605	0,180	0,175	2,119	1,320	1,000
0,681	0,241	0,311	2,195	1,040	1,000
0,757	0,770	0,460	2,270	1,050	1,000
0,832	0,515	0,598	2,346	1,000	1,000
0,908	0,585	0,716	2,422	1,060	1,000
0,984	0,655	0,808	2,497	1,090	1,000
1,059	0,905	0,874	2,573	1,150	1,000
1,135	0,810	0,920	2,649	1,120	1,000
1,211	0,945	0,950	2,724	1,130	1,000
1,286	1,000	0,970	2,800	0,980	1,000
1,362	1,660	0,982	2,876	1,210	1,000
1,438	1,070	0,989	2,951	1,080	1,000
1,514	0,250	0,994	3,027	1,100	1,000
Parâmetros S2 Repetição 3					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
26,900	0,810	2,810	2,140	0,760	1,390

ANEXO F1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 1 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 2 (2000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste	VP	C/C ₀ Observado	C/C ₀ Ajuste
0,072	0,029	0,000	1,510	0,880	0,879
0,144	0,013	0,000	1,582	0,790	0,900
0,216	0,008	0,000	1,654	0,890	0,917
0,288	0,006	0,002	1,726	1,165	0,932
0,360	0,006	0,012	1,798	0,945	0,944
0,431	0,014	0,036	1,869	0,835	0,953
0,503	0,036	0,079	1,941	1,075	0,962
0,575	0,106	0,139	2,013	1,225	0,968
0,647	0,210	0,211	2,085	0,980	0,974
0,719	0,318	0,289	2,157	0,987	0,979
0,791	0,405	0,370	2,229	0,950	0,983
0,863	0,545	0,449	2,301	0,930	0,986
0,935	0,480	0,523	2,373	0,995	0,988
1,007	0,575	0,590	2,445	1,005	0,990
1,079	0,745	0,651	2,517	0,995	0,992
1,150	0,635	0,704	2,588	1,055	0,994
1,222	0,720	0,751	2,660	1,125	0,995
1,294	0,740	0,791	2,732	0,945	0,996
1,366	0,725	0,825	2,804	0,980	0,997
1,438	0,825	0,854	2,876	0,875	1,000
Parâmetros S2 Repetição 1					
P	R	v (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
10,230	1,000	2,830	5,680	2,000	1,320

ANEXO F2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 2 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 2 (2000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,076	0,007	0,000	1,587	0,900	0,893
0,151	0,005	0,000	1,662	0,980	0,910
0,227	0,007	0,001	1,738	0,850	0,924
0,302	0,004	0,010	1,813	0,995	0,936
0,378	0,008	0,037	1,889	0,930	0,946
0,453	0,025	0,084	1,964	0,940	0,955
0,529	0,096	0,149	2,040	1,010	0,962
0,604	0,233	0,224	2,116	0,965	0,968
0,680	0,360	0,306	2,191	0,910	0,973
0,756	0,465	0,387	2,267	1,065	0,978
0,831	0,525	0,463	2,342	0,990	0,981
0,907	0,555	0,535	2,418	1,035	0,984
0,982	0,590	0,599	2,493	1,225	0,987
1,058	0,580	0,657	2,569	0,930	0,989
1,133	0,690	0,707	2,644	1,130	0,991
1,209	0,695	0,751	2,720	1,005	0,992
1,284	0,730	0,789	2,796	0,970	0,994
1,360	0,810	0,821	2,871	1,170	0,996
1,436	0,875	0,849	2,947	0,940	1,000
1,511	0,790	0,873	3,022	1,010	1,000
Parâmetros S2 Repetição 2					
P	R	v (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
7,950	0,980	3,030	7,820	2,580	1,380

ANEXO F3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 3 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 2 (2000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,076	0,003	0,000	1,602	0,810	0,926
0,153	0,003	0,000	1,678	0,890	0,941
0,229	0,003	0,000	1,754	1,495	0,953
0,305	0,008	0,002	1,831	0,965	0,963
0,381	0,003	0,014	1,907	0,965	0,971
0,458	0,024	0,046	1,983	0,990	0,977
0,534	0,114	0,099	2,059	0,935	0,982
0,610	0,228	0,171	2,136	1,060	0,986
0,686	0,317	0,256	2,212	1,500	0,989
0,763	0,395	0,348	2,288	1,115	0,991
0,839	0,475	0,439	2,365	0,920	0,993
0,915	0,505	0,524	2,441	0,920	0,995
0,992	0,550	0,602	2,517	1,010	0,996
1,068	0,610	0,670	2,593	0,955	0,997
1,144	0,645	0,729	2,670	1,113	0,998
1,220	0,700	0,779	2,746	0,960	0,998
1,297	0,765	0,821	2,822	1,110	0,999
1,373	0,735	0,856	2,898	0,985	1,000
1,449	1,020	0,884	2,975	1,065	1,000
1,526	0,900	0,908	3,051	0,920	1,000
Parâmetros S2 Repetição 3					
P	R	v (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
11,650	0,970	2,040	3,590	1,760	1,400

ANEXO G1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 1 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 3 (3000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,076	0,002	0,000	1,590	0,940	0,967
0,151	0,002	0,000	1,666	0,730	0,975
0,227	0,002	0,001	1,741	0,790	0,981
0,303	0,003	0,011	1,817	0,897	0,986
0,379	0,017	0,044	1,893	0,857	0,989
0,454	0,077	0,107	1,968	1,057	0,992
0,530	0,177	0,196	2,044	0,983	0,994
0,606	0,318	0,300	2,120	0,930	0,995
0,681	0,427	0,406	2,196	0,970	0,996
0,757	0,523	0,507	2,271	1,147	0,997
0,833	0,630	0,599	2,347	0,843	0,998
0,909	0,567	0,678	2,423	1,100	0,998
0,984	0,680	0,744	2,498	1,100	0,999
1,060	0,697	0,799	2,574	1,060	0,999
1,136	0,967	0,843	2,650	1,087	0,999
1,211	0,867	0,878	2,726	0,883	0,999
1,287	0,893	0,905	2,801	0,983	1,000
1,363	0,773	0,927	2,877	1,100	1,000
1,439	0,963	0,944	2,953	1,167	1,000
1,514	1,120	0,957	3,028	1,033	1,000
Parâmetros S2 Repetição 1					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
11,290	0,820	2,350	4,270	1,820	1,390

ANEXO G2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 2 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 3 (3000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,077	0,002	0,000	1,614	0,970	0,999
0,154	0,002	0,000	1,691	1,206	1,000
0,231	0,002	0,000	1,768	1,080	1,000
0,307	0,002	0,000	1,844	1,167	1,000
0,384	0,011	0,002	1,921	1,167	1,000
0,461	0,048	0,020	1,998	0,913	1,000
0,538	0,130	0,082	2,075	1,157	1,000
0,615	0,242	0,203	2,152	1,167	1,000
0,692	0,347	0,367	2,229	1,167	1,000
0,768	0,493	0,537	2,305	1,193	1,000
0,845	0,647	0,688	2,382	0,990	1,000
0,922	0,817	0,803	2,459	1,133	1,000
0,999	0,917	0,882	2,536	1,017	1,000
1,076	0,987	0,933	2,613	1,030	1,000
1,153	0,913	0,963	2,690	1,033	1,000
1,230	0,987	0,980	2,767	1,157	1,000
1,306	1,097	0,990	2,843	1,013	1,000
1,383	1,013	0,995	2,920	1,067	1,000
1,460	1,153	0,997	2,997	1,000	1,000
1,537	1,100	0,999	3,074	1,070	1,000
Parâmetros S2 Repetição 2					
P	R	ν (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
33,980	0,770	2,260	1,360	0,600	1,410

ANEXO G3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de potássio, repetição 3 do Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 3 (3000 ppm de K) e seus respectivos parâmetros de transporte.

VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste	VP	C/C _o Observado	C/C _o Ajuste
0,081	0,004	0,000	1,703	0,870	0,889
0,162	0,002	0,004	1,784	0,883	0,902
0,243	0,013	0,031	1,866	0,877	0,914
0,324	0,054	0,087	1,947	0,907	0,924
0,406	0,144	0,163	2,028	0,907	0,933
0,487	0,250	0,246	2,109	1,167	0,941
0,568	0,373	0,328	2,190	0,943	0,947
0,649	0,440	0,405	2,271	0,997	0,953
0,730	0,533	0,476	2,352	0,940	0,959
0,811	0,570	0,539	2,433	0,990	0,963
0,892	0,623	0,596	2,514	0,887	0,967
0,973	0,660	0,646	2,596	1,083	0,971
1,054	0,663	0,689	2,677	1,100	0,974
1,136	0,633	0,728	2,758	0,990	0,977
1,217	0,687	0,761	2,839	0,997	0,980
1,298	0,700	0,790	2,920	0,910	0,982
1,379	0,747	0,816	3,001	1,013	0,984
1,460	0,757	0,838	3,082	1,173	0,986
1,541	1,010	0,858	3,163	1,067	0,987
1,622	0,817	0,875	3,244	1,030	0,989
Parâmetros S2 Repetição 3					
P	R	v (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	λ (cm)	ρ (kg dm ⁻³)
4,080	0,940	1,730	8,680	5,030	1,480

ANEXO H – Valores observados de teor de potássio e água, em coluna segmentada, para cada repetição em Argissolo Amarelo (S1) e em Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 1 (1000 ppm de K).

Repetição	S1			S2		
	Prof. (m)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	(m ³ m ⁻³)	Prof. (m)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	(m ³ m ⁻³)
Rep. 1	-0,07	720,7756	0,302561	-0,07	1023,262	0,261924
	-0,14	804,0979	0,301991	-0,14	1274,685	0,244213
	-0,21	802,8279	0,279339	-0,21	1241,765	0,254152
	-0,28	732,5167	0,261009	-0,28	1281,333	0,250658
	-0,35	603,3455	0,269583	-0,35	1182,751	0,232448
	-0,42	547,8333	0,271266	-0,42	765,9259	0,247991
	-0,49	159,5558	0,323062	-0,49	364,5145	0,247991
	-0,56	55,72663	0,283995	-0,56	130	0,206066
	-0,53	54,6729	0,294407	-0,53	206,0037	0,070205
	-0,7	4,587138	0,33138	-0,7	73,65361	0,079696
Rep. 2	-0,07	782,8154	0,2629	-0,07	1157,69	0,26641
	-0,14	1082,168	0,234463	-0,14	1093,271	0,284874
	-0,21	816,0866	0,296033	-0,21	1107,544	0,280546
	-0,28	761,418	0,273005	-0,28	1017,704	0,30796
	-0,35	654,6306	0,272814	-0,35	723,392	0,432771
	-0,42	462,4932	0,277455	-0,42	747,1185	0,297753
	-0,49	194,9067	0,280689	-0,49	554,0878	0,270162
	-0,56	65,13277	0,309907	-0,56	204,7644	0,259957
	-0,53	47,77609	0,302891	-0,53	283,4839	0,088476
	-0,7	3,012098	0,328476	-0,7	121,1213	0,084534
Rep. 3	-0,07	904,2586	0,198099	-0,07	994,3637	0,251127
	-0,14	893,4775	0,198171	-0,14	944,2993	0,274216
	-0,21	999,0826	0,211965	-0,21	980,074	0,244553
	-0,28	987,013	0,228442	-0,28	918,317	0,267802
	-0,35	712,549	0,262482	-0,35	1003,792	0,263053
	-0,42	435,6815	0,247202	-0,42	925,4885	0,247372
	-0,49	155,2941	0,234541	-0,49	268,1481	0,232258
	-0,56	89,14627	0,225814	-0,56	842,0416	0,213159
	-0,53	200,6559	0,070026	-0,53	95,62736	0,111828
	-0,7	146,773	0,047124	-0,7	82,82353	0,106158

ANEXO I – Valores observados de teor de potássio e água, em coluna segmentada, para cada repetição em Argissolo Amarelo (S1) e em Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 2 (2000 ppm de K).

Repetição	S1			S2		
	Prof. (m)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	(m ³ m ⁻³)	Prof. (m)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	(m ³ m ⁻³)
Rep. 1	-0,07	1127,63	0,239532	-0,07	1942,551	0,288781
	-0,14	1952,348	0,206119	-0,14	1826,471	0,316054
	-0,21	1931,538	0,17964	-0,21	1842,297	0,304349
	-0,28	1446,388	0,230383	-0,28	2097,828	0,289717
	-0,35	1680,987	0,188802	-0,35	1755,377	0,322344
	-0,42	1388,936	0,168469	-0,42	1386,253	0,302444
	-0,49	1075,133	0,163656	-0,49	1296,25	0,291444
	-0,56	540,713	0,125889	-0,56	769,2257	0,254114
	-0,53	167,6066	0,108484	-0,53	202,4286	0,141355
	-0,7	223,4823	0,044061	-0,7	74,8125	0,120402
Rep. 2	-0,07	1274,278	0,201755	-0,07	1659,848	0,283541
	-0,14	1299,554	0,197092	-0,14	1710,392	0,289277
	-0,21	1486,995	0,192245	-0,21	1849,748	0,271739
	-0,28	1300,719	0,195855	-0,28	1863,736	0,282021
	-0,35	1277,16	0,209167	-0,35	1676,838	0,292473
	-0,42	1021,267	0,193449	-0,42	1620,329	0,282585
	-0,49	727,6826	0,193511	-0,49	1167,8	0,275922
	-0,56	538,3937	0,189267	-0,56	439,074	0,237873
	-0,53	214,7696	0,06531	-0,53	154,8405	0,099942
	-0,7	72,94186	0,09334	-0,7	87,32061	0,092829
Rep. 3	-0,07	1310,019	0,219773	-0,07	2244,862	0,214962
	-0,14	2099,58	0,201043	-0,14	2027,394	0,220546
	-0,21	1770,627	0,203407	-0,21	2345,926	0,193954
	-0,28	1504,555	0,204793	-0,28	2047,166	0,232296
	-0,35	1584,529	0,20328	-0,35	1863,209	0,24508
	-0,42	1104,101	0,186965	-0,42	1850,074	0,233829
	-0,49	677,5167	0,226275	-0,49	1497,062	0,206928
	-0,56	427,3076	0,184673	-0,56	368,7832	0,192882
	-0,53	181,0917	0,104523	-0,53	150,6088	0,102159
	-0,7	128,651	0,064508	-0,7	68,50769	0,097055

ANEXO J – Valores observados de teor de potássio e água, em coluna segmentada, para cada repetição em Argissolo Amarelo (S1) e em Latossolo Vermelho Amarelo (S2), para o tratamento 3 (3000 ppm de K).

Repetição	S1			S2		
	Prof. (m)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	(m ³ m ⁻³)	Prof. (m)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	(m ³ m ⁻³)
Rep. 1	-0,07	1700,363	0,409974	-0,07	2551,675	0,260741
	-0,14	2954,316	0,236177	-0,14	2730,414	0,268091
	-0,21	2988,133	0,233911	-0,21	3129,278	0,270148
	-0,28	3558,978	0,246579	-0,28	3469,452	0,272886
	-0,35	2655,219	0,24574	-0,35	3360,577	0,26667
	-0,42	2401,541	0,250685	-0,42	2889,055	0,254847
	-0,49	2290,503	0,267085	-0,49	2188,516	0,232588
	-0,56	1496,573	0,237111	-0,56	508,1823	0,189001
	-0,53	552,3433	0,221904	-0,53	71,73056	0,174356
	-0,7	483,4257	0,055433	-0,7	49,608	0,149361
Rep. 2	-0,07	2718,413	0,219414	-0,07	2145,341	0,245263
	-0,14	3939,45	0,232254	-0,14	3241,802	0,243339
	-0,21	2788,485	0,240736	-0,21	3009,119	0,242538
	-0,28	2808,637	0,201518	-0,28	3283,126	0,249994
	-0,35	2844,444	0,227819	-0,35	3730,193	0,23202
	-0,42	3302,782	0,196275	-0,42	2779,153	0,236606
	-0,49	2746,746	0,199301	-0,49	1551	0,218831
	-0,56	1664,671	0,190843	-0,56	604,3388	0,136118
	-0,53	890,3585	0,099037	-0,53	110,1852	0,133643
	-0,7	294,0822	0,080505	-0,7	65,23077	0,097448
Rep. 3	-0,07	2136,405	0,254082	-0,07	1841,236	0,344221
	-0,14	1770,72	0,253869	-0,14	2293,243	0,34329
	-0,21	1781,897	0,262528	-0,21	2548,394	0,325222
	-0,28	2024,567	0,255605	-0,28	3142,81	0,316576
	-0,35	1692,768	0,275029	-0,35	2357,983	0,329935
	-0,42	1208,05	0,279195	-0,42	1961,29	0,309531
	-0,49	1026,958	0,274839	-0,49	1460,117	0,311939
	-0,56	686,9388	0,27158	-0,56	587,8125	0,285282
	-0,53	154,0135	0,257156	-0,53	360	0,243916
	-0,7	90,23987	0,095053	-0,7	108,5185	0,189713