

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FRED MIKHAIL CARNEIRO VALÉRIO DE ASSIS

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA DE PÓ DE COCO NA LIXIVIAÇÃO
DE SOLUTOS EM COLUNAS DE SOLO**

RECIFE

2018

Fred Mikhail Carneiro Valério de Assis

Engenheiro Agrícola e Ambiental

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA DE PÓ DE COCO NA LIXIVIAÇÃO
DE SOLUTOS EM COLUNAS DE SOLO**

Orientador: Prof. Dr. **Abelardo Antônio de Assunção Montenegro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RECIFE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

A848i Assis, Fred Mikhail Carneiro Valério de
Influência da cobertura de pó de coco na lixiviação de solutos
em colunas de solo / Fred Mikhail Carneiro Valério de Assis. –
2018.
68 f. : il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Recife, BR-PE, 2018.

Inclui referências.

1. Potássio 2. Sódio 3. Água residuária I. Montenegro,
Abelardo Antônio de Assunção, orient. II. Título

CDD 631

FRED MIKHAIL CARNEIRO VALÉRIO DE ASSIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre.

Influência da cobertura de pó de coco na lixiviação de solutos em colunas de solo

COMISSÃO JULGADORA

Orientador: _____

Prof. Dr. Abelardo A. A. Montenegro
Departamento de Engenharia Agrícola/UFRPE

Examinadores:

Prof. Dra. Arminda Saconi Messias
Instituto Agrônômico de Pernambuco/IPA

Prof. Dr. José Amilton Santos Junior
Departamento de Engenharia Agrícola/UFRPE

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por tudo que Ele é em minha vida e por tudo que Ele tem me proporcionado, por sempre estar ao meu lado me iluminando e orientando em minhas decisões;

À minha noiva Isabela Fernanda, por ser minha conselheira, amiga, companheira, meu suporte em todos os momentos difíceis e bons, por me amar e por toda paciência;

Aos meus pais, Viviane Maria Carneiro de Assis e Marcos Valério de Assis, pelos conselhos e ensinamentos durante toda minha vida, pela educação e confiança que sempre depositaram em mim, que contribuiu para o meu caráter, e por todo amor;

À minha irmã Maria Luíza que sempre me incentivou, pela confiança depositada e que acreditou no meu potencial;

Ao meu orientador Prof. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, pelos ensinamentos e por ter me incentivado a buscar os meus objetivos;

Aos coordenadores Ênio Farias e Mario Rolim e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola; em especial à professora Elvira Pedrosa, pelas contribuições na Estatística da pesquisa e disponibilidade sempre presente;

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFRPE;

À Carlyne Andrade, Adriana Guedes que me auxiliaram e estavam sempre disponíveis em ajudar;

À toda equipe do LAS que participaram direta ou indiretamente; em especial aos amigos que fiz Valdemir Júnior, Sonny Mateus, Thayná Almeida, Cleene Lima, Liliane Pinheiros, José Roberto, Adriano Monteiro, Roberta Queiroz, Robertson Fontes, Célia Silva, Daniela Santos, Ailton Alves, Iug Lopes, Vitor Hugo, Diego Araújo, Tadeu Figueiroa; com vocês tive vários momentos de conversas, estudos, reuniões, conselhos, desabafos, aprendizagem e descontração;

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade;

À CAPES, pela concessão da Bolsa de Estudos; Ao CNPq, FACEPE e FINEP pelo apoio financeiro à realização do estudo.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	10
1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Importância da Água e do seu Reuso.....	15
2.2 A Dinâmica da Água no Solo.....	18
2.2.1 O Solo.....	18
2.2.2 Lei de Darcy	20
2.2.3 Condutividade Hidráulica	22
2.2.4 Tortuosidade	23
2.3 Dinâmica dos Solutos.....	24
2.3.1 Dinâmica da Água e Transporte de Solutos no Perfil do Solo.....	24
2.3.2 Dinâmica de Solutos e Transporte de Solutos no Solo	24
2.3.3 Parâmetros de Transporte de Solutos	27
2.3.4 Curvas de Eluição	32
2.4 Cobertura de Pó de Coco	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 O Solo.....	35
3.2 Análises Físicas e Químicas do Solo.....	36
3.3 Água Residuária Tradada.....	38
3.4 Elaboração das Curvas de Eluição e Preparo das Soluções.....	39
3.5 Parâmetros de Transporte e Análise dos Resultados.....	42
3.6 Delineamento Experimental.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Ensaio para o Íon Sódio.....	47
4.2 Ensaio para o Íon Potássio.....	53
5 CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS.....	61

RESUMO

Nas últimas décadas, tem-se observado o crescimento populacional e os avanços tecnológicos. Com isso, é possível perceber uma maior procura por água, pois embora seja um recurso natural renovável, ainda assim, a água é um recurso finito. Objetivou-se com este trabalho, avaliar a influência da cobertura de pó de coco no transporte de solutos em solos característicos da bacia experimental do Riacho Jatobá, irrigados com efluentes domésticos tratados, dispostos em colunas. Os solos utilizados no estudo encontram-se na bacia experimental do Riacho Jatobá localizada no município de Pesqueira-PE e a água residuária doméstica tratada da Unidade Piloto de Tratamento e Reuso de Esgoto Doméstico Para Fins Produtivos, situado no Distrito de Mutuca, região semiárida de Pernambuco. Foi determinada a curva de eluição dos íons sódio e potássio a fim de que fossem investigados os padrões de transporte de solutos nos tipos de solo, a partir da aplicação de água residuária doméstica tratada com as diferentes coberturas de pó de coco. O delineamento experimental foi em esquema fatorial (2x3), cujos fatores avaliados compreenderam dois tipos de solo (Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo); três tratamentos (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), com cinco repetições, totalizando 30 unidades experimentais. Os parâmetros de transporte dos íons sódio e potássio foram obtidos por ajuste numérico, utilizando-se o software STANMOD. A cobertura de pó de coco mostrou-se eficiente na diminuição da lixiviação de íons nos solos estudados. Houve interação entre soluto – sódio e potássio - solo arenoso. Observou-se maior interação entre o sódio e o solo na cobertura com 2 cm de pó de coco em relação aos demais tratamentos. Para o íon potássio, houve maior interação nas coberturas com pó de coco, sendo as perdas associadas à ausência de pó de coco. Os íons sódio e potássio se deslocaram com transporte predominantemente por difusão. Os valores do fator de retardamento (R) foram superiores para a cobertura com 2 cm de pó de coco no íon sódio, enquanto que para o íon potássio a cobertura com 1 cm apresentou maior R. Os valores do coeficiente de difusão-dispersão variaram de 0,07 a 1,01 $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ para o íon sódio e para o íon potássio de 0,15 a 2,04 $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$, e os valores de dispersividade variaram de 1,68 a 4,60 cm e 3,41 a 28,39 cm para os íons sódio e potássio. O modelo STANMOD apresentou ótimo desempenho de ajuste numérico na simulação do transporte de solutos no solo.

Palavras-chave: Potássio, Sódio, Água residuária.

ABSTRACT

In recent decades, population growth and technological advances have been observed. Hence, it is possible to perceive a greater demand for water, because although it is a renewable natural resource, water is a finite resource. The objective of this work was to evaluate the influence of coconut powder cover on the solutes transport in irrigation with treated sewage reuse in soil columns. Soils used in the study are from the Jatobá Creek experimental basin located in the municipality of Pesqueira-PE and the treated domestic wastewater comes from the Experimental Unit for Treatment and Reuse of Hydro-agriculture (UETRH) located in the Mutuca District, semi-arid region of Pernambuco State. The breakthrough curves for sodium and potassium ions were determined in order to verify the difference between the solutes transport patterns between the soil types, from the application of domestic wastewater treated with the different treatments of coconut powder coating. The experimental design was in a factorial scheme (2x3), whose evaluated factors comprised two types of soil (Litholic Neosol and Yellow Argisol); three treatments (without coconut powder, 1 cm of coconut powder and 2 cm of coconut powder), with five replications, totaling 30 experimental units. The transport parameters of the sodium and potassium ions were obtained by numerical adjustment using the STANMOD software. The transport parameters of the sodium and potassium ions were obtained by numerical adjustment using the STANMOD software. Coverage of coconut powder was efficient in reducing the leaching of ions in the studied soils. There was interaction between solute - sodium and potassium - sandy soil. There was higher interaction between sodium and soil in the cover with 2 cm of coconut powder in relation to the others treatments. For the potassium ion, there was higher interaction in the coconut powder coatings, with the losses associated with the absence of coconut powder. Sodium and potassium ions displaced with transport predominantly by diffusion. The values of the delay factor (R) were higher for the coverage with 2 cm of coconut powder in the sodium ion, whereas for the potassium ion the coverage with 1 cm presented higher R. The values of the diffusion-dispersion coefficient ranged from 0,07 to 1,01 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$ for the sodium ion and for the potassium ion of 0,15 to 2,04 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$, and the dispersivity values varied from 1,68 to 4,60 cm and 3,41 to 28.39 cm for the sodium and potassium ions, respectively. The STANMOD model presented excellent numerical adjustment performance for the simulation of solutes transport in the soil.

Keywords: Potassium, Sodium, Wastewater

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama para determinação da classe textural do solo proposto pelo USDA e adaptado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.....	19
Figura 2 - Localização da bacia experimental do Riacho Jatobá, no município de Pesqueira-PE.....	35
Figura 3 - Área da coleta do esgoto, na Unidade Piloto de Tratamento e Reuso de Esgoto Doméstico Para Fins Produtivos.....	38
Figura 4 - Colunas de solo com seus respectivos tratamentos: sem cobertura de pó de coco mais esgoto; com 1 cm de cobertura de pó de coco mais esgoto e com 2 cm de cobertura de pó de coco mais esgoto.....	40
Figura 5 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de saturação da coluna de solo	41
Figura 6 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de lixiviação da coluna de solo.....	41
Figura 7 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de aplicação e coleta dos efluentes.....	42
Figura 8 - Curvas de eluição do íon sódio (Na^+), ajustadas e observadas pelo modelo STANMOD (em que C/C_0 é a concentração relativa), para as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco e para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo	47
Figura 9 - Curvas de eluição do íon potássio (K^+), ajustadas e observadas pelo modelo STANMOD (em que C/C_0 é a concentração relativa), para as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco e para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise física para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo.....	37
Tabela 2 - Composição do extrato da pasta saturada para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo.....	37
Tabela 3 - Análise físico-química da água residuária.....	39
Tabela 4 - Análise de variância para os íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) para os tratamentos sem cobertura de pó de coco, 1 cm de altura de pó de coco e 2 cm de altura de pó de coco, para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo.....	45
Tabela 5 – Efeito da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon sódio (Na^+) para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo.....	46
Tabela 6 - Influência do tipo de solo na lixiviação do íon potássio (K^+)	46
Tabela 7 - Influência da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon potássio (K^+)	46
Tabela 8 - Parâmetros de transporte de sódio (Na^+) para as coberturas sem de pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo	49
Tabela 9 - Análise de variância do íon sódio (Na^+) para os parâmetros número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente de difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ) com nível de probabilidade de 5 %	51
Tabela 10 – Influência do tipo de solo para os parâmetros de transporte do íon sódio (Na^+)..	52
Tabela 11 - Influência da cobertura do solo com pó de coco para os parâmetros de transporte do íon sódio (Na^+).....	52
Tabela 12 - Desempenho da concentração relativa para os dados estimados frente aos observados	53
Tabela 13 - Parâmetros de transporte de potássio (K^+) para as coberturas sem de pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo	56
Tabela 14 - Análise de variância do íon potássio (K^+) para os parâmetros número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente de difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ) com nível de probabilidade de 5 %	58
Tabela 15 – Influência do tipo de solo para os parâmetros de transporte do íon potássio (K^+)	58

Tabela 16 - Desempenho da concentração relativa para os dados estimados frente aos observados59

1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa “Influência da cobertura de pó de coco na lixiviação de solutos em colunas de solo” aborda assuntos relacionados à água residuária, água subterrânea, dinâmica de água no solo, deslocamento de soluto, condutividade hidráulica, dinâmica de soluto, transporte de soluto, além da cobertura de pó de coco.

A revisão bibliográfica apresenta-se subdividida em tópicos, onde o primeiro trará a importância da água e o seu reuso, focando na conscientização do seu uso e na melhor forma de sua utilização, mediante ao aumento de sua procura que está vinculado ao nível de crescimento populacional, em consequência do desenvolvimento dos centros urbanos e do avanço no desenvolvimento tecnológico, aumentando ainda mais a importância desse recurso, não apenas para uso doméstico, mas também na agricultura e na indústria.

O segundo tópico irá destacar a dinâmica da água no solo e, em relação ao solo. O mesmo possui uma estrutura móvel e é constituído por partículas minerais e orgânicas, além de possuir espaços preenchidos com ar e água, os quais exercem influência sobre a sua porosidade.

O volume que tanto a água quanto o ar ocupam no solo, ou seja, a sua porosidade, irá variar em relação à textura do mesmo, podendo haver solos com maior quantidade de macroporos e microporos. Diante do exposto, é possível compreender como acontece o deslocamento da água no solo, onde, como o estudo irá abordar, ocorre de maneira mais intensa nos macroporos do que nos microporos. Consequentemente, poros de maior dimensão facilitam a entrada de ar, ocorrendo, assim, maior consumo de água das raízes e dos microrganismos.

Ao que se refere à importância das colunas de solo, o trabalho irá apontar a utilização de colunas de solo como uma técnica eficiente, pois facilita o monitoramento do deslocamento de substâncias no perfil do solo e avalia a condição mais aproximada do campo (densidade e umidade), evidenciando os fatores que, como o estudo em questão irá trazer, interfere no mecanismo de transporte de solutos.

Diante disso, ao que diz respeito à dinâmica da água e o transporte de solutos no perfil do solo, o trabalho irá apontar a importância da definição das características gerais de transporte de soluto e o equacionamento vinculado ao transporte de água e do soluto em meios porosos.

Outro ponto destacado na pesquisa bibliográfica é a Lei de Darcy, a qual se refere à primeira equação sugerida pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy, mediante a quantificação do movimento de um líquido em um meio poroso saturado. Porém, na prática, boa parte dos solos não estão sob condições de saturação. Diante disso, adaptou-se a equação de Darcy, considerando a movimentação da solução em condição de solo não saturado.

A fundamentação trará ainda a condutividade hidráulica que é uma característica do solo que retrata a capacidade de transmissão de água do solo, sendo um coeficiente de proporcionalidade entre o fluxo de água e o gradiente de potencial hidráulico apresentado na equação de Darcy.

Ainda sobre a dinâmica de água, a tortuosidade caracteriza uma propriedade para relatar a difusão em meios porosos e configura a relação existente entre a extensão do perfil de uma superfície de solo rugosa e a distância, entre os pontos inicial e final, da referida superfície.

O terceiro tópico retratará a dinâmica de solutos em meios porosos, em particular de íons encontrados no solo em diversas quantidades, que se movimentam a partir de vários procedimentos, onde uma porção pode ser absorvida pelas plantas, outra perdida para as camadas mais profundas do solo e outra pode ser precipitada.

Mediante isso, é possível descrever as propriedades de um determinado íon, como sua interação com o meio; sua movimentação, e sua persistência no solo e isso somado ao uso de padrões matemáticos ajudam numa melhor compreensão dos processos relacionados ao deslocamento de substâncias químicas no solo, apresentando-se como um importante instrumento ao estimar-se os riscos de contaminação e de impactos ambientais.

Esse movimento de solutos no solo pode ocorrer por três tipos de transporte: convecção, onde as partículas de soluto são transportadas pelo fluxo de água; difusão molecular, que é um processo espontâneo decorrente do deslocamento térmico natural de íons e moléculas dissolvidas; e dispersão mecânica, que acontece por causa das variações da velocidade do fluido no interior dos poros em relação à velocidade média de água nos poros. Para que haja uma melhor compreensão, tanto da modelagem quanto da experimentação do transporte de solutos no solo, os processos que controlam o deslocamento de solutos no solo devem ser considerados separados e simultaneamente.

A fim de quantificar o transporte de soluto foram desenvolvidos programas matemáticos, como o DISP e o STANMOD com o objetivo de medir os parâmetros hidrodispersivos, os quais serão calculados a partir do ajuste de dados experimentais,

mediante a uma condição específica de fluxo. O sistema de fluxo em coluna ou deslocamento miscível está relacionado ao procedimento onde um fluido que contém o íon se mistura a outro e o desloca no decurso de uma forma porosa.

O último tópico abordará o efeito da cobertura de pó de coco, a qual vem sendo investigada como substrato agrícola, principalmente, por apresentar alta porosidade e alto potencial de retenção de umidade e solutos, além de ser biodegradável.

A pesquisa teve com hipóteses: 1) O solo sem a cobertura de pó de coco apresenta maiores concentrações de íons de Na^+ e K^+ no lixiviado que os solos com a cobertura de pó de coco e 2) A textura do solo desempenha importância relevante na migração de íons em colunas de solo.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da influência da presença de pó de coco no transporte de solutos em irrigação com reuso de esgoto tratado, em colunas de solo.

Para tanto, buscou-se: 1) Verificar a qualidade do efluente tratado no lixiviado quanto à condutividade elétrica (CE), potencial Hidrogeniônico (pH), na presença e ausência de pó de coco; 2) Determinar as quantidades primárias do solo, Densidade do solo (D_s), Densidade de partícula (D_p), Porosidade (P), Volume de poros (V_p) e sua dinâmica temporal; 3) Verificar a eficiência da cobertura de pó de coco no controle do transporte de solutos em irrigação com reuso de esgoto tratado; 4) Estimar os parâmetros de transporte (P, R, D, λ , ν) dos íons sódio e potássio em diferentes coberturas de pó de coco; 5) Avaliar o desempenho do modelo STANMOD na estimativa dos parâmetros de transporte.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da Água e do seu Reuso

A utilização da água de maneira consciente possui caráter interdisciplinar. Refletir sobre o uso eficiente da água permite maior cuidado quanto ao seu consumo, trazendo maior clareza quanto aos objetivos de utilização, ou seja, por que, para que, como e o que se consome água? Assim fica mais fácil de obter controle de gastos excessivos quanto ao consumo, garantindo, então, a qualidade e a quantidade dessa água que será devolvida à natureza, o que trará maiores possibilidades quanto à preservação do seu ciclo e, portanto, conservando sua disponibilidade (SANTOS JÚNIOR et al., 2013).

Ao observar o aumento da população, o desenvolvimento dos centros urbanos, a melhoria nos padrões de vida e o desenvolvimento da tecnologia, é possível perceber o aumento da procura por água, não apenas para uso doméstico, mas também para a agricultura e a indústria (AGRAFIOTI; DIAMADOPOULOS, 2012). Por isso, é importante enfatizar que embora seja um recurso natural renovável, ainda assim, a água é um recurso finito, pois mediante ao crescimento contínuo das necessidades humanas, torna-se impossível sua infinitude (ROLIM et al., 2016).

De acordo com a Constituição Brasileira, o abastecimento da população é considerado prioridade no uso da água, sendo seguida pelas indústrias e, em terceiro lugar, pela irrigação. Segundo Rolim et al. (2016) o processo de irrigação é o uso que mais utiliza água. O que acaba tornando necessário o uso de meios diferentes de água para esse processo, facilitando a realocação dos recursos hídricos utilizados para outros propósitos.

O homem possui uma relação mútua frente à utilização da água, pois é de extrema importância compreender a relevância do uso eficiente dos recursos hídricos em todos os espaços, para promover sua sustentabilidade (ROCHA; SILVA; BARROS, 2010).

Souza et al. (2015), enfatizando os danos do lançamento in natura dos efluentes nos corpos hídricos, devido à sua elevada carga de matéria orgânica e outros elementos que nele contém, destacam que a utilização destes resíduos deve ser alvo de estudos e práticas que promovam o seu reaproveitamento, como um potencial alternativo na economia de recursos naturais e produção agrícola.

No entanto, apesar dos efluentes possuírem potencialidade de uso na agricultura, ainda há falta de tradição na sua reciclagem e reuso, principalmente no Brasil. Em consequência,

existem poucas informações disponíveis sobre os efeitos de sua disposição nos solos. Deste modo, torna-se evidente a importância de estudar os efeitos decorrentes da disposição de efluente de esgoto tratado no solo e no ambiente (SIMÕES et al., 2013). Perante isso surge o reuso da água, com elevado potencial para atenuar a escassez hídrica em diversas regiões (CHEN et al., 2013).

Diversos autores têm pesquisado o potencial e os efeitos do reuso de águas residuárias em diferentes culturas, entre eles Andrade et al. (2005), que analisaram o efeito do reuso de efluentes de esgoto em solos cultivados com milho, e constataram o potencial dos Argissolos para suporte à disposição controlada de efluentes domésticos, principalmente em regiões sujeitas a lençol freático raso; Freitas et al. (2012), que se aprofundaram no estudo sobre o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar irrigada sob diferentes lâminas de águas residuárias tratadas, e conseguiram observar que a irrigação com água de esgoto doméstico tratado possibilitou maiores valores de diâmetro do colmo, altura das plantas e altura do colmo, e que a água pode ser utilizada para a irrigação da cana-de-açúcar; e Almeida et al. (2012), que avaliaram o crescimento de plantas de maracujazeiro fertirrigadas com efluente doméstico tratado, e verificaram que o uso de efluente doméstico tratado impactaram positivamente o desenvolvimento das plantas.

A fim de melhor compreender o processo reuso da água, torna-se importante entender o conceito de água residuária, cuja principal característica é o englobamento dos despejos provenientes das diversas formas de uso, como o uso residencial, comercial, industrial, de estabelecimentos públicos, áreas agrícolas, dentre outros (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; JORDÃO; PESSOA, 1995; BRAGA et al., 2002), ressaltando a água residuária doméstica como uma das principais águas utilizadas para o reuso (MEDEIROS et al., 2008).

Segundo Freitas et al. (2012), o reuso de água residuária doméstica na atividade agrícola influencia no processo de reciclagem dos nutrientes encontrados no esgoto residencial, possibilitando a diminuição do uso de fertilizantes, além de facilitar a redução dos processos que degradam a natureza.

Uma importante aplicação prática foi à pesquisa desenvolvida por Miranda (2010), sobre os efeitos de diferentes lâminas de irrigação com água residuária pré-tratada e adubação orgânica no crescimento e rendimento do algodoeiro cultivar BRS Safira CNPA, 01-55, desenvolvida na “Unidade Piloto de Tratamento e Reuso de Esgoto Doméstico Para Fins Produtivos”, situado no Distrito de Mutuca-PE, região semiárida de Pernambuco, tendo sido observado que os maiores valores de produção da cultura foram alcançados para a maior

lâmina de irrigação aplicada com água residuária pré-tratada, com reatores anaeróbios. Essa pesquisa contribuiu para a disseminação e o empoderamento das tecnologias referentes aos tratamentos e reuso de esgotos domésticos.

Ainda é relevante citar o processo de reuso adotado pela cidade de Pequim, a fim de reduzir o uso de água potável subterrânea, o que, com políticas nacionais de incentivo ao processo, tornou-se crescente o volume de águas residuárias tratadas e recuperadas para uso agrícola. A utilização de águas residuárias em Israel também é bastante difundida, pois nesse país a escassez hídrica é uma realidade, e o reuso é parte fundamental para a agricultura da região (SOUZA FILHO, 2013).

Os esgotos domésticos são aqueles produzidos por residências, instalações públicas e comerciais, cada uma com características bem definidas, ainda que possuam propriedades distintas em suas produções. Os esgotos são compostos basicamente de 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos, dentre eles, resíduos orgânicos e detergentes (VON SPERLING, 1996; BRAGA et al., 2002).

Segundo Santos (2008), os efluentes de estação de tratamento de esgotos domésticos são águas residuárias ricas em matéria orgânica e nutrientes que podem provocar prejuízos graves ao meio ambiente se depositadas nos corpos d'água. Contudo, estas mesmas características podem, com manuseio apropriado, promover benefícios quando aplicados a sistemas de produção agrícola. De acordo com Telles e Costa (2007), a aplicação controlada do tratamento de esgoto no solo é uma forma eficaz de controle da poluição e um caminho viável para aumentar as disponibilidades de água das regiões áridas e semiáridas.

Nos últimos anos, é nítida a necessidade de um olhar mais amplo para a preservação do meio ambiente, principalmente no que se refere à escassez hídrica. A quantidade de água presente no planeta é praticamente a mesma de, aproximadamente, dois bilhões de anos; porém, de toda a água presente no planeta, 97 % se caracteriza como água salgada e 3 % como água potável. Ainda desses 3 %, apenas 1 % está disponível para consumo direto, visto que o restante está presente nas geleiras e calotas polares. Assim, o aumento da produção de resíduos gerados pode reduzir sensivelmente tal disponibilidade, devido à poluição do solo, das águas superficiais e subterrâneas (ANDRADE, 2014).

Segundo Duarte (2006), uma possível alternativa para reduzir a escassez hídrica e, ao mesmo tempo, a geração de resíduos, é a reutilização da água de esgoto tratada. A utilização de águas residuais tratadas na agricultura apresenta muitas vantagens econômicas e ambientais, quando empregadas no solo de forma apropriada. De acordo com Santos et al.

(2010), o uso de águas residuárias na agricultura surge como uma opção para o seu descarte adequado, contribuindo para a conservação da água disponível e enriquecendo o aporte e reciclagem de nutrientes. Diante disso, pode-se dizer que o reuso auxilia na preservação do meio ambiente, pois ao ser efetuado de maneira adequada, a utilização de águas residuárias na irrigação possibilita acumular boa porção da água de boa qualidade (ANDRADE et al., 2005).

Com relação ao solo, quando ocorre sua irrigação com água de reuso de esgoto doméstico tratado, as suas condições de fertilidade de conteúdos de matéria orgânica podem se tornar melhores (CHEN et al., 2013). Para uma correta aplicação da água residuária no solo, é fundamental considerar as características do efluente, o objetivo da reutilização, a técnica de tratamento adotada e, também, promover o monitoramento e controle de qualidade do esgoto (SCHULZ; HENKES, 2014).

2.2 A Dinâmica da Água no Solo

2.2.1 O Solo

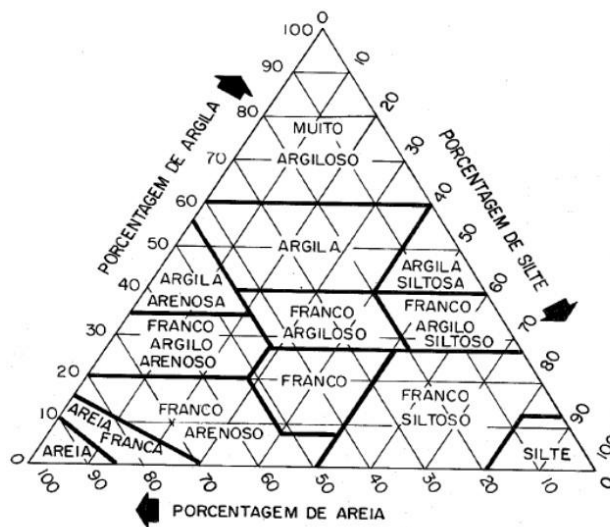
O solo possui uma estrutura móvel e dinâmica, requerendo proteção. (COSTA et al., 2016). A estrutura do solo é formada pela combinação de suas partículas minerais e orgânicas, em diferentes percentuais, expressos nas frações texturais e concentrações iônicas, responsáveis pela macroporosidade e microporosidade, atuando de maneira direta em sua porosidade. Tal propriedade está diretamente relacionada à densidade do solo, interferindo também na condutividade hidráulica (GOMES et al., 2015).

Quanto às propriedades físicas do solo, elas influenciam o seu desempenho de maneira ecológica, e no movimento de água que, vale ressaltar, é um dos tópicos mais estudados na física do solo devido, principalmente, à sua importância relacionada à disponibilidade de água para as plantas e ao transporte de solutos no solo (TITO; CHAVEZ; GUERRA, 2012).

O volume que tanto a água quanto o ar ocupam dependem da textura e do estado de agregação do solo; esse volume diz respeito à porosidade, a qual é responsável pela sua macro e microporosidade. Diante disso o processo de deslocamento da água ocorre de maneira mais intensa nos macroporos o que, conseqüentemente, fará com que a reação dos solos facilite a entrada de ar, ocorrendo, assim, maior consumo das raízes e dos microrganismos. Quanto à atuação dos microporos, eles têm a função de reter a solução no solo onde se encontram os nutrientes vegetais (GOMES et al., 2015).

A textura de um solo é resultado da proporção relativa entre as frações granulométricas de areia (tamanho entre 0,05 e 2 mm), silte (entre 0,002 e 0,05 mm) e argila (inferior a 0,002 mm) (EMBRAPA, 2011). A fim de nomear as classes texturais do solo, a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) adequou um diagrama, baseando-se no modelo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), que pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama para determinação da classe textural do solo proposto pelo USDA e adaptado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo



Quanto à disponibilidade de nutrientes para as plantas, é importante compreender que essa disposição irá depender de alguns fatores, como o tipo de solo, o potencial hidrogeniônico (pH) e o teor de matéria orgânica (GOMES et al., 2015), onde o pH pode condicionar a disponibilidade de nutrientes no solo, sendo capaz de inibir a absorção desses nutrientes pelas plantas. O valor de pH ideal no solo é de aproximadamente 6,5, onde entre 6 e 7 encontra-se o pH neutro com maior disponibilidade possível de nutrientes (GOMES et al., 2015).

A matéria orgânica possui em sua estrutura todos os nutrientes importantes para as plantas a partir de sua decomposição, os quais são liberados na forma de mineral. Ela tem a função de agente cimentante de partículas de argila e outros colóides do solo, e seus principais elementos liberados são o nitrogênio, o enxofre e o boro (DUARTE, 2006).

No que se refere à capacidade de troca catiônica (CTC), ela tem a função de reter e impedir a lixiviação de cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2}) ao longo do perfil do solo (DUARTE, 2006). A Saturação de Bases (SB%) está vinculada à quantidade de nutrientes como cálcio

(Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²), potássio (K⁺), encontrados no solo quando comparados ao hidrogênio-H (responsável pela acidez) e ao alumínio-Al (tóxico), tendo como objetivo indicar os solos mais férteis (SERRAT et al., 2002). A porcentagem de saturação por bases (V %) indica a proporção de bases com relação à CTC, já a porcentagem de saturação por Alumínio (%) indica a proporção de Alumínio (Al) com relação à CTC (GOMES et al., 2015).

Importante ressaltar ainda o risco da salinização e sodificação do solo, uma vez que o mesmo possui uma combinação de sais solúveis que são primordiais ao desenvolvimento das plantas. Os sais solúveis são compostos principalmente de cátions (Ca⁺² e Mg⁺²) e dos ânions (Cl⁻ e SO₄⁻), podendo ser classificados como salinos quando apresentam altas concentrações de sais solúveis; sódicos quando possuem altas concentrações de sódio trocável e salino-sódico quando apresenta altas concentrações tanto de sais quanto de sódio (SANTOS, 2004).

Os critérios de classificação dos solos salinos e sódicos são definidos pela condutividade elétrica (CE), pH, percentual de sódio trocável (PST) e pela razão de adsorção de sódio (RAS). Essa razão avalia a concentração de sódio em relação ao cálcio e magnésio (SANTOS, 2004).

Dentro deste contexto, Silva (2013) avaliando o transporte do nitrato no solo, ressalta que a utilização de colunas de solos, com amostras deformadas e indeformadas em laboratório, representa uma técnica de grande relevância para o monitoramento do deslocamento de substâncias no perfil do solo, trazendo maior clareza frente aos fatores que interferem no mecanismo de transporte de solutos.

Gomes (2015) estudou o reuso de efluente tratado para recuperação de área degradada, onde utilizou colunas de solo em laboratório, a fim de realizar a caracterização física e química do solo para avaliar a viabilidade da aplicação dessa água residuárias.

2.2.2 Lei de Darcy

A primeira equação sugerida pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy tratava da quantificação do movimento de um líquido em um meio poroso saturado (Equação 1). Entretanto, Buckingham observou que os meios porosos não eram apenas ocupados por líquido, mas também por ar. Desse modo, estabeleceu as leis físicas para a condição de não saturação (Equação 2). Depois, Richards generalizou esta equação, que assumiu a forma apresentada na Equação 3.

Posteriormente, o engenheiro hidráulico Henry Darcy (1856) avaliou o processo de infiltração de uma solução em colunas de areia homogênea sob condições de saturação. Darcy verificou que a densidade de fluxo da água era proporcional ao gradiente de potencial hidráulico, movimentando-se do maior para o menor potencial. A equação que descreve essa relação é escrita como (Equação 1):

$$q = -k_{(0)} \frac{\partial \phi_t}{\partial z} \quad (1)$$

em que k_0 é a condutividade hidráulica do solo saturado, ϕ_t é o potencial total de água no solo, z é a coordenada vertical de posição e q é a densidade de fluxo de água. O potencial total de um ponto é determinado pela soma dos potenciais de pressão hidrostática e o gravitacional (Equação 2).

$$\phi_t = \phi_p + \phi_g \quad (2)$$

No entanto, na prática, boa parte dos solos não estão sob condições de saturação. Buckingham (1907) adaptou a equação de Darcy, levando em conta o deslocamento da solução em condição de solo não saturado (Equação 3). Buckingham (1907) afirmou que o movimento de água em um meio não saturado depende da condutividade hidráulica e das forças envolvidas com o processo de secamento do solo. A equação passou a ser conhecida como Darcy-Buckingham, sendo o potencial total determinado pela soma dos potenciais matricial e o gravitacional (Equação 4).

$$q = -k_{(\theta)} \frac{\partial \phi_t}{\partial z} \quad (3)$$

Em que: k_θ é a condutividade hidráulica do solo não saturado.

$$\phi_t = \phi_m + \phi_g \quad (4)$$

- Equação da Continuidade

A equação da continuidade traz o princípio da conservação de massa de água inserida em um volume elementar representativo de solo. A Equação 5 pode ser descrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad (5)$$

onde $\partial \theta / \partial t$ é a variação do conteúdo de água com o tempo, $\partial q_x / \partial x$, $\partial q_y / \partial y$ e $\partial q_z / \partial z$ são as variações do fluxo nas direções x, y e z, respectivamente.

Considerando o meio incompressível, isotrópico e o fluxo na direção vertical, a Equação 5 pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left[\frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad (6)$$

E na direção z, $\partial q_z / \partial z$ é a variação do fluxo com a profundidade.

2.2.3 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é um atributo do solo que retrata a sua capacidade de transmissão de água. Ela é um coeficiente de proporcionalidade entre o fluxo de água e o gradiente de potencial hidráulico apresentado na equação de Darcy. As características do solo que agem na condutividade hidráulica são a distribuição de diâmetros dos poros, a superfície específica e a porosidade, já as atribuições do solo que agem em relação à água são a massa específica e a viscosidade dinâmica (REICHARDT, 1990).

Segundo Araújo et al. (2012), a viscosidade e a densidade são duas variáveis que atuam de forma direta na condutividade hidráulica. A textura e a estrutura do solo são os principais fatores que definem a geometria dos poros. A importância da compreensão dos processos de fluxo de água a partir da Lei de Darcy está relacionada aos diversos processos que controlam a migração de íons em meios porosos. A condutividade hidráulica (K) é uma propriedade do meio poroso que representa a agilidade com que determinado líquido transpassa esse meio.

No solo saturado, a condutividade hidráulica retrata a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades ligadas à porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Ela necessita, especialmente, da forma e da continuidade do meio poroso, tornando-se diferente entre um local e outro. Dessa maneira, consegue adquirir valores extremos em certos locais, além de variar também nas diferentes

orientações do solo. Diante do que foi exposto, pode-se dizer que a condutividade hidráulica, em meio saturado, torna-se mais dependente da estrutura do solo do que da textura dele, por isso, quando acontece o aumento do grau de agregação de um solo, o valor da condutividade também aumenta (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

Em um solo saturado de estrutura estável, assim também como em um meio poroso rígido, ou ainda arenoso, a condutividade hidráulica se altera minimamente, tornando-se, praticamente, invariável. Ao se fazer uma analogia entre solo de textura argilosa e solo arenoso, pode-se perceber que o índice de perda de água por percolação é maior devido à presença de uma maior condutividade hidráulica do solo arenoso. Em geral, com a diminuição da concentração de solutos no solo, a condutividade hidráulica decresce. Isto acontece por causa dos fenômenos de adsorção e dispersão, os quais também sofrem alteração em virtude dos tipos de íons presentes no solo. O desprendimento e a migração das partículas de argila no decorrer do fluxo podem ocasionar a obstrução dos poros no solo (HILLEL, 2004).

2.2.4 Tortuosidade

Segundo Epstein (1989), a tortuosidade é usada para caracterizar a difusão em meios porosos. Seu fator configura a relação existente entre a extensão do perfil de uma superfície de solo rugosa e a distância, entre os pontos inicial e final, da referida superfície (SKIDMORE, 1997).

À medida que cresce o conteúdo de água no solo, diminui a tortuosidade do caminho de difusão. Essa dilatação na espessura do filme da água dentro do espaço poroso eleva o fator de impedância, resultando em um desenvolvimento ainda maior do fluxo difusivo (COSTA et al., 2009).

Existe ainda a possibilidade de acontecer algum tipo de variação no processo de difusão. Quando isso ocorre, o coeficiente de difusão é alterado em função da umidade do solo e, quanto menor a quantidade de água no solo, mais tortuoso será o caminho da difusão. Em água pura, o fator de tortuosidade é igual a 1; em solo saturado, aproximadamente 0,4; na capacidade de campo, por volta de 0,2 e, próximo ao ponto de murcha, em torno de 0,01 (WILD, 1981).

De acordo com Mehta, Shiozawa e Nakano (1995), a tortuosidade pode ser considerada como unitária em solos arenosos com elevado teor de água, onde a interferência das partículas de argila é mínima.

2.3 Dinâmica dos Solutos

2.3.1 Dinâmica da Água e Transporte de Solutos no Perfil do Solo

Os solutos são íons encontrados no solo em diversas quantidades, que se movimentam a partir de vários procedimentos. Segundo Santos et al. (2010), uma porção dos solutos tem a possibilidade de ser absorvida pelas plantas, outra acaba sendo perdida para as camadas mais profundas do solo por percolação, e ainda uma outra porção pode ser precipitada, e isso pode acontecer à medida que a sua concentração venha a ultrapassar a capacidade de solubilidade do meio.

Diante do que foi citado acima, compreende-se que o deslocamento de solutos no solo irá depender de fatores relacionados às propriedades do meio poroso e suas interações, às propriedades do líquido percolante e às condições ambientais, que podem interferir nos parâmetros de transporte dos solutos (SANTOS et al., 2010; SILVA et al., 2012).

A fim de obter maior compreensão sobre experimentos de transporte de soluto, identificando os fenômenos observados, torna-se fundamental determinar as características gerais de transporte de soluto e o equacionamento matemático do transporte de água e do soluto em meios porosos (SILVA, 2013).

Segundo Pinho (2009), a água, quando se movimenta no perfil do solo, retira parte dos solutos que o compõe, e o restante têm seus sais adsorvidos à micela do solo ou absorvidos pelas plantas; além disso, é importante ressaltar que eles ainda interagem com a matriz sólida através de processos físicos e químicos.

2.3.2 Dinâmica de Solutos e Transporte de Solutos no Solo

A água presente no solo e que integra a fase líquida não é quimicamente pura. Existe uma grande quantidade de diferentes sais dissolvidos no solo que variam de 0,0005 % a 3 %, que depende de diversos fatores, como: precipitação, natureza do solo e da rocha, minerais que formam o solo, temperatura da água, e atividade humana. De acordo com Prevedello (1996), os íons mais encontrados no solo são: cátions: sódio, potássio, cálcio, magnésio, amônio, ferro; ânions: cloreto, bicarbonato, carbonato, sulfato, nitrato e fosfato.

Mediante pesquisas realizadas sobre o transporte de solutos, é possível descrever as propriedades de um determinado íon, como sua interação com o meio; sua movimentação, e sua persistência no solo. Este conhecimento, somado ao uso de padrões matemáticos, ajudam à melhor compreensão dos processos relacionados ao deslocamento de substâncias químicas

no solo, apresentando-se como um importante instrumento para estimar os riscos de contaminação e de impactos ambientais (SOUZA et al., 2011).

Os teores restaurados de diversos íons na solução percolada por meio de colunas de solo têm sido usados por vários trabalhos com a finalidade de quantificar o movimento desses solutos (SANTOS et al., 2010; SOUZA et al., 2011; SILVA et al., 2012; MATOS; GARIGLIO; LO MONACO, 2013; MOURA et al., 2013).

Há três métodos que regulam o movimento de solutos e/ou substâncias químicas no solo, são eles: convecção, também conhecido como advecção e fluxo de massa, difusão molecular e dispersão mecânica. Estes procedimentos necessitam de características locais como condutividade hidráulica e umidade do solo, capacidade de troca catiônica do solo, pH, granulometria, estrutura e grau de estratificação do perfil do solo (OLIVEIRA et al., 2010).

Quanto ao transporte convectivo, este se refere ao deslocamento passivo do soluto com a água, ou seja, as partículas de soluto são transportadas pelo fluxo de água. Este processo acontece por causa das características hidrodinâmicas do meio poroso. Quando não há difusão e adsorção, a água e o soluto movimentam-se na mesma taxa média. Na direção vertical e horizontal, o transporte convectivo pode ser descrito como:

$$J_c = qC \quad (7)$$

Em que:

J_c – densidade de fluxo convectivo, $M.L^{-2}.T^{-1}$;

q – densidade de fluxo da água no solo, $L.T^{-1}$;

C – concentração do soluto na fase líquida do solo, $M.L^{-3}$.

No que se refere à difusão molecular, é caracterizada como um processo espontâneo decorrente do deslocamento natural de íons e moléculas dissolvidas, já o transporte convectivo tende a reduzir os níveis de concentração existentes. Diante disso, a longo prazo, a dispersão ocasionada pelo processo de difusão pode atingir grandes distâncias, ainda que o meio poroso venha apresentar baixa permeabilidade. A sua expressão, segundo a 1ª Lei de Fick, pode ser descrita por:

$$J_D = -\theta D_m \frac{\partial C}{\partial z} \quad (8)$$

Em que:

J_D – densidade de fluxo difusivo, $M.L^{-2}.T^{-1}$;

θ – umidade a base de volume, $L^3.L^{-3}$;

D_m – coeficiente de difusão molecular, $L^2.T^{-1}$;

z – profundidade, L.

O coeficiente de difusão molecular no solo é estimado levando em consideração a tortuosidade do meio poroso e a difusão molecular do soluto em água, ou seja:

$$D_m = \tau D_o \quad (9)$$

Em que:

τ – fator de tortuosidade, adimensional;

D_o – coeficiente de difusão molecular em água pura, $L^2.T^{-1}$.

O transporte dispersivo acontece por causa das variações da velocidade do fluido no interior dos poros em relação à velocidade média de água nos poros. Em nível microscópico, existe um compartilhamento de velocidades nos poros provocado pela resistência fraccional ocasionada pelas superfícies sólidas do material poroso, e também pelo avanço diferenciado da frente de molhamento. Esta distribuição promove a movimentação do soluto em diferentes taxas, o que direciona a um processo de mistura que é macroscopicamente semelhante à mistura causada pelo processo de difusão (VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986). Entretanto, diferentemente da difusão que ocorre mesmo sem fluxo, a dispersão acontece apenas com o deslocamento da água. O transporte por dispersão na direção z pode ser dado por:

$$J_h = -\theta D_h \frac{\partial C}{\partial z} \quad (10)$$

Em que:

J_h – densidade de fluxo dispersivo, $M.L^{-2}.T^{-1}$;

D_h – coeficiente de dispersão mecânica, $L^2.T^{-1}$.

Quando a difusão molecular é desprezível em relação à dispersão mecânica, D_h varia linearmente com a velocidade média de água nos poros (FRIED; COMBARNOUS, 1971).

$$D_h = \lambda v^n \quad (11)$$

Em que:

λ – dispersividade do solo, L;

v – velocidade média da água nos poros, $L.T^{-1}$;

n – parâmetro empírico, normalmente igual a um.

Em consequência da similaridade macroscópica entre a difusão molecular e a dispersão mecânica, os coeficientes “ D_m ” e “ D_h ” são frequentemente considerados como aditivos, sendo o resultado igual ao coeficiente de dispersão hidrodinâmica ou coeficiente de difusão-dispersão (D):

$$D = D_m + D_h \quad (12)$$

A densidade de fluxo de solutos no solo (J_s) está relacionada à soma da densidade de fluxo convectivo com a densidade de fluxo dispersivo e a densidade de fluxo difusivo:

$$J_s = J_c + J_D + J_h \quad (13)$$

Substituindo os fluxos pelas Equações 7, 8 e 10 e utilizando a Equação 12, tem-se que:

$$J_s = -\theta D \frac{\partial C}{\partial z} + qC \quad (14)$$

Em que:

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

2.3.3 Parâmetros de Transporte de Solutos

Diversos modelos foram desenvolvidos para avaliar o deslocamento dos solutos no solo, e um dos pontos que promoveu o êxito dos modelos foi a quantidade de parâmetros de transporte presentes no processo, os quais são calculados a partir do ajuste de dados

experimentais, mediante a uma condição específica de fluxo (ÁLVAREZ-BENEDÍ et al., 1999).

Existem diversas maneiras para estabelecer os parâmetros hidrodispersivos. São eles: método de otimização não-linear dos mínimos quadrados, proposto por Parker e Van Genuchten (1984); função de transferência lognormal – TFM, proposto por Jury e Sposito (1985) e o método dos momentos, proposto por Feike e Dane (1992), os quais estão amparados no ajuste da solução analítica da equação da convecção-dispersão (CDE) aos pontos da curva de distribuição de efluentes obtida em ensaios de deslocamento de líquidos miscíveis (MILFONT et al., 2006).

Em meio aos programas computacionais desenvolvidos para estimar os parâmetros de transporte de solutos no solo, é possível destacar o DISP (BORGES JÚNIOR; FERREIRA, 2006). Ele utiliza o modelo dos mínimos quadrados para estimar os parâmetros de transporte: número de Peclet (P) e fator de retardamento (R). O programa citado adota ainda, estimadores que diminuem a soma dos quadrados dos desvios (Rs) entre os valores calculados e observados da concentração relativa (C), em relação ao número de volume de poros (Vp).

Pode-se citar ainda outro exemplo de programa, o software STANMOD (Studio of Analytical Models) (ŠIMŮNEK et al., 2008). Ele se alicerça a partir das soluções analíticas de equações diferenciais que relatam o transporte de solutos e estima diretamente os parâmetros de transporte: fator de retardamento (R) e coeficiente de difusão-dispersão (D).

A versão mais recente do programa (2.08) inclui os seguintes modelos: CXTFIT (TORIDE; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 1995), CHAIN (VAN GENUCHTEN, 1985), CFITM (VAN GENUCHTEN, 1980), CFITIM (VAN GENUCHTEN, 1981) 3DADE (LEIJ; BRADFORD, 1994) e N3DADE (LEIJ; TORIDE, 1997). Todos esses modelos são escritos em FORTRAN e as interfaces gráficas em MS Visual C++.

O CXTFIT (Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments) (TORIDE; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 1995) foi desenvolvido para calcular os parâmetros de transporte de solutos, tendo como ponto de partida as concentrações observadas (método inverso); ou ainda, para prever as concentrações de solutos (método direto), utilizando a equação de convecção-dispersão como modelo de transporte.

O programa citado é uma ferramenta adequada para estimar os parâmetros hidrodispersivos de um solo, e utiliza o método de otimização não linear dos mínimos quadrados no cálculo dos parâmetros de transporte de solutos.

Segundo Van Genuchten (1981), o modelo CFITIM (code analysing nonequilibrium transport parameters from miscible displacement experiments) foi criado para investigar os ensaios de efluentes em colunas de solo, e simular os processos utilizando soluções analíticas das equações unidimensionais de transporte convectivo-dispersivo de equilíbrio e não equilíbrio.

Os modelos de não equilíbrio consistem na hipótese de que, seja por razões físicas ou químicas, a adsorção não age mediante a uma equivalência de níveis em todas as partes do solo. O método oferece efetivas e valiosas formas de definir os parâmetros de transporte através da otimização de dados da coluna de efluentes, possibilitando duas formas de aproximação: estimativa dos parâmetros de transporte por meio das concentrações adquiridas nos ensaios em laboratórios (problema inverso) ou previsão de concentrações de solutos em condições de escoamento permanente (problema direto), por intermédio da utilização das equações de convecção-dispersão.

A distribuição da concentração de íons em uma coluna de solo com concentração inicial uniforme, em equilíbrio dinâmico, que será substituída em um tempo $t = 0$ por uma solução com concentração constante, pode ser submetida a uma solução analítica. As condições iniciais e de contornos podem ser dadas pelas Equações: 15, 16 e 17.

$$c(z,0) = c_i \quad (15)$$

$$c(0,t) = c_0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (17)$$

A solução para a equação de convecção-dispersão sujeita aos valores iniciais e de contorno já citados, pode ser obtida pela Equação 18 (NIELSEN; BIGGAR, 1962; VAN GENUCHTEN; WEIRENGA, 1986):

$$\frac{c(z,t)-c_i}{c_0-c_i} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{R.z-v.t}{\sqrt{4.D.R.t}} \right) + \frac{1}{2} e^{\frac{v.z}{D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{R.z-v.t}{\sqrt{4.D.R.t}} \right) \quad (18)$$

Em que:

$\operatorname{erfc}(u)$ – função erro complementar

A solução simples, frequentemente utilizada em experimentos de deslocamento miscível, é obtida retendo somente o primeiro termo do lado direito da Equação 18:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{R.z-v.t}{\sqrt{4.D.R.t}} \right) \quad (19)$$

O impacto causado pela difusão frente à concentração de soluto na solução do solo (entre agregados), presente nos sistemas que se encontram saturados, torna-se importante apenas quando a velocidade de escoamento é baixa, isto é, quando a quantidade de macroporos e o gradiente hidráulico são baixos. Isso acontece devido à taxa de transferência de solutos intra-agregados ocorrer por difusão, o que a torna desnecessária quando comparada ao transporte por fluxo de massa em condições de velocidades de escoamento mais altas, comumente encontrado em trabalhos de laboratório (RUIZ et al., 2010). Por isso, a solução já citada pode ser obtida ao desprezar a difusão molecular, considerando apenas o sistema finito. Os parâmetros de transporte P e R são avaliados por ajuste, mediante a minimização da soma dos quadrados dos desvios.

Ao que se refere ao uso do modelo STANMOD, pode-se citar Alcântara e Camargo (2010), estudando a movimentação de nitrato em horizonte superficial e subsuperficial de Latossolo e Nitossolo com cargas variáveis, e Oliveira et al. (2013), observando a mobilidade do lítio em solos com disposição de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais, os quais obtiveram êxito no ajuste do modelo aos dados experimentais; Tosco e Sethi (2009), que verificaram desempenho apropriado do software STANMOD na simulação de nano partículas no solo. Além disso, ainda é possível citar Silva (2013), que obteve bom ajuste do modelo na simulação e definição de parâmetros de transporte do íon nitrato em amostras deformadas e indeformadas.

O fator de retardamento é a capacidade de retenção ou efeito tampão do solo, representando a relação entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução. Além disso, o fator de retardamento depende das interações entre as fases líquida e sólida, que acontece em meio ao trajeto da solução deslocadora no solo (VALOCCHI, 1984).

De acordo com Tito, Chavez e Guerra (2012), é possível interpretar o fator de retardamento ainda como a capacidade do solo em reter íons, o que pode levar ao entendimento ainda maior sobre sua dependência das interações entre as fases líquida e sólida no solo.

Quanto às curvas de eluição de efluentes em meio a certos íons, é possível compreender que seu desempenho e formato caracteriza o deslocamento miscível da solução aplicada.

No que concerne ao volume de poros, Nielsen e Biggar (1962) afirmaram que o valor correspondente ao volume de poros (V_p) cuja concentração relativa (C/C_0) é igual a 0,5 é um primeiro indicativo que aponta se há ou não interação entre o soluto e solo. A fase sólida do solo interage com os íons em solução (adsorção) e os solutos apresentam, em relação a água, seu transporte retardado (VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986).

No que diz respeito ao coeficiente de difusão-dispersão, ele é uma peculiaridade física que considera a difusão iônica e a dispersão mecânica na solução do solo (VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986). Importante ressaltar que valores mais altos do coeficiente de difusão-dispersão (D) estão vinculados ao aumento da faixa de mistura entre as soluções deslocadoras e deslocadas presentes no perfil do solo (NIELSEN; BIGGAR, 1962).

No tocante ao número de Peclet (P), trata-se de um número adimensional, usado para a avaliação dos processos de convecção-dispersão ou difusão, a fim de compreender qual dos dois predomina no processo de transferência de solutos (GONÇALVES, 2007).

É uma grandeza adimensional, obtida por:

$$P = \frac{vL}{D} \quad (20)$$

Em que:

v – velocidade média da água nos poros, $L.T^{-1}$;

L – comprimento da coluna de solo, L ;

D – coeficiente de difusão- dispersão, $L^2.T^{-1}$.

Quando o resultado do número de Peclet (P) se apresenta maior do que 10, o transporte acontece principalmente por convecção, e quando é menor do que 10 o transporte predominante é por difusão (NOVY QUADRI, 1993).

Após a obtenção dos parâmetros de transporte, pode-se melhor estimar a capacidade de deslocamento de um íon no solo, o que possibilita investigar a sua disponibilidade para o sistema radicular das plantas, além de avaliações do seu potencial de contaminação de mananciais e águas subterrâneas.

2.3.4 Curvas de Eluição

As curvas de distribuição de efluentes, de eluição ou Breakthrough Curves (BTC), são usadas nas pesquisas que tratam da caracterização dos processos de transporte de solutos no solo, representando o fluxo miscível.

O deslocamento miscível está relacionado ao procedimento onde um fluido se mistura a outro e o desloca no meio poroso. A teoria do deslocamento miscível leva em consideração um fluido que contém o íon que será estudado e, este é deslocado pelo mesmo fluido com ausência do íon (NIELSEN; BIGGAR, 1961).

De acordo com Matos, Gariglio e Lo Monaco (2013), os dados experimentais do deslocamento miscível podem ser obtidos no campo, por meio de lisímetros, ou em laboratório, usando-se colunas de solo deformadas ou indeformadas. Ultimamente a escolha por se trabalhar em laboratório tem sido frequente, pela simplicidade, precisão, e condições experimentais controladas. Porém, no que concerne aos estudos em laboratórios, pode-se observar algumas desvantagens dentre elas os efeitos de escala. Diante disso, é possível citar Montenegro (1997) que observou valores de dispersividade em aquíferos muito maiores do que os valores obtidos em laboratório, por causa das diferentes escalas de heterogeneidade geralmente encontradas pelo caminho de fluxo de águas subterrâneas.

Inúmeros estudos analisaram o transporte de solutos em colunas de solo por meio de ensaios de deslocamento de líquido miscível. Silva et al. (2012) analisaram o transporte de sódio e potássio via vinhaça em um Nitossolo Vermelho eutrófico em Piracicaba/SP. Matos, Gariglio e Lo Monaco (2013) realizaram experimento em laboratório a fim de avaliar o deslocamento de cátions provenientes da vinhaça em solos tipo Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutrófico do município de Capinópolis/MG, e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico do município de Viçosa/MG. Pinho e Miranda (2014) observaram os parâmetros de transporte do potássio em colunas preenchidas com Latossolos Vermelho-Amarelo e Nitossolos Vermelho. Santos, Miranda e Silva (2015) avaliaram os parâmetros de transporte do solo de potássio em um solo salino. Silva et al. (2016) focaram nas propriedades de retenção e solução de transporte em amostras deformadas e não deformadas em Latossolo Vermelho-Amarelo no município de Piracicaba. Conceição (2016) conduziu a modelagem da dinâmica de nitrato e potássio em solo em bananeiras fertirrigadas. Basso e Kiang (2017) se aprofundaram no estudo sobre o retardamento e dispersão hidrodinâmica de cobre, potássio e cloreto em solos residuais no Estado de São Paulo. Basso, Soto e Kiang (2017) pesquisaram a percolação de vinhaça em coluna de solo arenoso da Formação Rio Claro.

2.4 Cobertura de Pó de Coco

O coqueiro é uma árvore tropical, cujo fruto é de elevado valor econômico na região, sendo bastante aproveitado como fonte de alimentação, de bebida, óleo, fibra, combustível e madeira (PINO, 2005).

O pó de coco é um substrato facilmente obtido na Região Nordeste. É classificado como um resíduo orgânico de origem do mesocarpo fibroso do coco e tem sido visto como uma fonte alternativa para a redução dos custos dos substratos, com resultados positivos no desenvolvimento de plântulas de diversas culturas (MEEROW, 1994; PRAGANA, 1998).

O pó de coco vem sendo apontado como substrato agrícola, principalmente, por apresentar uma grande vantagem quanto à estrutura física, propiciando alta porosidade e alto potencial de retenção de umidade, e por ser biodegradável, vem demonstrando bom desempenho como substrato no cultivo de hortaliças, por exemplo. A produção do pó de coco ocorre através da utilização da casca de coco verde que ao ser triturada, se transforma em fibra ou pó que pode ser usado no cultivo de plantas. A casca do coco é considerada uma das maiores fontes de poluição devido à grande quantidade encontrada nos lixos ou ainda espalhadas pela cidade, o que estimulou a ideia de aproveitamento da casca, a fim de utilizá-la de maneira sustentável (EMBRAPA, 2002).

Martinez (2002) descreve a fibra de coco como um substrato que contém textura variável, cuja influência está presente na relação de equilíbrio existente entre o conteúdo de ar e de água, os quais são fundamentais para o cultivo das plantas. A porosidade do pó de coco é elevada, além de reter uma quantidade de água que se encontra facilmente disponível às raízes, mantendo, assim, uma boa aeração. Em se tratando das propriedades químicas, pode-se afirmar que são inúmeras, onde a capacidade de troca catiônica é de média à alta, o que o torna um substrato quimicamente móvel.

Carrijo, Liz e Makishima (2002) observaram que o pó de coco é qualitativamente superior ao pó de serra, à casca de arroz cru e à lã de rocha. Os autores concluíram que a fibra de coco, além de ser uma matéria-prima abundante e renovável e apresentar um baixo custo para o produtor, apresenta elevada durabilidade, possibilita uma elevada absorção dos nutrientes da adubação e permite esterilização.

É importante ressaltar que o substrato elaborado a partir das fibras de coco não apresentam os nutrientes necessários para o cultivo das plantas, sendo importante ofertá-los segundo as necessidades de cada espécie, acrescentando ainda adubos durante o pré-plantio ou, especificamente, durante a fertirrigação. De forma ampla, ao se fazer uma analogia do pó

de coco com outros sete tipos de substratos, Carrijó, Liz e Makishima (2002) verificaram superioridade da fibra de coco como meio à produção comercial de tomate, tendo-se produzido cerca de uma tonelada a mais de frutos comerciais que o pó de serra ou serragem nos três anos analisados. O pó de coco é adequado para cultivos de ciclo longo como as plantas ornamentais e hortaliças sem o uso de solo, já que não sofre degradação acelerada causada pela intensa aplicação de água e fertilizante (CARRIJÓ; LIZ; MAKISHIMA, 2002).

Resíduos de agroindústria, fibra de coco maduro, materiais orgânicos decompostos surgem como alternativas promissoras para misturas (MEEROW, 1994). O substrato do pó de coco por ser orgânico possui uma maior absorção dos sais da solução de fertirrigação, mas não disponibilizando os sais para as plantas, justificando-se assim o uso deste com águas residuárias com alto grau de sais (CARRIJÓ; LIZ; MAKISHIMA, 2002).

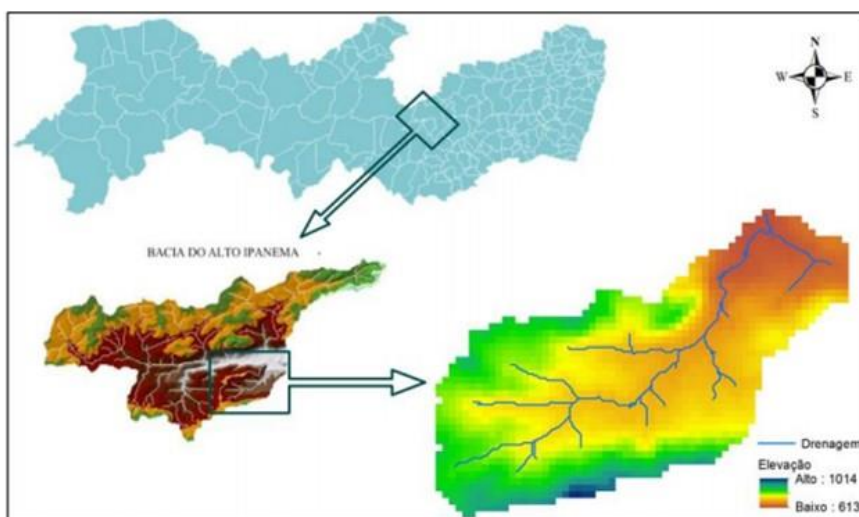
3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Água e Solo (LAS) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

3.1 O Solo

Os solos utilizados no estudo foram oriundos da bacia experimental do Riacho Jatobá, localizada no município de Pesqueira – PE, região Agreste do estado de Pernambuco, situada entre as coordenadas 8° 34' 17" e 8° 18' 11" de Latitude Sul e 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de Longitude Oeste (Figura 2). A microbacia está inserida na bacia representativa do Riacho Mimoso, pertencente ao Rio Ipanema, e possui uma área de drenagem de 12,44 km² e perímetro de 16 km, o que resulta em um coeficiente de compacidade de 1,27. O riacho que percorre a bacia possui extensão de 6,5 km.

Figura 2 - Localização da bacia experimental do Riacho Jatobá, no município de Pesqueira-PE



Fonte: Araújo (2016).

A precipitação anual média da bacia é de 607 mm, com temperatura média de 23 °C e evapotranspiração potencial anual de aproximadamente 2000 mm (SANTOS; MONTENEGRO; SILVA JUNIOR, 2008), com estação chuvosa concentrada entre os meses de março a agosto e estiagem entre os meses de setembro e fevereiro. A vegetação predominante é do tipo Caatinga hiperxerófila, com a presença de cactáceas e bromeliáceas.

As principais classes de solo na bacia são: Argissolo Amarelo, com presença de impedimento rochoso; Neossolo Litólico e Neossolo Regolítico.

3.2 Análises Físicas e Químicas do Solo

Os solos utilizados no estudo foram classificados como Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2011). As caracterizações física e química do solo foram realizadas mediante coletas de amostras compostas de solo deformada na profundidade de 0 a 0,20 m em locais representativos da região estudada. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, etiquetados e levadas ao laboratório. As amostras foram secas ao ar (TFSA), destorroadas e peneiradas em peneira com diâmetro de 2,00 mm.

As frações granulométricas areia, silte e argila, foram determinadas pelo método do densímetro de Boyoucos utilizando-se um agitador mecânico como dispersante físico, durante 15 min para solos com textura argilosa e 5 min para solos com textura arenosa. Foi realizada a aplicação de 25 mL de hexametáfosfato de sódio (Calgon) como dispersante químico (EMBRAPA, 2011).

A densidade do solo foi determinada segundo o método da proveta, e a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2011). A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada a partir de um permeâmetro de carga constante e aplicação da equação de Darcy. A porosidade do solo foi determinada com base na densidade do solo e na densidade de partículas, sendo expressa em percentagem conforme a Equação 21.

$$\alpha = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \times 100 \quad (21)$$

Em que:

α - porosidade, $L^3.L^{-3}$

D_s - densidade do solo, $M.L^{-3}$;

D_p - densidade das partículas. $M.L^{-3}$.

A caracterização física do solo foi realizada de acordo com a EMBRAPA (2011). A distribuição das frações texturais e as demais características físicas do solo são apresentadas na Tabela 1.

Conforme a classificação textural da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, os solos possuem textura franco-arenosa e areia franca.

Tabela 1 - Análise física para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo

Parâmetros	Neossolo Litólico	Argissolo Amarelo
Areia Total (%)	82,07	70,01
Areia Fina (%)	16,00	23,50
Areia Grossa (%)	84,00	76,50
Silte (%)	0,99	10,39
Argila (%)	16,93	19,60
Classe textural	Areia franca	Franco arenosa
Ds (kg.dm ⁻³)	1,45	1,47
Dp (kg.dm ⁻³)	2,62	2,57
α (m ³ .m ⁻³)	44,66	42,80
K(sat) cm.min ⁻¹	0,208	0,015

Ds – Densidade do solo; Dp – Densidade das partículas; α – Porosidade; K(sat) – Condutividade hidráulica do solo saturado.

Para a determinação da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e potencial hidrogeniônico (pH) (Tabela 2), preparou-se uma pasta saturada conforme a metodologia proposta pela EMBRAPA (2011). Em seguida, foram determinados CEes pelo método eletrométrico e pH em água no extrato de saturação pelo método potenciométrico; e os teores de Na⁺ e K⁺, por espectrofotometria de emissão de chama.

Tabela 2 - Composição do extrato da pasta saturada para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo

Parâmetros	Neossolo Litólico	Argissolo Amarelo
CE dS.m ⁻¹	1,36	0,80
pH água	7,35	7,89
K (mmolc.L ⁻¹)	0,60	0,90
Na (mmolc.L ⁻¹)	2,60	1,00

CEes – condutividade elétrica do extrato de saturação; pH – potencial Hidrogeniônico; K – potássio; Na - sódio

3.3 Água Residuária Tratada

A água residuária doméstica utilizada nas colunas de solo deformado foi proveniente da Unidade Piloto de Tratamento e Reuso de Esgoto Doméstico Para Fins Produtivos (ETE – MUTUCA), situada no distrito de Mutuca da cidade de Pesqueira, PE (Figura 3). A estação trata os esgotos por processo anaeróbico, mediante emprego de reator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB), seguido da Lagoa de polimento e vem sendo utilizado para a disposição controlada de esgoto doméstico tratado para a produção agrícola de diversas culturas, como: algodão, milho, girassol, palma forrageira, sorgo, Moringa oleifera, chichá, entre outras.

Figura 3 - Área da coleta do esgoto, na Unidade Piloto de Tratamento e Reuso de Esgoto Doméstico Para Fins Produtivos



Acervo pessoal.

As amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas com tampa de plástico, com volume total de 5000 mL e posteriormente conservadas a 4 °C, e transportadas ao Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Foi realizada a análise físico-química (Tabela 3) dos seguintes parâmetros: Condutividade Elétrica (CE), Potencial Hidrogeniônico (pH), Alcalinidade, Cloretos, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Sedimentáveis (SS), Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF), Sólidos Suspensos (SSusp), Sólidos Suspensos Fixos (SSuspF), Fósforo (P), Sódio (Na^+) e Potássio (K^+).

Tabela 3 - Análise físico-química da água residuária

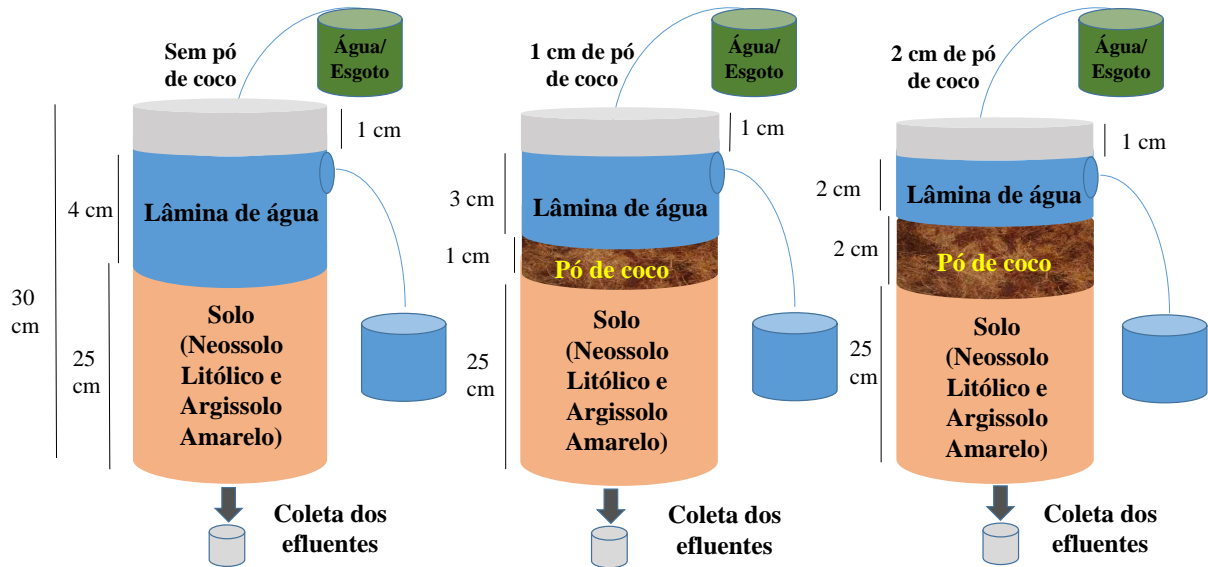
Parâmetros	Valor
CE (dS.m ⁻¹)	2,67
pH	7,9
Alcalinidade (mg)	708
Cloretos (mg.L ⁻¹)	200
OD (mg O ₂ .L ⁻¹)	7
DBO (mg O ₂ .L ⁻¹)	487
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	902
SS (mL.L ⁻¹)	0,50
ST (mg.L ⁻¹)	2345
SF (mg.L ⁻¹)	2094
SSusp (mg.L ⁻¹)	50
SSusp. F (mg.L ⁻¹)	30
Fósforo (mg.L ⁻¹)	2,50
Sódio (mmolc.L ⁻¹)	15,10
Potássio (mmolc.L ⁻¹)	3,76

CE – condutividade elétrica; pH – potencial hidrogeniônico; OD – oxigênio dissolvido; DBO – demanda biológica de oxigênio; DQO – demanda química de oxigênio; SS – sólidos sedimentáveis; ST – sólidos totais; SF – sólidos fixos; SSusp – sólidos suspensos; SSuspF – sólidos suspensos fixos.

3.4 Elaboração das Curvas de Eluição e Preparo das Soluções

A parte experimental deste trabalho consistiu em 30 unidades experimentais em laboratório, com cinco repetições. A Figura 4 apresenta os tratamentos sem pó de coco mais esgoto; com 1 cm de pó de coco mais esgoto e com 2 cm de pó de coco mais esgoto. Para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo foram preparadas seis colunas de solo contendo cada um dos três tratamentos (sem pó de coco; 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), em que foram realizadas as medições dos íons sódio (Na⁺) e potássio (K⁺).

Figura 4 - Colunas de solo com seus respectivos tratamentos: sem cobertura de pó de coco mais esgoto; com 1 cm de cobertura de pó de coco mais esgoto e com 2 cm de cobertura de pó de coco mais esgoto



Para a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos no solo foram elaboradas as Breakthrough Curves (BTC), ou seja, as curvas de eluição de efluentes do íon em relação ao volume de solução aplicada. Foram utilizadas seis colunas de acrílico com 30 cm de comprimento e 6 cm de diâmetro interno; para cada um dos tratamentos (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) foram preenchidas duas colunas, uma com solo Neossolo Litólico e outra com Argissolo Amarelo até uma altura igual a 25 cm, resultando em volume de 706,86 cm³.

Para o preenchimento do pó de coco foi utilizada a densidade de 4 t.ha⁻¹, segundo recomendações de Montenegro et al. (2013), que utilizando essa mesma densidade em palha de arroz obteve uma redução no escoamento da chuva e uma maior infiltração; como a área da coluna apresenta 28,27 cm², a massa de pó de coco aplicada foi de aproximadamente 1,25 g para atingir a densidade proposta por Montenegro et al. (2013), resultando então em uma altura de 0,25 cm de pó de coco. Assim, para atingir 1 cm e 2 cm de altura pó de coco foi inserida uma massa de 5 e 10 g.

Na parte inferior das colunas foi colocado um círculo de manta sintética sobre uma tela, fixos por um “cap”. Com o objetivo de manter uma lâmina constante de 1 cm, foi instalada uma saída (vertedor) que retirava todo o excesso de água para um recipiente (balde).

Para iniciar o teste, primeiramente, a coluna foi saturada com água deionizada, processo esse realizado de forma lenta, por capilaridade, colocando-a em um balde e, em seguida, adicionando a água por gotejamento através de um dosador ao longo das paredes do

balde, até cerca de 2/3 da altura da coluna. O conjunto foi mantido em repouso durante um período de 24 horas para completar o processo de saturação (Figura 5).

Figura 5 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de saturação da coluna de solo



Acervo pessoal.

Após 24 horas em repouso (saturado), o processo de lixiviação do solo foi iniciado, consistindo na passagem de água deionizada, mantendo-se uma carga hidráulica constante de 1 cm, através da coluna por um período de 24 horas, com o objetivo de remover, por percolação da água, os íons presentes na solução do solo e do complexo de troca (Figura 6).

Figura 6 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de lixiviação da coluna de solo

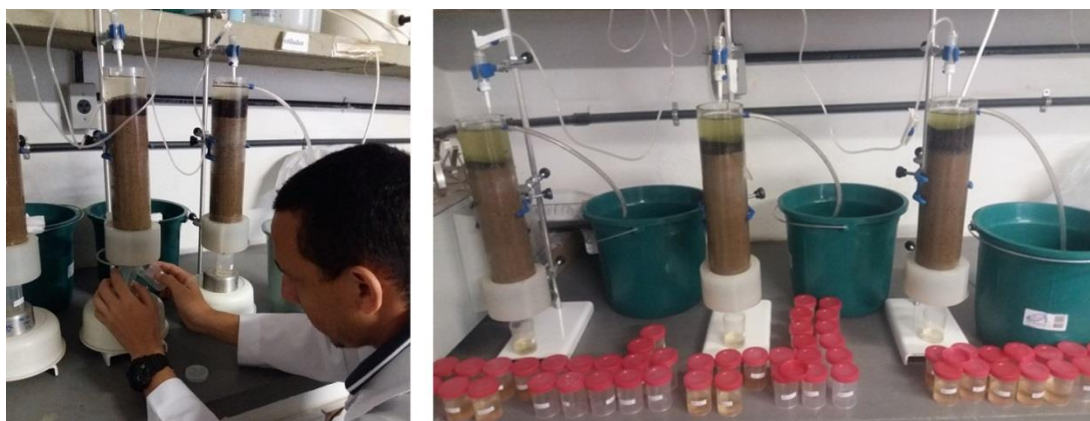


Acervo pessoal.

Após a lavagem, foi realizada a verificação, em cada unidade experimental, se o fluxo estava em condição de regime permanente. Comprovada a condição de fluxo permanente, foi

dado início à coleta dos efluentes sequencialmente em frascos com volume de 20 mL para que se pudesse fazer a determinação dos íons antes da passagem da aplicação de água residuária, a fim de verificar a influência do esgoto sobre a coluna (Figura 7).

Figura 7 - Esquema experimental utilizado para elaboração das curvas de eluição: processo de aplicação e coleta dos efluentes



Acervo pessoal.

A partir deste momento, os efluentes foram coletados sequencialmente (Figura 7) em frascos com volume de 20 mL, definidos em função do volume de poros (V_p), cujos valores estão em função do volume da coluna (V_t) e da porosidade do solo (α). Cada frasco correspondia a aproximadamente $0,04 V_p$.

$$V_p = \alpha \cdot V_t \quad (22)$$

Em que:

V_p - Volume de poros $L^3 \cdot L^{-3}$

α - porosidade, $L^3 \cdot L^{-3}$

V_t - Volume total da coluna $L^3 \cdot L^{-3}$.

3.5 Parâmetros de Transporte e Análise dos Resultados

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 curva de eluição foi realizado separadamente, bem como a estimativa dos parâmetros de transporte do sódio e potássio para cada tratamento.

Para obtenção dos parâmetros de transporte de solutos no solo, após a coleta dos efluentes, foi utilizado o software STANMOD (ŠIMŮNEK et al., 2008). De posse da concentração de sódio e potássio e com o auxílio do modelo STANMOD foram elaboradas as curvas de eluição de efluentes. Os parâmetros determinados pelo modelo foram: fator de retardamento (R) e número de Peclet (P). A velocidade da água nos poros (v) foi obtida a partir da Equação 23:

$$v = \frac{q}{\alpha} \quad (23)$$

Em que:

v – velocidade média da água nos poros, L.T⁻¹;

q – densidade de fluxo da água no solo, L.T⁻¹;

α – porosidade, L³.L⁻³.

O coeficiente de difusão-dispersão (D) foi determinado a partir da Equação 24:

$$D = \frac{v.L}{P} \quad (24)$$

Em que:

v – velocidade média da água nos poros, L.T⁻¹;

D – coeficiente de difusão-dispersão, L².T⁻¹;

L – comprimento da coluna de solo, L;

P – número de Peclet, adimensional.

A dispersividade (λ) foi obtida a partir dos valores de D e v (Equação 25).

$$\lambda = \frac{D}{v} \quad (25)$$

Em que:

D – coeficiente de difusão-dispersão, L².T⁻¹;

v – velocidade média da água nos poros, L.T⁻¹

3.6 Delineamento Experimental

Adotou-se delineamento experimental em esquema fatorial 2 x 3, consistindo em dois tipos de solos (Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo) e três coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), com cinco repetições, totalizando 30 colunas.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando necessário transformados para atender aos pressupostos da ANOVA. Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade, utilizando o programa Statistix 9 (MICHEREFF, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Tabela 4 os valores de quadrado médio das variáveis analisadas. Houve influência significativa para o fator solo e cobertura isoladamente e para a interação dos fatores solo-cobertura ($p < 0,05$) no íon sódio (Na^+); porém, para o íon potássio (K^+) não houve influência significativa para a interação dos fatores, mas houve influência significativa nos fatores solo e cobertura isoladamente ($p < 0,05$).

Tabela 4 - Análise de variância para os íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) para os tratamentos sem cobertura de pó de coco, 1 cm de altura de pó de coco e 2 cm de altura de pó de coco, para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Na	K
Solo	1	19,25*	18,34*
Cobertura	2	4,48*	6,97*
Solo*Cobertura	2	3,02*	1,14 ^{NS}
Resíduo	1076		
C.V. (%)		19,91	9,58

NS - não significativo; * significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F

Na Tabela 5 verificou-se que houve diferença entre as coberturas com 2 cm de pó de coco e as sem pó de coco e com 1 cm de pó de coco para o solo Neossolo Litólico, onde a cobertura de 2 cm de pó de coco teve uma redução na lixiviação do íon sódio na coluna, mostrando a eficiência da cobertura de pó de coco na retenção dos sais. Esse resultado corrobora com Carrijo, Liz e Makishima (2002), que em seu estudo da fibra da casca do coco verde como substrato encontraram uma maior absorção dos sais na cobertura de pó de coco, mas não disponibilizando os sais para as plantas, justificando assim o uso deste com águas residuárias com alto grau de sais. Já para o solo Argissolo Amarelo, não houve diferença entre as coberturas. Para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo houve diferença entre as coberturas sem de pó de coco e 1 cm de pó de coco, porém não diferiu da cobertura de 2 cm de pó de coco. Pode-se observar que para o solo Neossolo Litólico a lixiviação do íon sódio foi maior para todos os tratamentos do que no solo Argissolo Amarelo. Tal fato pode ter ocorrido devido às diferenças existentes entre as texturas dos solos estudados.

Tabela 5 – Efeito da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon sódio (Na^+) para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo

Cobertura do solo	Solo	
	Neossolo Litólico	Argissolo Amarelo
Sem pó de coco	0,4532 aA	0,3517 aB
1 cm de pó de coco	0,4450 aA	0,2917 aB
2 cm de pó de coco	0,3419 bA	0,3093 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si, a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Verifica-se na Tabela 6 que houve diferença nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo para íon potássio, onde Argissolo Amarelo apresentou média maior que Neossolo Litólico. Adicionalmente na Tabela 7, houve diferença entre as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, onde a cobertura sem pó de coco diferiu entre as coberturas de 1 cm e 2 cm de pó de coco. O fato de não haver diferença entre as alturas de cobertura de pó de coco, sugere que a utilização de 1 cm pode ser uma alternativa viável e econômica para a prática agrícola. Resultado similar foi encontrado por Carrijó, Liz e Makishima (2002) que, analisando a fibra da casca do coco verde como substrato agrícola, verificou seu desempenho superior, em termos absolutos, em relação ao pó de serra, a casca de arroz cru e lã de rocha. A fibra de coco, além de ser uma matéria-prima abundante e renovável, apresenta um baixo custo para o produtor.

Tabela 6 - Influência do tipo de solo na lixiviação do íon potássio (K^+)

Solo	Média
Neossolo Litólico	0,1413 b
Argissolo Amarelo	0,1823 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 7 - Influência da cobertura do solo com pó de coco na lixiviação do íon potássio (K^+)

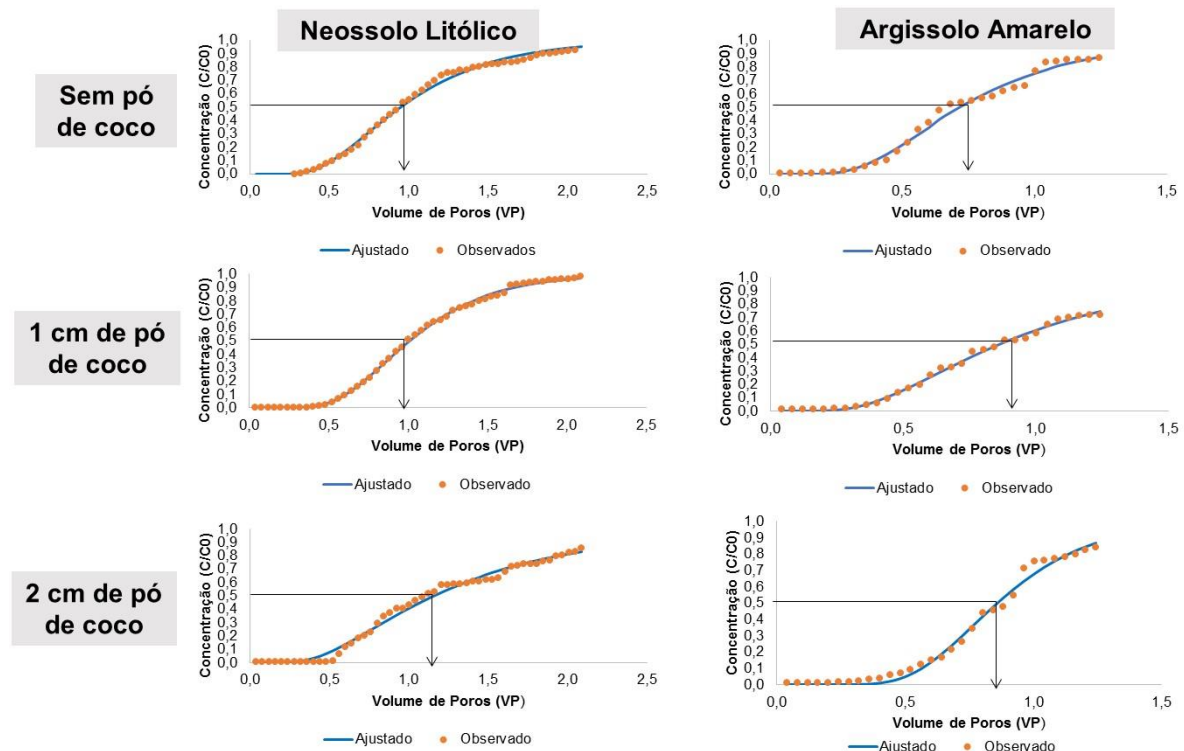
Cobertura do solo	Média
Sem pó de coco	0,1864 a
1 cm de pó de coco	0,1535 b
2 cm de pó de coco	0,1456 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.1 Ensaio para o Íon Sódio

As curvas de eluição de efluentes para o íon sódio nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo para as coberturas sem de pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, são apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Curvas de eluição do íon sódio (Na^+), ajustadas e observadas pelo modelo STANMOD (em que C/C_0 é a concentração relativa), para as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco e para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo



Em todas as curvas de eluição dos solos estudados (Figura 8) foram atingidos no lixiviado pelo menos 90 % da concentração inicial aplicada, exceto para as coberturas de 1 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo e 2 cm de pó de coco do Neossolo Litólico que atingiram 72 % e 86 %, respectivamente. O fato de ter ocorrido a menor curva de eluição nas coberturas de pó de coco pode estar relacionado à influência da cobertura de pó de coco na retenção do íon sódio no processo de lixiviação.

Ainda pela Figura 8, observando-se nas coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo verificou-se que as curvas de eluição começaram a ascender, por volta de 0,33 VP e 0,30 VP respectivamente.

O desenvolvimento e a forma das curvas de eluição de efluentes de determinado íon caracteriza o deslocamento miscível; assim, indica a existência ou não de efeitos de interação entre o soluto e o solo. Pôde-se observar que as inclinações nas curvas de eluição do íon sódio ocorreram de forma crescente, notando-se que para as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Neossolo Litólico em relação às coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Argissolo Amarelo, a inclinação das curvas ocorreu suavemente e mais tardiamente, necessitando de uma maior quantidade de VP. Quando o deslocamento das curvas se apresenta mais verticalizado, ou seja, com maior declividade, existe uma baixa interação entre soluto e o meio, o que pode ser observado no solo Argissolo Amarelo. Por outro lado, as curvas do solo Neossolo Litólico se apresentaram mais horizontais, indicando a existência de maior interação com soluto o solo.

Ainda em comparação entre os tipos de solos, percebeu-se que as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Argissolo amarelo necessitaram de menor volume de poros (VP) 1,3 VP para atingir a máxima concentração relativa ($C/C_0 = 1$) e 2,1 VP para o Neossolo Litólico. Este fato pode ser explicado (Tabela 8) pelo fato que os valores das velocidades médias de água nos poros, da solução do Neossolo Litólico apresentaram velocidade superior à solução do Argissolo Amarelo.

De acordo com Nielsen e Biggar (1962), na concentração relativa ($C/C_0 = 0,5$), o VP correspondente é o primeiro indicativo da existência ou não, de interação entre o soluto-solo. Pode-se verificar que as “setas” nas curvas da Figura 8 em que a concentração relativa (C/C_0) corresponde a 0,5 apresentaram VP inferiores a 1 em se tratando do Argissolo Amarelo. Ao que se refere ao Neossolo Litólico, o valor de VP foi maior do que 1, indicando que houve interação entre o soluto e o solo. Basso e Kiang (2017), estudando contaminantes inorgânicos comuns em resíduos urbanos, industriais e/ou rurais de espécies químicas em solos residuais arenosos e argilosos também encontraram valores de VP para $C/C_0=0,5$ superiores a um.

Tabela 8 - Parâmetros de transporte de sódio (Na^+) para as coberturas sem de pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo

Solo	Cobertura do solo	P	R	v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	λ (cm)	D ($\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$)
Neossolo Litólico	Sem pó de coco	7,78	1,07	0,26	3,86	1,01
	1 cm de pó de coco	11,99	1,09	0,19	2,50	0,46
	2 cm de pó de coco	4,68	1,39	0,07	6,40	0,43
Argissolo Amarelo	Sem pó de coco	8,31	0,82	0,03	3,61	0,12
	1 cm de pó de coco	6,03	1,00	0,03	4,98	0,17
	2 cm de pó de coco	17,84	0,91	0,04	1,68	0,07

P – número de Peclet; R – fator de retardamento; v – velocidade média de água nos poros; λ – dispersividade e D – coeficiente difusão-dispersão.

Os parâmetros de transporte do sódio nas coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) e as características das colunas estão apresentados na Tabela 8, os quais sejam o número de Peclet (P), o fator de retardamento (R), a velocidade média de água nos poros (v), a dispersividade (λ), o coeficiente de difusão-dispersão (D).

O ajuste do modelo aos dados obtidos experimentalmente e a estimativa dos parâmetros de transporte do sódio (P, R, D, v e λ) para cada tratamento foram realizados para cada coluna de solo, uma vez que segundo Álvarez-Benedí et al. (1999), a estimativa dos parâmetros de transporte se dá através do ajuste do modelo utilizado aos dados obtidos experimentalmente.

Verificou-se que para a maioria das coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), os valores correspondentes ao número de Peclet (P) foram menores que 10, indicando que o transporte predominante ocorreu por difusão. Exceto para a cobertura de 1 cm de pó de coco do Neossolo Litólico e a cobertura de 2 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo, o valor de P foi superior a 10, logo, o transporte predominante foi por convecção. Basso e Kiang (2017), estudando o retardamento e a dispersão em solos arenosos e argilosos do subgrupo Itararé, encontraram número de Peclet médios para os solos arenosos e argilosos de 2,40 e 7,16 respectivamente ocorrendo transporte predominante por difusão.

Observa-se que os valores de R estimados pelo STANMOD (Tabela 8) foram relativamente próximos dos valores indicados pelas setas nos gráficos, para todos os tratamentos estudados, indicando um bom ajuste do modelo, pois segundo Van Genuchten e

Wierenga (1986) o valor de R é considerado igual ao número de volume de poros, para $C/C_0 = 0,5$.

Em geral, foram observados menores valores para o fator de retardamento (R) nas coberturas sem pó de coco dos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo, quando comparados as demais coberturas (1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco). Dessa forma, é possível afirmar que ocorreu menor mobilidade do sódio nas coberturas (1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), estando as menores perdas desse soluto relacionadas à influência da cobertura de pó de coco na retenção do íon sódio no processo de lixiviação.

Os valores de fator de retardamento (R) foram em média iguais a 0,95; 1,05 e 1,15 VP para as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) respectivamente. Basso, Soto e Kiang (2017), estudando percolação de vinhaça em coluna de solo arenoso, encontraram valores de fator de retardamento próximos ao 1,4 VP.

O fator de retardamento, por ser um parâmetro que indiretamente expressa à capacidade do solo em reter íons, dependerá das interações entre a fase líquida e sólida que ocorram durante a percolação da solução do solo.

Para o coeficiente de difusão-dispersão (D) valores mais altos estão ligados às menores inclinações das curvas de eluição e, conseqüentemente, ao aumento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo, tornando os acréscimos na concentração relativa, baixos, para acréscimos no número de volume de poros (NIELSEN; BIGGAR, 1962). Os valores do coeficiente difusão-dispersão (D) variaram de 0,43 a 1,01 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$ no Neossolo Litólico e de 0,07 a 0,17 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$ no Argissolo Amarelo. Verificou-se que as médias de todas as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), para cada solo, foram de 0,63 e 0,12 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$ para Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo respectivamente. Santos (2016), obteve valores de D iguais a 5,70 e 1,53 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$ para os solos Latossolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo respectivamente, indicando que uma das possíveis causas para o menor D no Argissolo foi sua menor velocidade de fluxo, a qual foram de 2,63 e 2,45 $\text{cm}.\text{min}^{-1}$, respectivamente.

Assim, menor velocidade de avanço da solução no Argissolo Amarelo é uma das possíveis causas para os seus menores valores de coeficiente de dispersão difusão. O coeficiente de dispersão difusão é um indicativo da capacidade do solo em reter determinado soluto, na medida em que a frente de umedecimento da solução aplicada avança no perfil do solo (Engler et al. 2008).

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. Os valores de dispersividade do íon sódio variaram de 2,50 a 6,40 cm no Neossolo Litólico e de 1,98 a 4,68 cm no Argissolo Amarelo. Verificou-se que as médias de todas as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), para cada solo, foram de 4,25 cm e 3,42 cm para Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo respectivamente, apresentando os menores valores na cobertura de 1 cm de pó de coco do Neossolo Litólico e a cobertura de 2 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo. 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). Os valores de dispersividade, foram de $0,63 \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ e $0,12 \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ para Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo, respectivamente.

Verifica-se na Tabela 9 os valores de quadrado médio das variáveis analisadas. Não houve influência significativa para os parâmetros número de Peclet (P) e dispersividade (λ) para os fatores estudados. Nota-se influência significativa para o parâmetro fator de retardamento (R), apenas para o fator tratamento, de maneira isolada ($p < 0,05$). Já para os parâmetros velocidade média de água nos poros (v) e coeficiente de difusão-dispersão (D), houve influência apenas para o fator solo isoladamente ($p < 0,05$).

Tabela 9 - Análise de variância do íon sódio (Na^+) para os parâmetros número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente de difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ) com nível de probabilidade de 5 %

Fonte de Variação	GL	P	R	v	D	λ
Solo	1	0,85 ^{NS}	0,40 ^{NS}	16,18 *	6,99 *	4,09 ^{NS}
Cobertura	2	3,02 ^{NS}	7,80 *	1,80 ^{NS}	0,17 ^{NS}	3,20 ^{NS}
Solo*Cobertura	2	3,27 ^{NS}	0,54 ^{NS}	2,05 ^{NS}	1,87 ^{NS}	1,46 ^{NS}
Resíduo	24					
C.V. (%)		33,53	11,45	11,45	26,48	33,80

GL - grau de liberdade; NS - não significativo; * significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F

Os resultados do teste de comparação múltipla de médias para o íon sódio nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo e nas coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco

e 2 cm de pó de coco) pelo teste de Tukey em nível de 0,05 de probabilidade, são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Influência do tipo de solo para os parâmetros de transporte do íon sódio (Na^+)

Solo	D	V
Neossolo Litólico	0,81 a	0,36 a
Argissolo Amarelo	0,18 b	0,04 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Verifica-se que houve diferença nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo para o coeficiente de difusão-dispersão (D) e a velocidade média de água nos poros (v), onde Neossolo Litólico teve média maior que Argissolo Amarelo para ambos os parâmetros. Santos (2016), obteve valores de D de 5,70 e 1,53 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$ para os solos Latossolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo respectivamente, indicando que uma das possíveis causas para o menor D no Argissolo foi sua menor velocidade de fluxo, as quais foram de 2,63 e 2,45 $\text{cm}.\text{min}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 11 - Influência da cobertura do solo com pó de coco para os parâmetros de transporte do íon sódio (Na^+)

Cobertura do solo	R
Sem pó de coco	0,82 b
1 cm de pó de coco	1,01 b
2 cm de pó de coco	1,56 a

Médias seguidas dos tratamentos por letras minúsculas e as do solo por letras maiúsculas não diferem entre si, a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se que houve diferença entre o fator de retardamento (R), onde a cobertura de 2 cm de pó de coco diferiu entre as coberturas sem pó de coco e 1 cm de pó de coco, mostrando que não houve diferença entre as coberturas sem pó de coco e 1 cm de pó de coco; porém, houve diferença entre a cobertura de 2 cm de pó de coco e os demais tratamentos, concluindo que a cobertura de 2 cm de pó de coco teve uma maior redução na lixiviação do sódio (Na^+) mostrando a eficiência da cobertura de pó de coco.

O resultado da avaliação da precisão, da exatidão e do desempenho entre os dados estimados pelo STANMOD e os dados observados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Desempenho da concentração relativa para os dados estimados frente aos observados

Solo	Cobertura do solo	d	r	c	Desempenho
Neossolo	Sem pó de coco	0,9988	0,9788	0,9777	Ótimo
	1 cm de pó de coco	0,9994	0,9803	0,9796	Ótimo
Litólico	2 cm de pó de coco	0,9963	0,9762	0,9725	Ótimo
	Sem pó de coco	0,9956	0,9628	0,9586	Ótimo
Argissolo Amarelo	1 cm de pó de coco	0,9983	0,9980	0,9963	Ótimo
	2 cm de pó de coco	0,9976	0,9633	0,9609	Ótimo

r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância e c - índice de desempenho

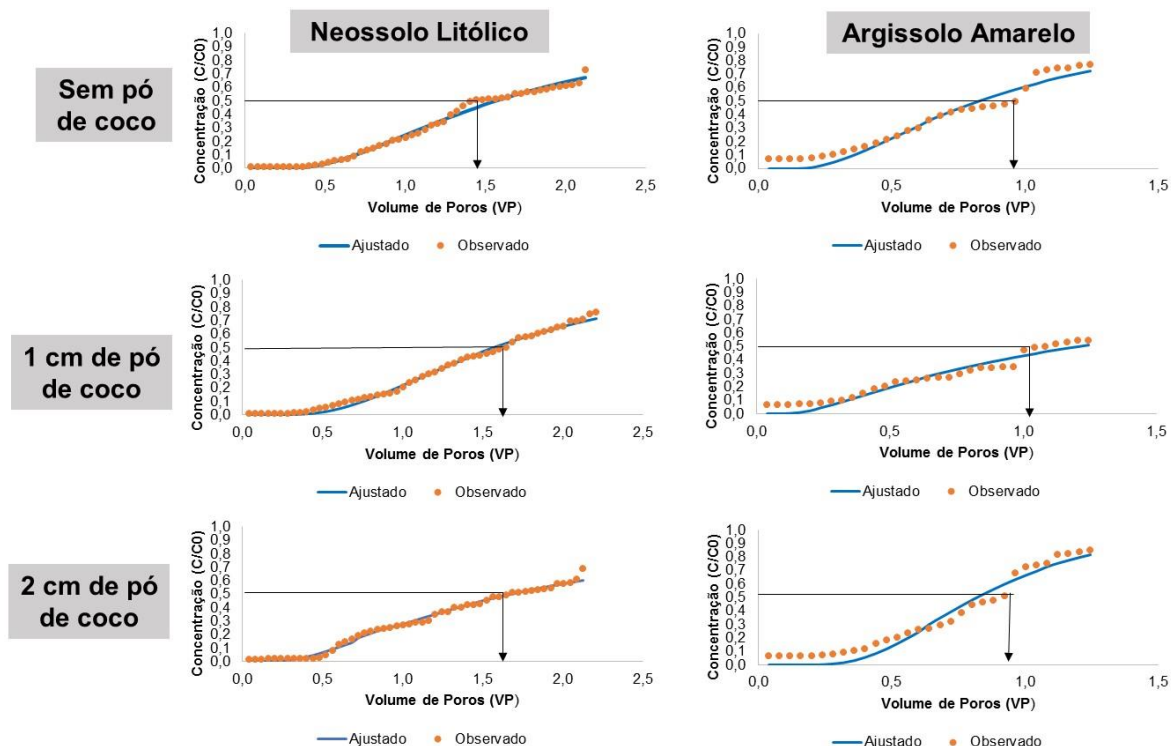
Observou-se que para todos os ensaios os coeficientes de correlação (r) foram superiores a 0,96, indicando alta precisão do ajuste do modelo. Os índices de concordância foram muito próximos da unidade, que indica elevada concordância e os índices de desempenho foram superiores a 0,85, mostrando, de acordo com a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), que todos os dados simulados pelo STANMOD apresentaram um ótimo desempenho de ajuste numérico. Andrade (2014), ao estudar os parâmetros hidrodispersivos em um Planossolo Háplico do semiárido pernambucano sob reuso agrícola, encontrou um coeficiente de correlação de 0,96 indicando um ótimo desempenho do modelo.

4.2 Ensaio para o Íon Potássio

De acordo com Miranda (2010), o potássio é um macronutriente móvel e, por isso, pode ser facilmente lixiviado ao longo do perfil do solo, sendo necessárias aplicações frequentes desse elemento para que atendam às exigências nutricionais das culturas.

As curvas de eluição de efluentes para o íon potássio nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo para as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 - Curvas de eluição do íon potássio (K^+), ajustadas e observadas pelo modelo STANMOD (em que C/C_0 é a concentração relativa), para as coberturas sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco e para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo



Em todas as curvas de eluição dos solos estudados, foram atingidos no lixiviado pelo menos 70 % da concentração inicial aplicada, exceto para a cobertura de 1 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo, que atingiu 55 %. Tal fato pode estar relacionado à influência da cobertura de pó de coco na retenção do íon potássio no processo de lixiviação. Basso, Soto e Kiang (2017), observando a capacidade de retenção e de transporte de espécies iônicas da vinhaça em um solo arenoso no cultivo de cana-de-açúcar atingiu, no lixiviado, 100 % da concentração inicial aplicada. Pinho e Miranda (2014), estudando o transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais, atingiram pelo menos de 90 % da solução inicial aplicada de potássio em Latossolos Vermelho-Amarelo e Nitossolos Vermelho.

Ainda pela Figura 9, observando-se as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo, verificou-se que as curvas de eluição começaram a ascender, por volta de 0,35 VP e 0,21 VP respectivamente.

O desenvolvimento e a forma das curvas de eluição de efluentes de determinado íon caracteriza o deslocamento miscível; assim, indica a existência ou não de efeitos de interação

entre o soluto e o solo. Pôde-se observar que as inclinações nas curvas de eluição do íon potássio ocorreram de forma crescente, notando-se que nas coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Neossolo Litólico em relação às coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Argissolo Amarelo, a inclinação das curvas ocorreu suavemente e mais tardiamente, necessitando de uma maior quantidade de VP. Quando o deslocamento das curvas se apresenta mais verticalizado, ou seja, com maior declividade, existe uma baixa interação entre soluto e o meio, o que pode ser observado no Argissolo Amarelo. Por outro lado, as curvas do Neossolo Litólico se apresentaram mais horizontais, indicando a existência de maior interação com soluto o solo.

Ainda em comparação com os tipos de solos, percebeu-se que as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) do Argissolo Amarelo necessitaram de menor volume de poros (VP) 1,3 VP para atingir a máxima concentração relativa ($C/C_0 = 1$) e 2,1 VP para o Neossolo Litólico. Este fato pode ser explicado Tabela 10, pelo fato que os valores das velocidades médias de água nos poros, da solução Neossolo Litólico apresentaram velocidade superior à solução do Argissolo Amarelo.

De acordo com Nielsen e Biggar (1962), na concentração relativa ($C/C_0 = 0,5$), o VP correspondente é o primeiro indicativo da existência ou não, de interação entre o soluto e o meio. Pode-se verificar que as “setas” nas curvas da Figura 9 em que a concentração relativa (C/C_0) corresponde a 0,5 tiveram VP inferiores a 1 em se tratando do Argissolo Amarelo. Oliveira et al. (2013), analisando a mobilidade do lítio em solos com disposição de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais encontraram valores de VP para $C/C_0 = 0,5$ inferiores a 1. Ao que se refere ao Neossolo Litólico, esses autores obtiveram valor maior que 1, indicando que houve interação entre o soluto-solo. Basso e Kiang (2017), estudando contaminantes inorgânicos como K^+ em resíduos urbanos, industriais e/ou rurais em solos residuais arenosos e argilosos do subgrupo Itararé. Basso, Soto e Kiang (2017), observando a capacidade de retenção e de transporte de espécies iônicas da vinhaça em um solo arenoso no cultivo de cana-de-açúcar. Pinho e Miranda (2014), investigando o destino de produtos químicos, aplicados em solos tropicais, encontraram valores de VP para $C/C_0=0,5$ superiores a 1.

Os parâmetros de transporte do íon potássio nas coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) e as características das colunas estão apresentados na Tabela 13, quais sejam o número de Peclet (P), o fator de retardamento (R), a velocidade de solução no solo (v), a dispersividade (λ) e o coeficiente de difusão-dispersão (D).

Tabela 13 - Parâmetros de transporte de potássio (K^+) para as coberturas sem de pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco, para os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo

Solo	Cobertura do solo	P	R	v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	Λ (cm)	D ($\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$)
Neossolo Litólico	Sem pó de coco	3,84	1,97	0,26	7,81	2,04
	1 cm de pó de coco	5,05	1,88	0,19	5,94	1,10
	2 cm de pó de coco	1,93	2,51	0,07	15,52	1,04
Argissolo Amarelo	Sem pó de coco	3,72	1,06	0,03	8,06	0,27
	1 cm de pó de coco	1,06	2,33	0,03	28,39	0,95
	2 cm de pó de coco	8,80	0,93	0,04	3,41	0,15

P – número de Peclet; R – fator de retardamento; v – velocidade média de água nos poros; λ – dispersividade e D – coeficiente difusão-dispersão.

Verificou-se que para todas as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) de ambos os solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo, os valores correspondentes ao número de Peclet (P) foram menores que 10, indicando que o transporte predominante ocorreu por difusão, corroborando com Andrade (2014), ao analisar os parâmetros hidrodispersivos em um Planossolo Háplico do semiárido pernambucano sob reuso agrícola encontrou número de Peclet 2,15, observando que o transporte predominante ocorreu por difusão.

Pode-se observar que o ajuste do modelo STANMOD foi satisfatório, quando são comparados os valores obtidos de $C/C_0 = 0,5$ com os valores do parâmetro fator de retardamento (R), estimado pelo modelo (Tabela 13), exceto para as coberturas de 2 cm de pó de coco do Neossolo Litólico e 1 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo, pois segundo Van Genuchten e Wierenga (1986) o valor de R é considerado igual ao número de volume de poros, para $C/C_0 = 0,5$. Basso, Soto e Kiang (2017), observando a capacidade de retenção e de transporte de espécies iônicas da vinhaça em um solo arenoso no cultivo de cana-de-açúcar, obtiveram fator de retardamento e volume de poros próximos de 1,4.

Os valores de fator de retardamento foram em média iguais a 1,52; 2,11 e 1,72 para as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) respectivamente, indicando que, no solo estudado, é necessário aplicar os respectivos VP, além da lâmina de irrigação a ser aplicada para compensar o retardamento desse íon em relação à frente de avanço da solução. Ainda sobre o fator de retardamento foi encontrado um menor R para a

cobertura sem pó de coco, quando comparados as demais coberturas de pó de coco, evidenciando uma forte tendência da cobertura de pó de coco na retenção do íon. Basso e Kiang (2017), estudando contaminantes inorgânicos como K^+ em doses de 250, 500 e 1000 $mg.L^{-1}$ em resíduos urbanos, industriais e/ou rurais em solos residuais arenosos e argilosos do subgrupo Itararé encontraram fator de retardamento médios de 7,56; 5,12 e 4,65, mostrando que para uma concentração menor de K^+ obteve-se um fator de retardamento maior quando comparado com doses maiores.

O fator de retardamento, por ser um parâmetro que indiretamente expressa à capacidade do solo em reter íons, dependerá das interações entre a fase líquida e sólida que ocorram durante a percolação da solução do solo, indicando existir interação entre o cátion e as cargas negativas do solo.

Observa-se os valores do coeficiente difusão-dispersão (D) variaram de 1,04 a 2,04 $cm^2.min^{-1}$ no Neossolo Litólico e de 0,15 a 0,95 $cm^2.min^{-1}$ no Argissolo Amarelo. Verificou-se que as médias de todas as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), para cada solo, foram de 1,39 e 0,46 $cm^2.min^{-1}$ para Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo respectivamente. Basso e Kiang (2017), encontraram valores mais elevados de D para o íon potássio em solo arenoso em relação a solo argiloso, indicando que uma das possíveis causas para o menor D em solo argiloso foi a sua menor velocidade de fluxo. A menor velocidade de avanço da solução no solo Argissolo Amarelo é uma das possíveis causas para os seus menores valores de coeficiente de dispersão difusão, para este solo.

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. Os valores de dispersividade do íon potássio variaram de 5,94 a 15,52 cm no Neossolo Litólico e 3,41 a 28,39 cm no Argissolo Amarelo. Verificou-se, ainda, que as médias de todas as coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco), para cada solo, foram de 9,76 cm e 13,29 cm para Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo respectivamente, apresentando os menores valores na cobertura de 1 cm de pó de coco do Neossolo Litólico e a cobertura de 2 cm de pó de coco do Argissolo Amarelo.

Verifica-se na Tabela 14 os valores de quadrado médio das variáveis analisadas. Houve influência significativa para os parâmetros número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ), apenas para o fator solo, de maneira isolada ($p < 0,05$).

Tabela 14 - Análise de variância do íon potássio (K^+) para os parâmetros número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente de difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ) com nível de probabilidade de 5 %

Fonte de Variação	GL	P	R	v	D	λ
Solo	1	8,98*	10,20*	26,01*	9,05*	5,36*
Cobertura	2	0,45 ^{NS}	0,94 ^{NS}	2,63 ^{NS}	2,11 ^{NS}	0,27 ^{NS}
Solo*Cobertura	2	0,72 ^{NS}	0,44 ^{NS}	2,84 ^{NS}	1,94 ^{NS}	0,23 ^{NS}
Resíduo	24					
C.V. (%)		56,79	11,10	11,78	46,86	36,49

GL - grau de liberdade; NS - não significativo; * significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

Os resultados do teste de comparação múltipla de médias para o íon potássio nas coberturas (sem pó de coco, 1 cm de pó de coco e 2 cm de pó de coco) pelo teste de Tukey em nível de 0,05 de probabilidade são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Influência do tipo de solo para os parâmetros de transporte do íon potássio (K^+)

Solo	P	R	v	D	λ
Neossolo Litólico	7,14 a	1,67 a	0,36 a	2,71 a	6,59 b
Argissolo Amarelo	1,25 b	1,13 b	0,04 b	0,97 b	26,43 a

P – número de Peclet; R – fator de retardamento; v – velocidade média de água nos poros; λ – dispersividade e D – coeficiente difusão-dispersão. Médias seguidas dos tratamentos por letras minúsculas e as do solo por letras maiúsculas não diferem entre si, a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

Verifica-se que houve diferença nos solos Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo para os parâmetros número de Peclet (P), fator de retardamento (R), velocidade de água nos poros (v), coeficiente difusão-dispersão (D) e dispersividade (λ), onde o Neossolo Litólico apresentou valores de média superiores que o Argissolo Amarelo, exceto para dispersividade (λ) que teve a média do Argissolo Amarelo maior que o Neossolo Litólico. Pinho e Miranda (2014), ao estudarem os parâmetros hidrodispersivos em Latossolos Vermelho-Amarelo e Nitossolos Vermelho do município de Piracicaba também encontraram valores de dispersividade (λ) maiores no Nitossolo Vermelho.

O resultado da avaliação da precisão, da exatidão e do desempenho entre os dados estimados pelo STANMOD e os dados observados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Desempenho da concentração relativa para os dados estimados frente aos observados

Solo	Cobertura do solo	D	r	c	Desempenho
Neossolo Litólico	Sem pó de coco	0,9980	0,9768	0,9748	Ótimo
	1 cm de pó de coco	0,9991	0,9789	0,9767	Ótimo
Argissolo Amarelo	2 cm de pó de coco	0,9977	0,9770	0,9748	Ótimo
	Sem pó de coco	0,9937	0,9487	0,9427	Ótimo
	1 cm de pó de coco	0,9915	0,9430	0,9350	Ótimo
	2 cm de pó de coco	0,9889	0,9524	0,9418	Ótimo

r - coeficiente de correlação; d - índice de concordância e c - índice de desempenho.

Observou-se que para todos os ensaios os coeficientes de correlação (r) foram superiores a 0,94, indicando alta precisão do ajuste do modelo. Os índices de concordância foram muito próximos da unidade, que indica adequada concordância e os índices de desempenho foram superiores a 0,85, mostrando, de acordo com a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), que todos os dados simulados pelo STANMOD apresentaram um ótimo desempenho de ajuste numérico. Moura et al. (2013), ao estudarem os parâmetros hidrodispersivos em solos da Zona da Mata de Pernambuco, encontraram coeficientes de correlação superiores a 0,98 e ótimo desempenho do modelo.

5 CONCLUSÕES

1 - A cobertura de pó de coco mostrou-se eficiente na diminuição da lixiviação de íons nos solos estudados.

2 - Houve maior interação entre o sódio e o solo no tratamento com 2 cm de pó de coco em relação aos demais, e as maiores perdas de sódio por lixiviação ocorreram nas amostras sem cobertura de pó de coco. Para o íon potássio, houve maior interação nos tratamentos com cobertura de pó de coco, sendo as perdas associadas à ausência de pó de coco.

3 - Os íons sódio e potássio se deslocaram com transporte predominantemente por difusão.

4 - Os valores do fator de retardamento (R) foram superiores para as coberturas de 2 cm de pó de coco no íon sódio, enquanto que para o íon potássio a cobertura de 1 cm de pó de coco apresentou maior R. Adicionalmente, os valores de R foram superiores para o íon potássio em relação ao íon sódio, indicando que o íon potássio foi retido com maior intensidade pelo solo do que o íon sódio.

5 - O modelo STANMOD apresentou ótimo desempenho de ajuste numérico na simulação do transporte de solutos no solo

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, M.A.K.; CAMARGO, O.A. Movimentação de nitrato em horizonte superficial e subsuperficial de Latossolo e Nitossolo com cargas variáveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 1, 2010, p. 81-88.
- ALMEIDA, J.P.N.; COSTA, L.R.; SAMPAIO, P.R.F.; AZEVEDO, J.; DIAS, N.S. Utilização de esgoto doméstico tratado na produção de mudas de maracujazeiro amarelo. **Revista Verde**, v. 7, n. 4, 2012, p. 69-75.
- ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; ISLA, T.; CARTÓN, A.; BOLADO, Y.S. **Efecto de la velocidad de flujo en los parámetros de transporte de solutos**. In: Estudios en la zona no saturada del suelo. Terenife: ICIA, 1999, p. 157-161.
- ANDRADE, C.W.L. **Caracterização hidrodispersiva de um planossolo háplico do semiárido sob reúso agrícola**. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.
- ANDRADE, I.P.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, J.A.A.; FREIRE, M.B.G.S.; SANTOS, T.E. Impacto do reúso de efluentes de esgoto no lixiviado de solos cultivados com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, 2005, p. 212-216.
- AGRAFIOTI, E.; DIAMADOPOULOS, E. A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete. **Agricultural Water Management**, v. 105, 2012, p. 57– 64.
- ARAÚJO, D.C.S. **Dinâmica da umidade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano**. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.
- ARAÚJO, E.A.; KER, J.C.; NEVES, J.C.L.; LANI, J.L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, 2012, p. 187-206.
- BASSO, J.B.; KIANG, C.H. Retardamento e dispersão hidrodinâmica de cobre, potássio e cloreto em solos residuais do subgrupo Itararé no estado de São Paulo. **Revista Águas Subterrânea**, v. 31, n. 1, 2017, p. 117-133.
- BASSO, J.B.; SOTO, M.A.A.; KIANG, C.H. Percolação de vinhaça em coluna de solo arenoso da formação Rio Claro. **Revista Águas Subterrânea**, v. 31, n. 1, 2017, p. 52-65.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; FERREIRA, P.A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, 2006, p. 604-611.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; NUCCI, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2002, p. 72-122.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Bur. Soils, BULL, v. 38, 1907, 61p.

CAMARGO, A. P; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, 1997, p. 89-97.

CARRIÓ, O.A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Revista Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, 2002, p. 533-535.

CHEN, W.; LU, S.; JIAO, W.; WANG, M.; CHANG, A.C. Reclaimed water: A safe irrigation water source. **Environmental Development**, v. 8, 2013, p. 2211-4645.

CONCEIÇÃO, B.S. **Modelagem da dinâmica de nitrato e potássio no solo em bananeiras fertirrigadas**: modelos paramétricos e Modelo HYDRUS. 2016. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2016.

CORRÊA, M.M.; RIBEIRO, M.R. Levantamento detalhado de solos da fazenda Nossa Senhora do Rosário (Pesqueira – PE). **Relatório Técnico: UFRPE/UFPE/CNPq/BNB**. Recife, PE, 2001, 35 p.

COSTA, L.F.; ANTONINO, A.C.D.; HECK, R.J.; COUTINHO, A.P.; PIMENTEL, R.M.M.; VASCONCELO, T.C.; MACHADO, C.B. Espaço poroso em solos brasileiros usando microtomografia computadorizada de raios-X. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, 2016, p. 692-706.

COSTA, J.P.V.; BARROS, N.F.; BASTOS, A.L.; ALBUQUERQUE, A.W.A. Fluxo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidade e de compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, 2009, p. 56–62.

DUARTE, A.S. **Reuso de água residuária tratada na irrigação da cultura do pimentão**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Utilização da Casca de Coco como Substrato Agrícola**. 1. ed. 2002, 22 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. 2011, 225 p.

ENGLER, M.P.C.; CICHOTA, R.; LIER, Q.J.V.; BLOEM, E.; SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. An alternative approach for the determination of soil water mobility. **Pedosphere**, v. 18, n. 3, 2008, p. 328-334.

EPSTEIN, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media. **Chemical Engineering Science**, v. 44, n. 3, 1989, p. 777– 779.

FEIKE, L.J.; DANE, J.H. Moment method applied to solute transport with binary and ternary exchange. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, 1992, p. 667-674.

FREITAS, C.A.S.; SILVA, A.R.A.; BEZERRA, F.M.L.; FERREIRA, C.S.; ANDRADE, R.R. Crescimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* L.) irrigada com água de esgoto doméstico tratado. **Conexão Ciência e Tecnologia**, v. 6, n. 1, 2012, p. 27-43.

FRIED, J.J.; COMBARNOUS, M.A. Dispersion in porous media. **Advances in Hydroscience**, v. 7, 1971, p. 169-282.

GOMES, A.O. **Reuso de efluente tratado para recuperação de área degradada**. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental) - Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2015.

GOMES, R.L.R.; SILVA, M.C.; COSTA, F.R.; LIMA JUNIOR, A.F.; OLIVEIRA, I.P.; SILVA, D.B. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Faculdade Montes Belos**, v. 8, n. 5, 2015, p. 72-139.

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

GONÇALVES, A.D.M.A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, 2013, p. 1174-1184.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. 2004, 494 p.

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. 1995, 720 p.

JURY, W.A.; SPOSITO, G. Field Calibration and validation of solute transport models for the unsaturated zone. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 6, 1985, p. 1331-1341.

LEIJ, F.J.; BRADFORD, S.A. **3DADE**: a computer program for evaluating three-dimensional equilibrium solute transport in porous media. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1994.

- LEIJ, F.J.; TORIDE, N. **N3DADE**: A computer program for evaluating nonequilibrium three dimensional equilibrium solute transport in porous media. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1997.
- MARTINEZ, P.F. Manejo de substrato para horticultura. In: Encontro Nacional de Substratos para Plantas, Anais...Campinas: IAC, 2002. p. 53-76.
- MATOS, A.T.; GARIGLIO, H.A.A.; LO MONACO, P.A.V. Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, 2013, p. 743–749.
- MEDEIROS, S.S.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A.; NEVES, J.C.L.; SOUZA, J.A.; Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo do estado nutricional do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, 2008, p. 109–115.
- MEEROW, A.W. Growth of two subtropical ornamentals using coir dust (coconut mesocarp pith) as a peat substitute. **Hort Science**, v. 29, 1994, p. 1484-1486.
- MEHTA, B.K.; SHIOZAWA, S.; NAKANO, M. Measurement of molecular diffusion of salt in unsaturated soils. **Soil Science**, v. 159, n. 2, 1995, p. 115-121.
- MICHEREFF, S.J. **Tutorial do programa STATISTIX 9**. 2009.
- MILFONT, M.L.; ANTONINO, A.C.D.; MARTINS, J.M.F.; NETTO, A.M.; CORRÊA, M.M. Caracterização hidrodispersiva de dois solos do Vale do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, 2006, p. 81-87.
- MIRANDA, R.J.A. **Lâminas de irrigação com água residuária e adubação orgânica na cultura do algodão BRS Safira**. 2010. 83 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.
- MONTENEGRO, A.A.A.; ABRANTES, J.R.C.B.; LIMA, J.L.M.P.; SINGH, V.P.; SANTOS, T.E.M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**. v. 109, 2013, p. 139-149.
- MONTENEGRO, A.A.A. **Stochastic Hydrogeological Modelling of Aquifer Salinization from Small Scale Agriculture in Northeast Brazil**. 1997, 264 f. PhD Thesis - University of Newcastle Upon Tyne. UK, 1997.
- MOURA, A.E.S.S.; CARVALHO, J.F.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; CARMO, A.I.; MAGALHÃES, A.G.; SOUSA, C.C.M.; ANTONINO, A.C.D.; ARAÚJO, J.A.C.; MELO, R.O. Determinação de parâmetros hidrodispersivos em solos da Zona da Mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, 2013, p. 109-115.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement in soils: I. Experimental information. **Soil Science Society America**, v. 25, n. 1, 1961, p. 1-5.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement: ii. Behavior of tracers. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 26, n. 2, 1962, p. 125-128.

NOVY QUADRI, M.G. **Transferts de solutes dans les sols satures et non satures application au pentachlorophenol**. 1993. 204 f. Tese (Doutorado em Ciência Biológica) - Universite of Grenoble, 1993.

OLIVEIRA, L.F.C.; LEMKE-DE-CASTRO, M.L.; RODRIGUES, C.; BORGES, J.D. Adsorção e deslocamento do íon cádmio em solos do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, 2010, p. 848-855.

OLIVEIRA, L.F.C.; NOGUEIRA, J.G.; FRIZZARIM, S.S.; FIA, R.; FREITAS, J.S.; FIA, F.R.L. Sorção e mobilidade do lítio em solos de áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, 2013, p. 139-148.

PARKER, J.C.; VAN GENUCHTEN, M.TH. Flux-averaged and volume averaged concentrations in continuum approaches to solute transport. **Water Resource Research**, v. 20, n. 7, 1984, p. 866-872.

PINHO, R.E.C. **Teores de água e solutos no solo: desempenho e sensibilidade no modelo Hydrus-1D**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2009.

PINHO, R.E.C.; MIRANDA, J.H. Avaliação do modelo hydrus-1d na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, 2014, p. 899-911.

PINO, G.A.H. **Biossorção de Metais Pesados Utilizando Pó da Casca de Coco Verde (Cocos nucifera)**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Pontifícia Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

PRAGANA, R.B. **Potencial do resíduo da extração da fibra de coco como substrato na produção agrícola**. 1998. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1998.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. 1996, 446 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. 1990, p. 188.

ROCHA, F.A.; SILVA, J.O.; BARROS, F.M. Reuso de águas residuária na agricultura: a experiência israelense e brasileira. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v. 6, n. 11. 2010, p. 1-9.

ROLIM, H.O.; CHAVES, J.R.; NUNES, A.B.A.; SILVA FILHO, H.A.; SANTOS, E.V.M. Qualidade dos efluentes de sistemas de tratamento Biológico UASB E UCT para reuso agrícola. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 2, 2016, p. 393-414.

RUIZ, H.A.; FERREIRA, P.A.; ROCHA, G.C.; BORGES JÚNIOR, J.C.F. Transporte de solutos no solo. In: van LIER, Q. J. (Ed.) Física do solo. Viçosa: SBCS, 2010. p. 298.

SANTOS, C.H. **Análise espectroscópica da matéria orgânica de solos sob aplicação de águas residuárias**. 2008. 165 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) - Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Paulo, 2008.

SANTOS, A.P.R. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado rico em sódio em propriedades químicas e físicas de uma argissolo vermelho distrófico cultivado com capim-tifton 85**. 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2004.

SANTOS, J.S.; LIMA, V.L.A.; BORGES JÚNIOR, J.C.F.; SILVA, L.V.B.D.; AZEVEDO, C.A.V. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica e de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, 2010, p. 1226–1233.

SANTOS, R.S.S.; MIRANDA, J.H.; SILVA, L.P. Soil transport parameters of potassium under a tropical saline soil condition using STANMOD. **Geophysical Research**. v. 17, 2015.

SANTOS, R.S.S. **Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino**. 2016. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016.

SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA JUNIOR, V.P. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura de solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, 2008, p. 113-125.

SANTOS JÚNIOR, J.A.; BARROS JÚNIOR, G.; SANTOS, J.K.L.; BRITO, E.T.F.S. Uso racional da água: ações interdisciplinares em escola rural do semiárido brasileiro. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, 2013, p. 263-271.

SCHULZ, C. T.; HENKES A. J. Reaproveitamento d’água da estação de tratamento de efluentes: empresa Intelbrás – São José (SC). **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 2, n. 2, 2014, p. 338-384.

SERRAT, B.M.; LIMA, M.R.; GARCIAS, C.E.; FANTIN, E.R.; CARNIERI, I.M.R.S.A.; PINTO, L.S. **Conhecendo o solo**. 2002, p. 32.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.TH.; SEJNA, M.; Development and applications of the Hydrus and STANMOD software packages and related codes. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 2, 2008, p. 587-600.

SKIDMORE, E.L. Comments on chain method for measuring soil roughness. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 5, 1997, p. 1532-1533.

SILVA, N.F.; LELIS NETO, J.A.; TEIXEIRA, M.B.; CUNHA, F.N.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. **Revista Irriga**, Edição Especial, 2012, p. 340-350.

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

SILVA, L.P.; LIER, Q.J.V.; CORRÊA, M.M.; MIRANDA, J.H.; OLIVEIRA, L.A. Retention and Solute Transport Properties in Disturbed and Undisturbed Soil Samples. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016, p. 1-10.

SIMÕES, K.S.; PEIXOTO, M.F.S.; ALMEIDA, A.T.; LEDO, C.A.S.; PEIXOTO, C.P.; PEREIRA, F.A.C. Água residuária de esgoto doméstico tratado na atividade microbiana do solo e crescimento da mamoneira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 5, 2013, p. 518–523.

SOUZA, C.F.; BASTOS, R.G.; GOMES, M.P.M.; PULSCHEN, A.A. Eficiência de estação de tratamento de esgoto doméstico visando reúso agrícola. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, 2015, p. 1-11.

SOUZA FILHO, E.J. **Reúso de esgoto doméstico tratado, baseado em diferentes níveis de reposição nutricional para cultura de melancia no Semiárido Pernambucano**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SOUZA, A.L.; MATSURA, E.E.; MIRANDA, J.H.; COLOMBO, A. Ajuste de parâmetros de transporte de solutos no solo utilizando Matlab 6.5. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, 2011, p. 1064-1074.

TELLES, D.; COSTA, R.H.P.G. **Reúso da água**. 2007. p. 311.

TITO, G.A.; CHAVEZ, L.H.; GUERRA, H.O.C. Mobilidade do zinco e do cobre em Argissolo com aplicação de argila bentonita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, 2012, p. 938–945.

TORIDE, N.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. The CXTFIT code for estimating transport parameter from laboratory or field tracerexperiments. Version 2.0. U. S. Salinity Lab., ARS-USDA, Riverside, CA., 1995.

TOSCO, T.; SETHI, R. MNM1D: A Numerical Code for Colloid Transport in Porous Media: Implementation and Validation. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 4, 2009, p. 517-525.

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

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 3, 1980, p. 892-898.

VAN GENUCHTEN, M.T. Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. Riverside: USDA, ARS, U. S. Salinity Laboratory, 1981.

VAN GENUCHTEN, M.T. Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions. **Computers & Geosciences**, v. 11, n. 2, 1985, p. 129-147.

VAN GENUCHTEN, M.T.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: Black, C. A. (Ed.) Methods of soil analysis. Madison: **Soil Science Society of America**, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods: p. 1025-1054.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos** – Um manual para regiões de clima quente. 1994. p. 210.

WILD, A. Mass flow and diffusion. In: Greenland, D. J.; Hayes, M.H.B. eds. The chemistry of soil processes. Chichester: John Wiley and Sons, 1981, p. 37-80.