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

**Avaliação da Infiltração da água no solo utilizando modelos
determinísticos**

Verena Benício de Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2015**

Verena Benício de Oliveira
Engenheira Agrônoma

**Avaliação da Infiltração da água no solo utilizando modelos
determinísticos**

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2015

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

Oliveira, Verena Benício de
Avaliação da Infiltração da água no solo utilizando modelos determinísticos / Verena
Benício de Oliveira. - - Piracicaba, 2015.
67 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2015.

1. Infiltração 2. Taxa de infiltração 3. Colunas de solo homogêneo 4. Modelos preditivos
I. Título

CDD 631.432
O48a

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

Aos meus pais, Valdemir e Elza,
por todo amor, carinho, incentivo e compreensão.

Com amor, **DEDICO**

AGRADECIMENTOS

À Deus, pai e amigo de todas as horas,

À minha família, minha base: meus pais, meus irmãos Vanessa e Vinícius, minha avó Olga, meu cunhado Marcos, pelo incentivo, cuidado, amor e orações. Amo muito todos vocês.

Ao querido professor e orientador Paulo Leonel Libardi. Agradeço pelos ensinamentos, disposição em ajudar, paciência e amizade,

Ao professor Sergio de Oliveira Moraes, pela amizade divertida e paciência,

Ao professor Jarbas Honorio de Miranda, pela agradável convivência diária,

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e , pela oportunidade de pós-graduação;

Ao Flávio, por todo apoio, incentivo, carinho e compreensão.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Francisco e Fernando, e aos funcionários da biblioteca, meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos Fernando, Ismael, Helon e Marcos, pela amizade, ajuda e incentivo durante a execução deste trabalho,

Aos amigos que conheci no Departamento de Engenharia de Biosistemas: Laiane, Monica, Christiane, Marcelo, Angelica, Valéria, Roque, André, Luíz Fernando, Luciano, Isaac e Cezar, pela amizade e bons momentos durante o curso.

Ao amigo Hélio, por todo apoio e amizade,

Aos amigos Flávia e Rafael, pela amizade, paciência e incentivo durante esses anos,

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO	21
2.1 Revisão Bibliográfica	21
2.2 Material e Métodos.....	25
2.2.1 Solos utilizados	25
2.2.2 Coleta das amostras	25
2.2.3 Caracterização física	26
2.2.4 Colunas experimentais.....	26
2.2.5 Modelos empíricos e teóricos.....	28
2.2.5.1 Equação de Kostiakov.....	29
2.2.5.2 Equação de Horton.....	29
2.2.5.3 Equação de Green & Ampt.....	30
2.2.5.4 Equação de Philip	30
2.2.6 Análise de Resultados.....	31
2.3 Resultados e Discussão.....	33
3 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS.....	65

RESUMO

Avaliação da Infiltração da água no solo utilizando modelos determinísticos

A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, com grande importância para a hidrologia, irrigação e agricultura. À medida que a água infiltra, as camadas superiores do solo vão se umedecendo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Sob condições de campo, a água que infiltra pode fluir tanto na vertical, como na horizontal, dependendo do tipo de solo e declividade do terreno. A taxa de infiltração da água no solo é afetada, principalmente, pelas características do solo que afetam a geometria de seu sistema poroso, como textura e estrutura, e pode ser determinada tanto no campo como em laboratório, por diferentes métodos. Com a intenção de otimizar a previsão da infiltração da água no solo, diversos modelos foram desenvolvidos, podendo ser classificados em três grupos: empíricos, semi-empíricos e com base física. O objetivo deste trabalho foi avaliar a infiltração de água em solos com diferentes texturas e comparar a qualidade do ajuste de diferentes modelos usualmente empregados. As curvas da taxa de infiltração e da infiltração acumulada foram determinadas em laboratório utilizando amostras de solo homogeneamente acondicionadas em colunas e comparadas pelos seguintes modelos: Kostiaikov, Horton, Green & Ampt, e Philip. Dentre os solos estudados, o solo 3 (textura franco arenosa) foi o que apresentou a maior taxa de infiltração e a maior VIB, provavelmente devido a menor proporção de argila e maior presença de macroporos, facilitando a infiltração da água no solo. Dos modelos analisados, o de Kostiaikov, seguido pelo de Philip, foram os que apresentaram em média os melhores valores estimados da taxa de infiltração quando comparados com os valores medidos em laboratório. O gráfico do avanço da frente de molhamento com a raiz quadrada do tempo de infiltração (horizontal) ajustou-se perfeitamente ao modelo de Philip. No que respeita a infiltração vertical tal gráfico foi semelhante ao da horizontal (linha reta), mas com maior inclinação.

Palavras-chave: Infiltração; Taxa de infiltração, Colunas de solo homogêneo, Modelos preditivos

ABSTRACT

Evaluation of the soil water Infiltration using deterministic models

Infiltration is the process in which the water passes through the soil surface, being of great importance for hydrology, irrigation and agriculture. As the water infiltrates, the soil water content profile will change and the infiltrated water can flow vertically or horizontally, depending on the soil type and land slope. The soil water infiltration rate is mainly affected by soil properties that affect its porous geometry, such as texture and structure, and can be determined in the field and in the laboratory, using different methods. In order to optimize the prediction of the soil water infiltration, many different models have been developed and may be classified into three groups: empirical, semi-empirical and physically based. The objective of this study was to evaluate the water infiltration in soils with different textures and compare the quality of fit of the different used models. The infiltration rate curves and the cumulative infiltration curves were determined in the laboratory using soil samples homogeneously packed in column and compared by the following models: Kostiakov, Horton, Green & Ampt and Philip. Among the studied soils, the soil 3 (sandy loam texture) presented the highest infiltration rate and the highest basic infiltration rate, probably due to lower clay content and larger quantity of macropores, facilitating the water infiltration into the soil. Among the tested models, Kostiakov, followed by Philip, presented, on average, the best estimated values of the infiltration rate compared to the values measured in the laboratory. The front of the advancing wetting graph of the square root of the infiltration time (horizontal) well set to Philip model. With respect to this vertical graph infiltration was similar to the horizontal (straight line) but more inclined.

Keywords: Infiltration; Infiltration rate; Homogeneous soil columns; Predictive models

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Esquema do arranjo experimental para a medida da infiltração vertical e horizontal da água no solo..	27
Figura 2 -Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 no sentido horizontal.	34
Figura 3 -Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função o tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 no sentido vertical.....	34
Figura 4 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 no sentido horizontal.	35
Figura 5 -Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 no sentido vertical..	35
Figura 6 -Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 no sentido horizontal.....	36
Figura 7 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 no sentido vertical.....	36
Figura 8 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostikov em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal.	37
Figura 9 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostikov em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical.	37
Figura 10 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostikov em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal.....	38
Figura 11 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostikov em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical.....	38
Figura 12 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostikov em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal.....	39

Figura 13 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical.	39
Figura 14 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal	40
Figura 15 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical.	41
Figura 16 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal..	41
Figura 17 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical.....	42
Figura 18 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal.	42
Figura 19 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical.....	43
Figura 20 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal.	44
Figura 21 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical.	44
Figura 22 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal	45
Figura 23 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical.....	45
Figura 24 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal	46
Figura 25 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical.	46
Figura 26 -Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para infiltração horizontal nos solos 1 a), 2 c) e 3 e) e vertical, solos 1 b, 2 d) e 3 f).....	47
Figura 27 -Perfis de conteúdo de água do solo 1 no sentido horizontal.	48
Figura 28 -Perfis de conteúdo de água do solo 1 no sentido vertical.	48
Figura 29 -Perfis de conteúdo de água do solo 2 no sentido horizontal.	49
Figura 30 -Perfis de conteúdo de água do solo 2 no sentido vertical..	49
Figura 31 -Perfis de conteúdo de água do solo 3 no sentido horizontal.	49

Figura 32 -Perfis de conteúdo de água do solo 3 no sentido vertical	50
Figura 33 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal.	51
Figura 34 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical.....	51
Figura 35 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal.	52
Figura 36 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical	52
Figura 37 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal.	53
Figura 38 -Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical..	53
Figura 39 -Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 1 no sentido horizontal	57
Figura 40 -Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 1 no sentido vertical	57
Figura 41 -Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 2 no sentido horizontal.	58
Figura 42 -Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 2 no sentido vertical	58
Figura 43 -Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 3 no sentido horizontal.	59
Figura 44 -Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 3 no sentido vertical.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Distribuição granulométrica, classe textural e densidade para os três solos analisados.....	26
Tabela 2 -Parâmetros do modelo de Kostiakov obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical.....	54
Tabela 3 -Parâmetros do modelo de Horton obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical.	55
Tabela 4 -Parâmetros do modelo de Green & Ampt obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical.....	54
Tabela 5 -Parâmetros do modelo de Philip obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical.....	56
Tabela 6 -Índices estatísticos da comparação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos.....	61
Tabela 7 -Índices estatísticos da comparação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos.	62

1 INTRODUÇÃO

A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo. À medida que a água infiltra, as camadas superiores do solo vão se umedecendo, alterando gradativamente o perfil de umidade. No campo, a água infiltrada pode fluir tanto na vertical, como na horizontal, dependendo do tipo de solo e declividade do terreno. Qualquer alteração no comportamento do solo poderá refletir em prejuízos à dinâmica da água. Características como textura e estrutura são importantes, pois são características determinantes na qualidade físico-hídrica do solo, estando diretamente relacionadas à condutividade hidráulica.

O conhecimento da infiltração da água no solo é fundamental para a solução de problemas relativos às áreas de irrigação e drenagem e conservação da água do solo.

A lâmina de água que atravessa a superfície do solo por unidade de tempo define a taxa de infiltração, que decresce com o tempo, atingindo um valor final constante. A estimativa dessa taxa e da lâmina acumulada são de grande importância devido a sua aplicação na agricultura e meio ambiente, pois permite quantificar o escoamento superficial, a erosão, a capacidade de recarga, definir operação de sistemas de irrigação e estudar os efeitos de diferentes práticas de manejo.

Em geral, a capacidade de infiltração de um solo seco é inicialmente elevada, mas diminui de um ritmo acelerado para um valor mais ou menos constante.

Durante várias décadas, os processos de infiltração tornaram-se importantes, levando ao desenvolvimento de modelos diferentes que calculam a infiltração em função do tempo ou de alguns parâmetros físicos (GREEN & AMPT, 1911; KOSTIAKOV, 1932; HORTON, 1940; PHILIP, 1957).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a infiltração de água em solos com diferentes texturas e comparar a qualidade do ajuste das equações de Kostiakov, Horton, Green & Ampt, e Philip aos dados experimentais obtidos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

Segundo Letey (1985), quando se fala em produção de culturas, não se deve pensar somente nas generalidades a respeito das propriedades físicas do solo, mas sim nos fatores que realmente afetam o crescimento das plantas. É importante que se entenda e saiba separar os fatores que afetam diretamente, dos que afetam indiretamente. A disponibilidade de água, oxigênio, o controle da temperatura e a resistência mecânica são considerados os fatores que afetam diretamente, sendo a água o fator dominante, pois ela afeta os três outros fatores.

Com relação à disponibilidade de água, sabe-se que a água que infiltra no solo determina o balanço de água na zona radicular das culturas, o que a torna essencial para o planejamento e manejo da agricultura. As atividades de uso da terra exercem significativa influência sobre a infiltração e o homem pode, assim, modificar a capacidade de infiltração dos solos pelo manejo (REICHARDT et al., 1996).

A infiltração desempenha um papel vital para o suporte da vida na Terra pois constitui a fonte de água que sustenta o crescimento de vegetação. A água filtrada remove os contaminantes por meio de processos físicos, biológicos e químicos, e, reabastece o seu fornecimento ao solo, poços, nascentes e córregos (ORAM, 2005).

A água quando não infiltra no solo, pode escorrer provocando erosão, inundação, transporte de poluentes e degradação de sua qualidade. A previsão de inundações e erosões depende da taxa de infiltração da água no solo. Daí a importância de se quantificar essa infiltração e conhecer esse processo. A redução do escoamento superficial no solo e erosão pode estar relacionada com um aumento na capacidade de infiltração de água, enquanto que solos com alta resistência podem impedir o crescimento das raízes e reduzir a produtividade das culturas (BENGOUGH; MULLINS, 1990).

O processo de infiltração da água no solo é influenciado, em menor ou maior grau, por diversos fatores. Dentre estes fatores estão os relacionados ao solo, como as propriedades físicas, principalmente a textura e a estrutura, que influenciam

expressivamente a movimentação da água no solo, sendo o tamanho das partículas e a macroporosidade os atributos mais importantes (SILVA; KATO, 1997).

Solos que possuem partículas maiores, textura mais arenosa, apresentam menor porosidade total, porém maior porcentagem de macroporos, enquanto que os solos que apresentam partículas menores, textura mais argilosa possuem uma maior porcentagem de microporos. No solo, o movimento do ar e da água ocorre através dos macroporos, pois nos microporos o movimento do ar é dificultado, e o da água fica restrito principalmente a capilaridade (HILLEL, 1980).

Quando a água é adicionada a um solo seco, por chuva ou irrigação, ela desloca gradualmente o ar nos espaços porosos e assim preenche os poros. Quando todos os poros, grandes e pequenos, são preenchidos, o solo é dito estar saturado ou em sua capacidade máxima de retenção (PARHI et al., 2007; LIBARDI, 2012).

A taxa de infiltração da água no solo é elevada no início do processo de infiltração e decresce exponencialmente com o tempo, aproximando-se de um mínimo e constante quando o solo se encontra saturado, conhecido como velocidade de infiltração básica (VIB) (ALVES SOBRINHO et al., 2003). Um solo com maior quantidade de macroporos apresentará maior taxa de infiltração inicial, assim como maior VIB.

A infiltração da água no solo pode ser acentuada por vários fatores, incluindo preparo, adição de compostos, ou até mesmo a substituição por um solo que seja mais permeável. Sendo que, alternativas como, alterações no manejo, são mais viáveis do que uma possível substituição do solo, o que é caro e limitado a materiais locais (CRAUL, 1994).

A cobertura e os tipos de uso do solo podem exercer efeitos positivos e negativos sobre as condições de infiltração da água no solo. O sistema de manejo convencional, pisoteio animal e a intensa utilização de mecanização, aumentam a probabilidade de compactação do solo devido às tensões recebidas na área (REICHARDT; TIMM, 2004). Porém, solos sob o sistema de plantio direto também podem apresentar valores elevados de densidade do solo e menor macroporosidade. A prática de rotação de culturas associada ao plantio direto auxilia quando se utiliza plantas com sistema radicular profundo que se desenvolvem em solos compactados (ABREU et al., 2004).

Muitos métodos para a determinação da infiltração de um solo estão disponíveis na literatura, para condições de campo e de laboratório, porém nenhum método é satisfatório para todas as condições. A escolha do método a ser utilizado depende de fatores como disponibilidade de suprimentos e equipamentos, problema a ser resolvido, conhecimento do experimentador, e recursos disponíveis (JOHNSON, 1991).

A taxa de infiltração geralmente é determinada a partir de dados de campo, sendo que os principais métodos são: infiltrômetro de anel, permeâmetro de disco, alagamento de bacias ou sulcos, e aspersão (simulação de chuva) (LILI et al., 2008). Os métodos de campo podem ser comprometidos devido a falhas experimentais e à alta variabilidade espacial e temporal (VAN ES, 1993).

As medições em laboratório oferecem maior flexibilidade para as condições iniciais e de contorno, porém podem produzir valores que não são representativos das condições de campo (WESSELEK et al., 1994). A determinação da taxa de infiltração e infiltração acumulada realizada em laboratório é, normalmente, feita em colunas pequenas, no sentido horizontal ou vertical.

Ao longo dos anos, a importância do processo de infiltração para a hidrologia, irrigação e agricultura atraiu a atenção de uma grande quantidade de cientistas do solo e da água, resultando no desenvolvimento de vários modelos para a previsão da infiltração da água no solo (MACHIWAL et al., 2006). Estes modelos podem ser classificados, em geral, em três grupos (MISHRA et al., 2003). Os modelos com base física (física do solo) utilizam a lei da conservação da massa e a lei de Darcy, sendo exemplos, os modelos de Philip (1957, 1969) e Green & Ampt (1911). Os modelos semi-empíricos empregam formas simples da equação da continuidade e hipóteses simples sobre a relação entre a taxa de infiltração e a infiltração acumulada. Exemplos de modelos semi-empíricos são os modelos de Horton (1938) e Holtan (1961). Os modelos empíricos são baseados em dados derivados de experimentos de campo ou laboratório. Como exemplos de modelos empíricos tem-se os Kostiakov (1932) e Huggins e Monke (1966).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Solos Utilizados

Foram utilizados três solos da região de Pircacicaba, Estado de São Paulo, com características texturais distintas, classificados, conforme EMBRAPA (2006), como Nitossolo Vermelho eutrófico (Solo 1), Cambissolo Háplico (Solo 2) e Neossolo Quartzarênico (Solo 3).

2.2.2 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em um único ponto de cada área, cujas coordenadas geográficas são: solo 1 = 22°42'14,6"S e 47°37'21,2"W e 546 m de altitude; solo 2 = 22°38'26,2"S e 47°49'0,0"W e 535 m de altitude e solo 3 = 22°33'43,63"S e 47°53'33,33"W e 548 m de altitude. Do local amostrado foram retiradas as ervas daninhas que se faziam presentes e em seguida a camada mais superficial do solo ($\cong 0,1$ m), evitando assim o excesso de material orgânico. Foram retiradas amostras de solo com estrutura indeformada, três repetições, para determinação da densidade do solo e amostra com estrutura deformada para determinação da textura e acondicionamento na coluna para o teste de infiltração. Considera-se que as amostras representam a camada superficial do solo até 0,2 m.

As amostras indeformadas foram retiradas com um extrator de Uhland, com anéis volumétricos de, aproximadamente, 0,07 m de altura e 0,07 m de diâmetro. As medidas de altura e diâmetro dos anéis foram tomadas previamente utilizando um paquímetro digital, realizando-se três medidas de altura e de diâmetro para cada anel. Após a amostragem cada anel contendo solo foi envolvido em filme plástico para se evitar danos durante o transporte. No laboratório as amostras foram preparadas, retirando-se o excesso de solo do anel e em seguida levadas à estufa à 105°C até peso constante.

As amostras com estrutura deformada foram colocadas para secar ao ar em local coberto, em seguida destorroadas e passadas em peneira com malha de 0,1 mm, obtendo a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Após isso uma subamostra de cada solo foi levada à estufa para determinação do conteúdo de água da TFSA.

2.2.3 Caracterização física

As análises para caracterização física dos solos foram realizadas no laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Esalq.

Densidade do solo

A densidade do solo foi obtida a partir da razão entre a massa da amostra de solo seco a 105 °C e o volume do cilindro por ela ocupado.

Granulometria

Para determinação das frações granulométricas dos solos foi utilizado o método da Pipeta (GEE; OR, 2002) adaptado por Brito (2010).

Foram realizadas três repetições para cada solo tanto na determinação da granulometria como na de densidade do solo. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica, classe textural e densidade para os três solos analisados

Solo	Areia				Silte	Argila	Classe Textural	Densidade g cm ⁻³
	----- % -----							
	Média	Fina	Muito Fina	Total				
Nitossolo Vermelho eutrófico	2	28	41	33	19	48	Argilosa	1,47
Cambissolo Háplico	3	9	69	31	47	22	Franco	1,32
Neossolo Quartzarênico	6	21	56	72	17	12	Franco arenosa	1,59

2.2.4 Colunas experimentais

O experimento foi desenvolvido em colunas de plástico acrílico, cujas extremidades foram fechadas com duas bases também de acrílico, pressionadas contra o cilindro por três longos parafusos (Figura 1).

A coluna media 45 cm de comprimento, 56 mm de diâmetro interno e a espessura da parede era de 3 mm. Na parte exterior foi colocada uma fita métrica para medir o avanço da frente de molhamento.

A base da entrada de água foi fabricada de modo tal que permitia a conexão, com uma mangueira de silicone, a um frasco de Mariotte. Nesta base havia uma câmara (espaço vazio) que não continha solo, mas que ficava preenchida de água que permitia o umedecimento do solo de maneira uniforme, em apenas uma direção.

A base inferior servia exclusivamente para conter o volume de solo. O contato do meio interno com o externo nessa extremidade era obtido por vários orifícios feitos na base.

Nas duas extremidades da coluna foram utilizados papel de filtro e tela de metal para que não houvesse perdas de solo. Para que não houvesse vazamento de água, foram utilizados dois “o-rings”, um em cada extremidade, para vedação.

Figura 1 - Esquema do arranjo experimental para a medida da infiltração vertical e horizontal da água no solo

Acondicionamento das amostras de solo

Inicialmente, a base de entrada de água foi conectada à coluna na seguinte sequência: base, tela de metal, “o-ring”, papel filtro. Na extremidade aberta, fixava-se temporariamente com fita adesiva outra coluna (adicional) de 20 cm de comprimento, com o mesmo diâmetro e espessura de parede da coluna principal. A coluna composta (principal + adicional) era colocada na posição vertical para o acondicionamento da amostra de solo.

O acondicionamento era feito por meio de um funil com haste de comprimento igual à coluna composta. O procedimento consistiu em introduzir o funil na coluna composta e preenchê-la com TFSA. A seguir o funil era levantado vagarosamente

permitindo a passagem do solo para a coluna composta, evitando com isso a estratificação das partículas de solo.

Uma vez cheia a coluna composta, procedia-se ao acondicionamento batendo-se na coluna com um martelo de borracha até que nenhuma variação de volume de solo fosse percebida; o excesso de solo existente na coluna adicional era removido pela sua retirada.

Procedimento experimental durante a infiltração

No processo da infiltração horizontal, a coluna de solo homogêneo, com conteúdo de água uniforme, foi colocada na posição horizontal, com a base de entrada de água acoplada a um frasco de Mariotte, preenchido com uma solução de Sulfato de Cálcio (CaSO_4) 0,005 M. A princípio, o frasco de Mariotte foi mantido à uma altura elevada em relação a coluna até o início do processo de infiltração, com o intuito de esvaziar o ar presente na câmara da base de entrada de água. Após a retirada do ar da câmara, o frasco de Mariotte foi abaixado, mantendo sua entrada de ar um pouco abaixo do centro da coluna, obtendo-se assim um conteúdo de água θ_1 próximo à saturação em $x = 0$.

O intervalo de tempo e o volume de solução foram medidos, observando-se o avanço da frente de umedecimento, desde o início do contato da solução com o solo até alcançar 23 cm, aproximadamente, quando o fornecimento de solução foi então interrompido. Imediatamente após a interrupção, o solo foi retirado da coluna com o auxílio de um bastão e seccionado em partes pequenas, variando entre 0,8 e 2,5 cm, com o auxílio de uma faca. Essas amostras foram pesadas e levadas à estufa para determinação do conteúdo de água.

Procedimento semelhante a este da infiltração horizontal para os três solos foi feito, com os mesmos três solos, para a infiltração vertical simplesmente colocando a coluna na vertical.

2.2.5 Modelos empíricos e teóricos

Os dados experimentais obtidos de taxa de infiltração foram ajustados e comparados pelos seguintes modelos:

2.2.5.1 Equação de Kostiakov

A equação de Kostiakov é empírica e foi desenvolvida em 1932. A taxa de infiltração, segundo o modelo de Kostiakov, é expressa pela equação abaixo:

$$i = i_i t^{-a}, \quad (1)$$

onde: i_i é a taxa de infiltração no início da infiltração e a é um parâmetro relacionado com o formato da curva da taxa de infiltração em função do tempo t . A equação (1) pode ser linearizada aplicando-se o logarítmo (base 10):

$$\log i = \log i_i - a \log t \quad (2)$$

Os valores dos parâmetros i_i e a foram determinados a partir da regressão linear entre os valores medidos de $\log i$ em função de $\log t$.

2.2.5.2 Equação de Horton

Para calcular a taxa de infiltração de água no solo Horton propôs a seguinte equação em 1940:

$$i = i_f + (i_i - i_f) e^{-Ct} \quad (3)$$

onde: i_f é a taxa de infiltração final constante, i_i a taxa de infiltração no início do experimento, C é uma constante que está relacionada com o formato da curva e t é o tempo, em segundos. A determinação desses parâmetros foi realizada através da ferramenta Solver do Excel, minimizando o erro entre a taxa de infiltração medida e a estimada pela equação (3), definido por:

$$Erro = \sum (i - i_h)^2 \quad (4)$$

2.2.5.3 Equação de Green & Ampt

A equação de Green & Ampt (1911) foi desenvolvida com base na equação de Darcy, assumindo que o perfil do conteúdo de água do solo apresenta uma curva em formato de degrau. A relação entre a infiltração acumulada (I) e o tempo de infiltração (t) é dada por:

$$t = \frac{I - C \ln\left(1 + \frac{I}{C}\right)}{A} \quad (9)$$

Os valores das constantes A e C foram determinados a partir da equação (10) do modelo, através da regressão linear de i em função de $1/L$:

$$i = \frac{dI}{dt} = A + \frac{B}{L} \quad (10)$$

e da equação (11) também do modelo:

$$C = \frac{(\Delta\theta)B}{A} \quad (11)$$

em que, também segundo o modelo, $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$, sendo θ_s = conteúdo de água do solo saturado e θ_i = conteúdo de água do solo seco ao ar (antes da infiltração).

Derivando a equação (9) em função do tempo, obtêm-se a taxa de infiltração em função da infiltração acumulada:

$$i = \frac{A(C + I)}{I} \quad (12)$$

2.2.5.4 Equações de Philip

O modelo proposto por Philip (1955 e 1957 a, b) é um modelo teórico baseado na solução da equação de Richards. Equações diferentes são obtidas para as infiltrações vertical e horizontal da água. Para estimar a taxa de infiltração de água no solo no sentido horizontal, a seguinte equação foi obtida:

$$i = \frac{S}{2\sqrt{t}} \quad (5)$$

onde, i é a taxa de infiltração, t é o tempo e S é um parâmetro do solo chamado sortividade, definido por:

$$S = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \eta d\theta \quad (6)$$

sendo, θ_i = conteúdo de água em $x = 0$ da coluna e θ_0 conteúdo de água na frente de umedecimento ($x = x_f$). Esta integral pode ser obtida numericamente, a partir da solução semi-analítica da equação de Richards obtida por Philip (1955) (equação 7 abaixo) e o perfil de conteúdo de água obtido experimentalmente:

$$\eta(\theta) = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

Para estimar a taxa de infiltração no sentido vertical Philip (1957) propôs a seguinte equação:

$$i = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + F \quad (8)$$

obtida a partir de uma solução em forma de série da equação de Richards. Nesta equação, F é uma constante que está relacionada com a contribuição da gravidade para o movimento da água. F e S , neste caso, podem ser determinados a partir da regressão linear de x em função de $t^{1/2}$.

2.5.6 Análise dos resultados

O desempenho dos modelos de infiltração de água no solo foi avaliado comparando-se a taxa de infiltração predita pelos modelos de Kostiakov, Horton e Philip e Green & Ampt com a observada pelos experimentos. Foram utilizados os seguintes índices estatísticos: o coeficiente de eficiência (E') adaptado por LEGATES e MCCABE Jr (1999), a raiz quadrada do erro médio (RQEM), erro máximo absoluto (MEA) e o coeficiente de determinação (r^2). Esses índices são definidos como:

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|} \quad (13)$$

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (14)$$

$$EMA = \max \left\{ P_i - O_i \right\}_{i=1}^N \quad (15)$$

2.6 Resultados e Discussão

Nas Figuras 2 a 7 estão apresentados os valores médios medidos da taxa de infiltração para os três tipos de solo estudados, nas direções vertical e horizontal. As curvas obtidas descrevem bem o processo de infiltração no qual no início a taxa de infiltração é alta e decresce exponencialmente com o tempo, aproximando-se a um valor constante, normalmente chamado de velocidade de infiltração básica (VIB). A taxa inicial de infiltração é maior, pois no início do experimento o solo se encontra relativamente seco (TFSA), tendo, portanto, um gradiente de potencial mais elevado. Após um período de tempo o gradiente de potencial diminui e a taxa de infiltração decresce.

A infiltração vertical, para os três solos estudados, ocorreu de forma mais rápida como era de se esperar, quando comparada com a infiltração horizontal, devido à ação da gravidade. A maior taxa de infiltração inicial foi encontrada no solo 3, sentido vertical. Esse comportamento já era esperado, pois a taxa de infiltração depende da textura do solo, e o solo 3 apresenta textura arenosa, possuindo assim uma maior quantidade de macroporos.

As velocidades de infiltração básica para os solos 1, 2 e 3 no sentido horizontal foram 0,00052, 0,002 e 0,012 cm s^{-1} , respectivamente, enquanto no sentido vertical foram 0,002, 0,003 e 0,027 cm s^{-1} . Os valores de VIB encontrados no sentido vertical também se apresentaram maiores que os de sentido horizontal. A VIB apresentou relação com a granulometria, assim como observado por Rahman (2010) durante avaliações da VIB em solos de Burquina Faso, mostrando que o aumento da taxa básica de infiltração ocorre em função do aumento da quantidade de macroporos relacionada às partículas de maior tamanho do solo. Dessa forma, a máxima VIB foi obtida no solo arenoso (Solo 3), sentido vertical, enquanto a mínima ocorreu no solo argiloso (Solo 1), sentido horizontal.

Figura 2 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 no sentido horizontal

Figura 3 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 no sentido vertical

Figura 4 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 no sentido horizontal

Figura 5 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 no sentido vertical

Figura 6 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 no sentido horizontal

Figura 7 - Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 no sentido vertical

As Figuras 8 a 13 mostram os valores da taxa de infiltração medidos e estimados pelo modelo de Kostiakov. Apesar dos parâmetros do modelo de

Kostiakov serem empíricos, ou seja, não apresentam relação com parâmetros físicos do solo, pode-se verificar que o modelo representou bem a taxa de infiltração medida, realizando um ajuste estatístico dos dados. No entanto, o modelo subestimou a taxa de infiltração no início do processo, com exceção do solo 2, sentido vertical (Figura 11), onde o modelo superestimou a taxa de infiltração inicial.

Figura 8 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal

Figura 9 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical

Figura 10 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal

Figura 11 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical

Figura12 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal

Figura 13 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical

As Figuras 14 a 19 mostram os valores da taxa de infiltração medidos e estimados pelo modelo de Horton. Na Figura 16 (textura média, sentido horizontal) o modelo consegue estimar o valor da taxa de infiltração inicial, mas isso faz com que

o modelo não represente bem a curva do processo: subestima no início da infiltração e superestima no final. Esse valor inicial é mais importante para o ajuste dos parâmetros do modelo, por ser um valor alto, sendo assim influi muito no valor do erro minimizado pelo método iterativo do solver. Nos demais gráficos o modelo de Horton não representou bem a taxa de infiltração inicial, porém a curva geral foi melhor representada.

Figura 14 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal

Figura 15 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical

Figura 16 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal

Figura 17 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical

Figura 18 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal

Figura 19 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical

As Figuras 20 a 25 mostram os valores da taxa de infiltração medidos e estimados pelo modelo de Green & Ampt. Este é um modelo teórico, baseado na equação de Darcy, que supõe que o perfil do conteúdo de água apresenta curva em forma de degrau, o que é impossível na prática. Com o auxílio das Figuras é possível observar que o modelo de Green & Ampt não estima bem os valores da taxa de infiltração inicial. Nos solos 1 (argiloso) e 2 (textura média), infiltração sentido horizontal, o modelo subestima o valor da taxa de infiltração final, assumindo valores negativos, Figuras 20 e 22, respectivamente. O comportamento inverso ocorre para a infiltração no sentido vertical dos mesmos solos, em que o modelo superestima a taxa de infiltração final, Figuras 21 e 23, respectivamente. Para o solo 3 (franco arenoso) o modelo representou bem a taxa de infiltração final nos dois sentidos, horizontal e vertical.

Figura 20 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal.

Figura 21 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical

Figura 22 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal

Figura 23 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical

Figura 24 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal

Figura 25 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical

Na Figura 26 estão apresentados os gráficos da distância da fonte de água à frente de umedecimento (x_f) em função da raiz quadrada do tempo. Pode-se observar que os coeficientes de regressão linear foram maiores que 0,99, indicando

alta correlação. O avanço da frente de molhamento foi proporcional à raiz quadrada do tempo para todos os solos e sentidos de infiltração. A infiltração vertical se comportou como a horizontal, porém com uma velocidade maior. O mesmo foi observado por Libardi e Reichardt (1974).

Figura 26 - Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para infiltração horizontal nos solos 1 (a), 2 (c) e 3 (e) e vertical, solos 1 (b), 2 (d) e 3 (f)

Nas Figuras 27 a 32 são apresentados os perfis de conteúdo de água obtidos experimentalmente. Tendo em conta os resultados da Figura 26, as Figuras 27 a 32 mostram além dos perfis de conteúdo de água determinados (linha vermelha) também os estimados a partir da equação (7) (linhas azul e verde), visto que com o perfil de conteúdo de água obtido é possível determinar a função η (Θ) e assim simular tal perfil em qualquer tempo (LIBARDI, 2012).

Figura 27 - Perfis de conteúdo de água do solo 1 no sentido horizontal

Figura 28 - Perfis de conteúdo de água do solo 1 no sentido vertical

Figura 29 - Perfis de conteúdo de água do solo 2 no sentido horizontal

Figura 30 - Perfis de conteúdo de água do solo 2 no sentido vertical

Figura 31 - Perfis de conteúdo de água do solo 3 no sentido horizontal

Figura 32 - Perfis de conteúdo de água do solo 3 no sentido vertical

As Figuras 33 a 38 mostram os valores da taxa de infiltração medidos e estimados pelo modelo de Philip. Segundo Philip (1957), a equação para se calcular a taxa de infiltração vertical por seu modelo é a equação (8). No entanto, utilizou-se a equação (5), para a determinação nos dois sentidos de infiltração, tendo em vista os resultados da Figura 26 para a infiltração vertical. Utilizou-se a mesma equação pois a infiltração teve o mesmo comportamento da vertical, porém com uma velocidade maior, assim se pode ver por esta figura. Este modelo em geral representou a taxa de infiltração medida, além disso, outra vantagem seria o uso da teoria física de escoamento em meio poroso, descrito pela equação de Darcy-Buckingham, para explicar a lei da infiltração, dessa forma seus parâmetros apresentam embasamento teórico (LIBARDI, 1995).

Figura 33 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 no sentido horizontal

Figura 34 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 no sentido vertical

Figura 35 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 no sentido horizontal

Figura 36 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 no sentido vertical

Figura 37 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 no sentido horizontal

Figura 38 - Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 no sentido vertical

Nas Tabelas 2 a 5 estão apresentados os valores dos parâmetros dos modelos de Kostiakov, Horton, Green & Ampt e Philip, respectivamente. Esses parâmetros foram obtidos ajustando-se as equações de taxa de infiltração dos modelos aos dados de taxa de infiltração medidos experimentalmente (exceção ao

modelo de Philip tanto para a infiltração horizontal como para a vertical em que o parâmetro S foi determinado a partir do perfil de conteúdo de água no solo).

Analisando os parâmetros do modelo de Kostiakov (Tabela 2), nota-se que os valores de i_i foram maiores nos experimentos de infiltração vertical para os solos 2 e 3. O parâmetro i_i está relacionado com a taxa de infiltração no início do processo, e, desta forma, valores mais altos para infiltração vertical são esperados, quando comparados com valores obtidos para infiltração horizontal. No entanto, os valores de i_i para o solo 2 nos sentidos horizontal e vertical foram bem próximos. É importante lembrar que, embora o acondicionamento do solo nas colunas tenha sido feito com todo cuidado, não se trata da mesma coluna para as duas posições (horizontal e vertical). Comparando os valores de i_i entre os tipos de solos, observa-se que os maiores valores foram obtidos para o solo 3, seguidos do solo 2 e solo 1. Isto pode ser explicado devido ao fato deste solo apresentar textura arenosa, com maior presença de macroporos, facilitando a infiltração da água.

O parâmetro a do modelo de Kostiakov indica quão rápido a taxa de infiltração decresce com o tempo a partir de i_i , sendo então relacionado com o formato da curva da taxa de infiltração em função do tempo. O valor de a deve ser sempre positivo e menor que um, a fim de que a taxa de infiltração sempre diminua e a infiltração acumulada nunca seja negativa (LIBARDI, 2012). Os valores do parâmetro a obtidos para todos os solos analisados para infiltração horizontal e vertical (Tabela 2) satisfazem essa premissa.

Tabela 2 – Parâmetros do modelo de Kostiakov obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical

	Kostiakov			
	Horizontal		Vertical	
	i_i (cm s ⁻¹)	a	i_i (cm s ⁻¹)	a
Solo 1	0,113	0,558	0,198	0,558
Solo 2	0,268	0,599	0,233	0,526
Solo 3	0,352	0,504	0,672	0,572

Os parâmetros do modelo de Horton são listados na Tabela 3. O parâmetro i_i , assim como no modelo de Kostiakov, representa a taxa de infiltração no início do experimento. O parâmetro i_f representa a taxa de infiltração final e C está relacionado com o formato da curva: quanto menor o valor de C mais acentuada é a

curva. Observe (Tabela 3) que o maior valor do parâmetro i_i , foi obtido no solo 3, sentido vertical, assim como o modelo de Kostikov. Os parâmetros i_f e C também foram maiores no solo arenoso, sentido vertical.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo de Horton obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical

	Horton					
	Horizontal			Vertical		
	i_i (cm s ⁻¹)	i_f (cm s ⁻¹)	C	i_i (cm s ⁻¹)	i_f (cm s ⁻¹)	C
Solo 1	0,008	0,001	0,001	0,047	0,006	0,011
Solo 2	0,194	0,005	0,050	0,030	0,005	0,003
Solo 3	0,012	0,002	0,020	1,019	0,041	0,160

Os parâmetros A e B do modelo de Green & Ampt são listados na Tabela 4. Esses parâmetros são coeficientes obtidos através da regressão linear entre a taxa de infiltração e o inverso do comprimento de solo umedecido. O parâmetro A está relacionado à taxa de infiltração final, ou seja, a VIB, assim como o parâmetro i_f do modelo de Horton. O parâmetro B é o coeficiente linear de regressão desse ajuste.

Analisando os valores de A em relação ao tipo de solo para a infiltração vertical, nota-se que A para os solos 1 e 2 foram iguais e superiores ao obtido para o solo 3. Diferenciando-se do parâmetro i_f do modelo de Horton e da VIB medida, ambos maiores também para o solo 3, mas no sentido vertical. O valor obtido do parâmetro B , quando comparado entre solos, foi maior para o solo 3, textura franco arenosa. Quando comparados os sentidos vertical e horizontal, o valor mais alto foi encontrado no sentido vertical, diferentemente do parâmetro A .

Tabela 4 – Parâmetros do modelo de Green & Ampt obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical

	Green & Ampt			
	Horizontal		Vertical	
	A	B	A	B
Solo 1	-0,001	0,029	0,003	0,047
Solo 2	-0,002	0,097	0,005	0,051
Solo 3	0,014	0,195	0,005	0,762

O parâmetro S do modelo de Philip corresponde a sortividade do solo, que indica a capacidade que um solo homogêneo tem de absorver água em relação ao seu conteúdo de água inicial. Valores de S obtidos para os três solos estudados são listados na Tabela 5. O maior valor de S foi encontrado no solo 3, experimento no sentido vertical, como esperado. No sentido vertical este parâmetro S não deve ser chamado de sortividade, devido à influência da gravidade.

Tabela 5 – Parâmetros do modelo de Philip obtidos através do ajuste entre a taxa de infiltração medida e estimada dos três tipos de solos estudados nos experimentos de infiltração horizontal e vertical

	Philip	
	Horizontal	Vertical
	S	S
Solo 1	0,198	0,300
Solo 2	0,419	0,357
Solo 3	0,766	1,135

Nas Figuras 39 - 44 são mostradas a relação entre a taxa de infiltração estimada pelos modelos e a taxa de infiltração medida nos experimentos para os três tipos de solo e sentidos horizontal e vertical de infiltração, juntamente com a reta 1:1, que indica o quão perfeito é o ajuste do modelo aos valores medidos. Valores abaixo (acima) da reta 1:1 indicam que o modelo subestima (superestima) a taxa de infiltração.

É possível observar nas Figuras 39 a 44 que o modelo de Horton subestima valores finais da taxa de infiltração. Observa-se especificamente nas Figuras 40 (b) e 41 (b) que tal modelo obteve menor aderência para os solos 1 (textura argilosa, sentido vertical) e 2 (textura média, sentido horizontal), respectivamente.

O modelo de Green & Ampt subestimou toda a faixa da taxa de infiltração para o solo 2 (textura média) no sentido vertical (Figura 41 d) e os valores finais do solo 1 (argiloso) no sentido horizontal (Figura 39 d). Para os solos 1 (Figura 40 d) e 2 (Figura 42 d) o modelo superestima os valores finais da taxa de infiltração e subestima os valores da taxa de infiltração inicial. Os modelos que apresentaram melhor aderência dos pontos à reta ideal foram os de Kostiaikov e Philip, estando mais próximos para os três solos e diferentes sentidos.

Figura 39 - Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 1 no sentido horizontal

Figura 40 - Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 1 no sentido vertical

Figura 41 - Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 2 no sentido horizontal

Figura 42 - Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 2 no sentido vertical

Figura 43 - Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 3 no sentido horizontal

Figura 44 - Relação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos, juntamente com a reta 1:1, para o solo 3 no sentido vertical

O índice E (item 2.2.8), também chamado coeficiente de eficiência, representa a razão entre o erro quadrado médio da estimativa e a variância dos dados observados, subtraída da unidade, e varia de $-\infty$ a 1. Este índice reflete a proximidade entre os valores observados e estimados, sendo assim uma medida da acurácia de modelos. Valores de E iguais ou acima de zero indicam que a média dos valores preditos pelo modelo é uma estimativa tão boa quanto os medidos, e valores inferiores a zero indicam que o modelo não apresentou uma boa estimativa em relação aos dados observados. O índice r^2 indica quanto da variância dos dados observados é explicada pelo modelo (LEGATES; MCCABE Jr, 1999) e representa uma medida de precisão de modelos. A análise conjunta de E e r^2 representa uma forma concisa de avaliação de desempenho de modelos. Os coeficientes EQEM e MEA (item 2.2.8) fornecem uma análise de erro em termos absoluto de cada modelo.

Os valores dos índices estatísticos (E , r^2 , EQEM e MEA) referentes à comparação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos são listados nas Tabelas 6 e 7, para os solos nos sentidos horizontal e vertical, respectivamente. Os valores obtidos desses índices indicam que, em geral, todos os modelos apresentaram bom desempenho, (altos valores de E e r^2). O modelo de Kostiaikov e o de Philip apresentaram melhor desempenho, maiores valores de E , para o solo 2 (textura média), sentido horizontal. Já o modelo de Horton e o de Green & Ampt apresentaram melhor desempenho no sentido vertical, solos 2 (textura média) e 3 (franco arenoso), respectivamente. O modelo Kostiaikov foi o que obteve o mais alto valor do índice E ; no entanto, tal modelo, ao contrário do modelo de Philip, é empírico.

Tabela 6 - Índices estatísticos da comparação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos: infiltração horizontal

Índices	Kostiakov	Horton	Philip	Green & Ampt
Solo 1				
EQEM	0,0001	0,0003	0,0002	0,0004
E	0,690	0,609	0,547	0,436
r^2	0,904	0,697	0,884	0,846
MEA	0,007	0,011	0,006	0,009
Solo 2				
EQEM	0,001	0,001	0,001	0,001
E	0,754	0,524	0,711	0,499
r^2	0,864	0,899	0,826	0,827
MEA	0,036	0,010	0,034	0,054
Solo 3				
EQEM	0,002	0,002	0,002	0,003
E	0,647	0,547	0,607	0,443
r^2	0,805	0,706	0,805	0,808
MEA	0,118	0,144	0,105	0,178

Tabela 7 - Índices estatísticos da comparação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos: infiltração vertical

Índices	Kostiakov	Horton	Philip	Green & Ampt
Solo 1				
EQEM	0,001	0,001	0,001	0,001
E	0,674	0,481	0,658	0,509
r^2	0,626	0,722	0,649	0,646
MEA	0,041	0,038	0,044	0,055
Solo 2				
EQEM	0,001	0,0004	0,0005	0,001
E	0,651	0,685	0,692	0,469
r^2	0,845	0,796	0,855	0,845
MEA	0,031	0,030	0,018	0,019
Solo 3				
EQEM	0,022	0,018	0,020	0,024
E	0,553	0,538	0,527	0,524
r^2	0,669	0,715	0,624	0,624
MEA	1,548	1,249	1,216	1,682

3 CONCLUSÃO

Dentre os solos estudados, o solo 3 (textura franco arenosa) foi o que apresentou a maior taxa de infiltração e a maior VIB, provavelmente devido a menor proporção de argila e maior presença de macroporos, facilitando a infiltração da água no solo.

Dos modelos analisados, o de Kostiaikov, seguido pelo de Philip, foram os que apresentaram em média os melhores valores estimados da taxa de infiltração quando comparados com os valores medidos em laboratório.

O gráfico do avanço da frente de molhamento com a raiz quadrada do tempo de infiltração (horizontal) ajustou-se perfeitamente ao modelo de Philip. No que respeita a infiltração vertical tal gráfico foi semelhante ao da horizontal (linha reta) mas com maior inclinação.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.28, p.519-531, 2004.
- ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, L.V.C.F.; GONÇALVES, M.C.; CARVALHO, D.F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.191-196, 2003.
- BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedanceto root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.341-358, 1990.
- BRITO, A.S. **Variabilidade especial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo**. 2010. 143p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt.1, p.383-411. (Agronomy Monograph, 9).
- GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies in soil physics. 1: The flow of air and water through soils. **Journal of Agronomy Science**, Cambridge, v.4, p.1-24, 1911.
- HAROLD, M. Evaluation of temporal, spatial, and tillageinduced variability for parameterization of soil infiltration, **Geoderma**, Amsterdam, v.60, p.187-199, 1993.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**.Orlando: Academic Press, 1980. 413p.
- HOLTAN, H. N. A concept of infiltration estimates in watershed engineering, **US Dept of Agric. Service**, Washington, p.41-51, 1961.
- HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity.**Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 5, p.399-417, 1941.
- HUGGINS, L. R.; MONKE, E. J. **The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds**. Lafayette: Purdue water Resources Research Centre, 1966. 147p. (Technical Report , 1)
- JOHNSON, A. I. **A Field Method for Measurement of Infiltration**. Washington: U.S. Government Printing Office, 1963. 31p.

KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying in from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Paris, **International Soil Science Society**, p.17-21, 1932.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, p.275-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Ed. do Autor, 1995. 497p.

_____. **Dinâmica da Água no Solo**. 2.ed. São Paulo: EDUSP, 2012. 352p.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. **Generalização do movimento da água no solo: II. Infiltração vertical**. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 1974. 16p. (Boletim Científico n.17)

LILI, M.; BRALTS, V. F.; YINGHUA, P.; HAN, L.; TINGWU, L. Methods for measuring soil infiltration: State of the art. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v.1, n.1, p.22-30, 2008.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; MAL, B.C. Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. **Biosystems Engineering**, United Kingdom, v.95, n.4, p.569-582, 2006.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P. Comparison of infiltration models. **Hydrological Processes**, Chichester, v.17, p.2629-2652, 2003.

PHILLIP, J.R. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration- dependent. **Transactions of the Faraday Society**, United Kingdom, v.51, p.885-892, 1955.

_____. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration- dependent ii. **Australian Journal of Physics**, Melbourne, v.10, p.29-42, 1957a.

_____. The theory of infiltration. 4: Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, Philadelphia, v.84, p.257-264, 1957b.

RAHMAN, G. A. A study of infiltration rate in South West region of Burkina Faso. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Pakistan, v.4, n.6, p.1349-1357, 2010.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e de energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 1996. 505p.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.32, n.2, p.213-220, 1997.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11th ed. Washington: USDA, NRCS; U.S. Government Printing Office, 2010. 338p.

WESSOLEK, G.; PLAGGE, R.; LEIJ, F.J.; GENUCHTEN, M.T. Analysing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, p. 93-110, 1994.