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

**Fluxo preferencial de água no solo pela aplicação da equação de
Darcy-Buckingham e do método do balanço de água no solo**

Helon Hébano de Freitas Sousa

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

**Piracicaba
2014**

Helon Hébano de Freitas Sousa
Engenheiro Agrônomo

**Fluxo preferencial de água no solo pela aplicação da equação de Darcy-
Buckingham e do método do balanço de água no solo**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2014

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

Sousa, Helon Hébano de Freitas

Fluxo preferencial de água no solo pela aplicação da equação de Darcy-Buckingham e do método do balanço de água no solo / Helon Hébano de Freitas Sousa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
93 p: il.

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

1 FDR 2. Fluxo mátrico 3. Condutividade hidráulica 4. Nitossolo . I. Título

CDD 631.4321
S725f

DEDICATÓRIA

A minha querida mãe que na minha infância dedicou sua vida para que eu tivesse uma boa educação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que em sua infinita sabedoria atende àqueles que converte suas energias em esforço e trabalho e não apenas em preces,

À minha família, a fortaleza que sempre esteve de portas abertas para acalmar um coração inquieto,

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

À FAPESP, pela concessão da Bolsa de Estudos e reserva técnica;

Ao cativante amigo Paulo Leonel Libardi, querido professor e orientador. A porta de sua sala entreaberta é símbolo, aos meus olhos, do livre acesso que nós alunos temos seja para tirar dúvidas ou uma simples conversa,

Ao amigo e também orientador Assis Jr., pelo despertar do pensamento crítico e por me apresentar Rubem Alves,

Ao amigo Sergio de Oliveira Moraes, que com paciência e bom humor nos mostra a beleza da vida simples,

Ao amigo Quirijn De Jong van Lier, pela amizade divertida e pela agradável convivência diária,

Ao amigo Jarbas Honorio de Miranda, pela sensibilidade de nos aconselhar sobre como devemos trilhar nossa vida profissional após esse período de preparação,

A todos os funcionários dos Departamentos de Engenharia de Biosistemas. Em especial, a Angela Márcia Derigi Silva, Luiz Fernando Novello, Francisco Bernardo Dias e também, Antonio Agostinho Gozzo, Antonio Pires de Camargo, Francisco de Oliveira, Hélio de Toledo Gomes, José Geraldo Gomes, Luiz Custódio Camargo, Luiz Afonso da Costa e Marinaldo Ferreira Pinto pela amizade e prestatividade ao longo de todo este tempo;

Ao professor Antônio Roque Dechen pelo suporte dado na aquisição de todo o material utilizado na realização desse trabalho,

À Mariana Consorte Cáto da Marconi, por sua delicadeza e prestatividade durante a condução do experimento, agradecimentos estendidos ao João Polares da TecnoPON,

Aos amigos de moradia Luzimário, Roque, Renan, Carlos e Marival por fazer dos momentos em casa uma grande comédia,

Ao amigo sempre presente Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela amizade sincera e sua disponibilidade em passar seus conhecimentos, meus agradecimentos e admiração,

À Caroline Marques de Pinho, meu amor, que com seu entusiasmo me inspira a fazer o melhor todos os dias

Aos amigos companheiros de todos os dias Fernando, Ismael, Mônica, Adriano, Verena, Laiane, Angelica, Marcos, André, Dirceu, Neilo, Marcelo, Luciano.

Enfim, a todos que estiveram presentes na minha vida durante esses anos.

EPÍGRAFE

“A educação é incompatível com a pressa,
o tempo da alma é vagaroso”

Rubem Alves

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 DESENVOLVIMENTO	23
2.1 Nitossolos.....	23
2.2 Balanço de água no solo.....	24
2.3 Fluxo Preferencial	26
2.4 Material e Métodos.....	29
2.4.1 Descrição da área experimental.....	29
2.4.2 Caracterização físico-hídrica	30
2.4.3 Experimento	34
2.5 Resultados e Discussão	45
2.5.1.1 Textura do solo.....	45
2.5.1.2 Densidades do solo e partículas	45
2.5.1.3 Curvas de retenção da água no solo.....	46
2.5.1.4 Condutividade hidráulica do solo.....	46
2.5.2 Período chuvoso	47
2.5.3 Variação de umidade durante as chuvas	49
3 CONCLUSÕES	67
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
REFERÊNCIAS.....	71
ANEXOS	77

RESUMO

Fluxo preferencial de água no solo pela aplicação da equação de Darcy-Buckingham e do método do balanço de água no solo

O conhecimento dos processos que envolvem o movimento da água no solo é de fundamental importância para o manejo e a conservação do solo e da água. Há situações em que, durante um evento de chuva intensa, a água se move mais rapidamente no perfil através de canais, sem que haja interação com a matriz do solo; esse movimento é chamado de fluxo preferencial. Atualmente é aceita em estudos de campo a existência deste fluxo preferencial em uma ampla variedade de solos. No entanto, muitos métodos utilizados para determiná-lo diretamente alteram o fluxo da água através da matriz do solo, processo de drenagem de relevância indiscutível nos solos. Em trabalho recente realizado no Japão, esse problema foi superado com sucesso pela aplicação concomitante, durante e um pouco após os eventos de chuva, da equação de Darcy-Buckingham e do método do balanço de água no solo: a equação de Darcy-Buckingham infere sobre a presença de fluxo preferencial da água, definido, nessa abordagem, como o resíduo da equação do balanço de água no solo durante os eventos de chuva. Este método apresenta, portanto, a grande vantagem de tornar possível a determinação experimental do fluxo preferencial a uma dada profundidade do solo, em condições de campo, sem interromper significativamente o fluxo mátrico de água. O objetivo deste trabalho foi a determinação e caracterização do fluxo preferencial da água nas profundidades correspondentes aos horizontes B textural e B latossólico de um Nitossolo Vermelho eutrófico em condições de campo, aplicando a equação de Darcy-Buckingham e o método do balanço de água no solo, durante e um pouco após os eventos de chuva. Devido ao baixo volume de chuva durante a última estação chuvosa, em apenas duas situações foi possível reconhecer uma alteração significativa na umidade do solo em profundidades superiores a 0,5m e nas duas situações foi verificada fluxo preferencial no horizonte B_t, não foi verificado fluxo preferencial no horizonte B_w durante os eventos chuvosos avaliados. A metodologia utilizada foi eficiente na observação de fluxos de água no solo que não são influenciados pela matriz.

Palavras-chave: FDR; Fluxo mátrico; Condutividade hidráulica; Nitossolo

ABSTRACT

Preferential flow of water in the soil by applying Darcy-Buckingham's equation and the soil water balance

The understanding of the processes involving soil water movement is essential to soil and water management and conservation. There are situations in which the water moves faster in the soil profile through channels, during an event of intense rain, without interacting with soil matrix; this movement is known as preferential flow. Currently, it is accepted in field studies the existence of preferential flow in a wide range of soils. Nevertheless, many methods used to directly determine it change the water flow through the soil matrix, a drainage process of unquestionable relevance in soils. In a recent study carried out in Japan, this problem has been successfully overcome by simultaneously applying Darcy-Buckingham's equation and the soil water balance method during and shortly after rain events; the Darcy-Buckingham's equation infers on the presence of preferential water flow, defined in this approach as the residue of the soil water balance equation during the rain events. Therefore, this method has the great advantage of making possible the experimental determination of the preferential flow at a certain depth in soil, in field conditions, without significantly interrupting matric water flow. This study aimed to determine and characterize preferential water flow in depths corresponding to textural and latosolic B horizons of a Eutrophic Red Nitisol in field conditions, applying Darcy-Buckingham's equation and the soil water balance method, during and shortly after rain events. Due to the low volume of rain in the last rainy season, a significant change in soil moisture below 0.5 m was only observed in two situations, where preferential flow in B_t horizon was also verified. Preferential flow was not verified in the B_w horizon during the analyzed rain events. The methodology used was efficient in the observation of soil water flows not influenced by the soil matrix.

Keywords: FDR; Matrix flow; Conductivity hydraulic; Nitisol

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a), (b), (c) e (d) descrição do perfil do solo. Nota-se a presença de bioporos e rachaduras ao longo do perfil (c).....	30
Figura 2 - Coletas de amostras com estrutura deformada e indeformada para caracterização do solo	31
Figura 3 - Amostras de solo em processo de saturação nos funis de Haines e (b) amostras com estrutura deformada	32
Figura 4 - Instalação da estrutura de aço galvanizado para determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo	33
Figura 5 - Início da saturação do solo para determinação da condutividade hidráulica pelo método do perfil instantâneo	34
Figura 6 - (a) e (b) Profile Probe tipo PR2/6, (c) Theta Probe tipo ML2x, e (d) EQ2x/w-05, fotografias retiradas do catálogo da empresa fabricante com o único fim de ilustrar os equipamentos	35
Figura 7 - Desenho esquemático (corte vertical) da disposição dos sensores em relação a superfície. Os valores são em centímetros	36
Figura 8 - Escavação da trincheira e preparo da “parede de instalação” dos sensores	38
Figura 9 - Conexão dos sensores ao Datalogger	39
Figura 10 - Instalação do quadro do <i>Datalogger</i> e célula fotovoltaica.....	39
Figura 11 - Instalação dos sensores de umidade <i>thetaprobe ML2X</i>	40
Figura 12 - Instalação dos sensores de umidade (<i>Type PR2,</i>) (a) foto do catálogo..	41
Figura 13 - Visão geral do experimento após a instalação de todos os sensores e fechamento da trincheira de instalação.....	42
Figura 14 - Tensiômetros com manômetros de mercúrio utilizados na calibração dos tensiômetros automáticos	43
Figura 15 - Condutividade hidráulica do solo ($\ln$ de K) em função do conteúdo de água pelo método do perfil instantâneo para a profundidade 0,5m.	46
Figura 16 - Volume de chuvas (mm) para os meses de novembro e dezembro de 2013	48
Figura 17 - Volume de chuvas (mm) para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2014.	49

- Figura 18 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 29/11/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03..... 50
- Figura 19 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 05/12/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. 51
- Figura 20 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 26/12/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. 52
- Figura 21 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 30/12/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. 52
- Figura 22 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 13/01/2014. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. 53
- Figura 23 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 12/03/2014. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. 53
- Figura 24 - Volume de chuva em mm (primeira ilustração acima), umidade volumétrica em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (demais ilustrações) desde a profundidade de 0,1 m até a profundidade de 0,6m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. Evento chuvoso de 05/12/2013. 55
- Figura 25 - Volume de chuva (primeira ilustração acima), variação de armazenagem, fluxo mátrico e preferencial em mm, na profundidade de 0,5 m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. Evento chuvoso de 05/12/2013. 59
- Figura 26 - Volume de chuva em mm (primeira ilustração acima), umidade volumétrica em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (demais ilustrações) desde a profundidade de 0,1 m até a profundidade de 0,6m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03. Evento chuvoso de 12/03/2014. 60
- Figura 27 - Volume de chuva (primeira ilustração acima), variação de armazenagem, fluxo mátrico e preferencial em mm, na profundidade de 0,5 m. A evolução

do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. Evento chuvoso de 12/03/2014. 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria e classe textural para os horizontes Ap, B _t e B _w do Nitossolo.	45
Tabela 2 - Densidade dos sólidos (ρ_s), densidade do solo (ρ) e porosidade (α) para os horizontes Ap, B _t e B _w do Nitossolo.....	45
Tabela 3 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção da água no solo para os três horizontes, segundo van Genuchten (1980).....	46
Tabela 4 - Média de chuva (mm) histórica mensal para os 12 meses do ano.....	48
Tabela 5 - Dados do evento chuvoso do dia 05/12/2013.	57
Tabela 6 - Dados do evento chuvoso do dia 12/03/2014.	62

1 INTRODUÇÃO

Entende-se por ciclo hidrológico o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes e na atmosfera impulsionado pela gravidade e pela energia proveniente do Sol, ou seja, água é uma só, variando apenas a sua condição, sendo ela: água atmosférica, superficial ou subterrânea.

A água subterrânea é a parcela da água que permanece no subsolo, onde flui lentamente até descarregar em corpos de água de superfície, ser interceptada por raízes de plantas ou ser extraída em poços. Tem papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios e lagos. As águas subterrâneas estão contidas nos solos e formações geológicas permeáveis denominadas aquíferos, sua recarga é feita essencialmente pela chuva que, ao cair, infiltra-se no solo e chega até esses reservatórios por percolação.

O estudo do fluxo da água através do solo é baseado na teoria proposta por um cientista francês chamado Darcy que em 1856, procurando um meio para criar filtros de areia para água potável, observou o fluxo uniforme da água através de colunas de areia e então desenvolveu uma equação, conhecida como Equação de Darcy. Esta equação descreve a velocidade média da água em função da carga hidráulica, do comprimento e da área, mas não esclarece a velocidade real com que a água passa pelos poros do solo e não leva em consideração situações em que o fluxo da água é mais rápido no perfil através de canais que permitem esse movimento, sem que haja interação com a matriz do solo; esse fluxo é chamado de fluxo preferencial.

A existência do fluxo preferencial já era conhecida, porém sua observação foi negligenciada por muito tempo, até meados do século XX, quando os cientistas se viram obrigados a explicar problemas de contaminação de águas subterrâneas com vários pesticidas, que acreditavam serem rapidamente degradados ou fortemente absorvidos perto de onde eles foram aplicados, estes foram inesperadamente encontrados muito mais rapidamente e em maiores concentrações do que os especialistas teriam previsto.

O principal objetivo deste trabalho foi a determinação e caracterização do fluxo preferencial da água nas profundidades correspondentes aos horizontes B textural e B latossólico de um Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico em

condições de campo, aplicando a equação de Darcy Buckingham e o método do balanço de água no solo, durante e um pouco após os eventos de chuva

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Nitossolos

Os Nitossolos constituem uma das treze ordens de solos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação (EMBRAPA, 2006) e correlaciona-se com Nitisols (FAO, 2006) e o grupo kandic dos Ultisols e Alfisols (Soil Survey Staff, 2010). Estes solos caracterizam-se por serem profundos e bem drenados, apresentando predominância de material mineral, com horizonte B textural, textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila maiores que 350 g kg^{-1} de solo a partir do horizonte A), estrutura em blocos subangulares ou angulares, ou prismática, de grau moderado ou forte, com superfícies dos agregados reluzentes, relacionadas à cerosidade ou superfícies de compressão, e gradiente textural menor que 1,5 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2007; JACOMINE, 2009). Além disso, a transição entre os horizontes é gradual a difusa (FAO, 2006).

De acordo com a FAO (2003), estes solos são formados pela ação de três processos pedogenéticos, sendo ferralitização, nitidização e homogeneização. A ferralitização resulta da intensa hidrólise de minerais intemperizáveis combinados com a lixiviação de sílica e bases e acúmulo relativo de caulinita e sesquióxidos. A nitidização é provavelmente resultado de processos alternados de contração e expansão, formando agregados bem definidos com superfícies reluzentes. A homogeneização ou pedoturbação biológica é realizada pela fauna do solo, especialmente nos primeiros 100 cm, resultando em estrutura granular ou em blocos subangulares, e transição entre horizontes gradual ou difusa.

No mundo, os Nitossolos totalizam aproximadamente $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ sendo que mais da metade desta área encontra-se na África tropical, especialmente nos planaltos do Quênia, Etiópia, Congo e Camarões, porém, em outros lugares estão presentes em altitudes mais baixas, como na Ásia tropical, América do Sul e Central, e Austrália (FAO, 2003).

No Brasil, estes solos totalizam uma superfície de cerca de 96,5 mil quilômetros quadrados, correspondendo a aproximadamente 1,13% do território brasileiro (EMBRAPA, 2006). Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, principalmente onde o basalto e outras rochas eruptivas associadas à formação Serra Geral são o

material de origem dos solos, é frequente a associação de Latossolos e Nitossolos (COOPER E VIDAL-TORRADO, 2005).

De acordo com Cooper (1999), a formação do horizonte B textural em um Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico do estado de São Paulo ocorreu pela fissura dos aglomerados de microagregados coalescidos, formando os blocos subangulares moderados a fortes, e pelo preenchimento da porosidade por revestimentos de iluviação.

2.2 Balanço de água no solo

No balanço de água no solo, o volume de controle é normalmente delimitado por duas superfícies: uma superior, coincidente com a superfície do solo, e uma inferior, de igual área e paralela à superior, coincidente com a profundidade do cultivo (HILLEL, 2004), ou em casos específicos, as superfícies são delimitadas de acordo com as profundidades em que se deseja calcular. O balanço de água em um determinado volume de solo corresponde à diferença entre a quantidade de água que entra nesse volume e a quantidade de água que sai dele, durante um determinado intervalo de tempo. Quando essas quantidades forem expressas em lâmina de água, o resultado do balanço corresponde à variação da armazenagem de água no volume, ocorrida no intervalo de tempo considerado (MOTA, 2010).

O aporte de água pela superfície superior do volume de controle de solo é oriundo principalmente da precipitação, e aquela que sai do volume para a atmosfera, na forma de vapor, é denominada de evapotranspiração. Dependendo do tipo de solo e do relevo do terreno, uma quantidade de água pode também sair do volume e/ou nele entrar lateralmente, por sobre a superfície do solo (deflúvio superficial) e por debaixo dela (deflúvio subsuperficial). A quantidade de água que sai através da superfície inferior do volume de controle e a que por ela nele entra é denominada de drenagem interna e ascensão capilar, respectivamente. Sendo assim, pode-se escrever uma equação para o balanço na qual a variação da armazenagem de água no volume de controle, em dado intervalo de tempo, é igual à soma algébrica das entradas (valores positivos) e saídas (valores negativos) de água, isto é, as entradas e as saídas de água constituem um membro da equação e a variação da armazenagem o outro membro (MOTA, 2010).

Chuvas e irrigações são os componentes do balanço que podem ser medidos com mais facilidade. A armazenagem de água é determinada basicamente pela integração dos perfis de umidade do solo. Os fluxos de drenagem interna e ascensão capilar de água no solo são os componentes de maior complexidade nos procedimentos de cálculo de balanços hídricos e, para estima-los, é comum o uso da equação de Darcy-Buckingham, que envolve a condutividade hidráulica do solo em função de conteúdo de água em volume, $K(\theta)$.

O deflúvio no campo, por ter sua determinação complicada e trabalhosa, pode ser considerado como incógnita na equação desde que os demais componentes sejam conhecidos ou, pode ser desconsiderado desde que a área apresente relevo plano. A evapotranspiração também pode ser deixada como incógnita da equação quando todos os demais componentes forem conhecidos ou ainda, ser estimada por algum método baseado em variáveis climatológicas e, então, entrar como um componente conhecido da equação quando se quer determinar um outro de maior complexidade (TIMM et al., 2002).

Enquanto o balanço hídrico no solo é determinado a partir de medidas no solo, o balanço hídrico climatológico sequencial fornece uma estimativa, a partir de dados climatológicos, do que pode ocorrer em uma determinada área com relação à situação hídrica (REICHARDT, 1990). Em estudo comparativo do balanço hídrico obtido a partir de dados climatológicos com o balanço de água no solo, em que foram medidos a evapotranspiração, armazenagem de água no solo, capacidade de água disponível, deflúvio superficial e drenagem interna, por um período de dois anos para a cultura do café, Bruno et al. (2007) chegaram à conclusão de que o balanço hídrico climatológico sequencial pode substituir razoavelmente o balanço de água no solo, porém com subestimativa das variáveis mencionadas anteriormente.

Tanto o balanço de água medido em campo quanto o obtido a partir de variáveis climáticas são importantes no contexto agrícola de uma região. Valnir Júnior et al. (2001) já haviam mencionado sobre a importância do balanço de água no solo, ao citar que a partir dele é possível obter informações sobre a lixiviação de elementos químicos no solo e poluição de águas subterrâneas. Para Gouvêa (2008), as informações oriundas do balanço hídrico climatológico sequencial são importantes para as tomadas de decisões, ao tempo em que permitem saber o que ocorreu em termos de disponibilidade hídrica no solo, deficiência e excedentes hídricos em períodos específicos e, assim, identificar a variabilidade dos componentes do balanço.

2.3 Fluxo Preferencial

O conhecimento do ciclo hidrológico, em suas singularidades, é vital para a manutenção da vida. Os aquíferos subterrâneos responsáveis pelas vazões dos cursos d'água, principalmente nos períodos de estiagem, são abastecidos pela água que infiltra e se movimenta ao longo do perfil do solo. Esse processo é influenciado pelas propriedades físicas do solo e pelo modo como a água atinge a sua superfície.

À medida que a água infiltra, as camadas superiores do perfil vão umedecendo no sentido de cima para baixo, alterando gradativamente o conteúdo de água no solo (BRANDÃO et al., 2006). No entanto, há situações em que o fluxo da água é mais rápido no perfil através de canais que permitem esse movimento, sem que haja interação com a matriz do solo; esse fluxo é chamado de fluxo preferencial. O fluxo preferencial de água é o processo no qual a água se move ao longo de caminhos preferenciais através do perfil de solo, ao mesmo tempo em que se desvia de uma grande parte da matriz do solo (EGUCHI; HASEGAWA, 2008). Segundo Ogawa et al. (2002), o fluxo preferencial envolve o transporte de água e solutos através de caminhos preferenciais de um meio poroso. Durante o fluxo preferencial, frentes de molhamento locais podem se propagar a grandes profundidades no perfil, ignorando o espaço poroso da matriz do solo.

Muitas vezes acontece um movimento mais rápido de gás, água, soluto e partículas do que seria esperado com base nas propriedades do solo (De ROOIJ, 2000; LIN; ZHOU, 2008; JAMIESON et al., 2002). Este transporte de massa mais rápido está associado, segundo Allaire et al. (2009), com processos tais como: (i) fluxo em rachaduras, fluxo ao longo das rachaduras de contração de um perfil de solo não saturado, as quais ocorrem durante a secagem de solos com teor de argila significativo (HENDRICKX; FLURY, 2001), (ii) fluxo em bio-poros, refere-se ao fluxo através de canais criados pela fauna do solo (ZEHE; FLÜHLER, 2001), (iii) fluxo em "finger", ocorre quando a água infiltrada se acumula na interface entre duas camadas de solo, geralmente em solos arenosos, com uma grossa camada subjacente a uma camada mais fina, a água invade a camada subjacente, não uniformemente, através de fingers (caminhos de fluxo preferencial) (REZANEZHAD ET AL., 2006), e (iv) fluxo lateral, ocorre quando a água infiltrada se move lateralmente ao longo de uma camada inclinada com restrições hidráulicas, tais como junto à rocha matriz (McDONNELL, 1990) ou ao longo das raízes laterais (WEILER; McDONNELL, 2007). Segundo Eguchi

e Hasegawa (2008), o fluxo preferencial não ocorre somente através destas grandes passagens, mas, também, através da matriz de solos com heterogeneidade hidráulica macroscópica ou repelência à água.

Durante muito tempo, acreditou-se que o fluxo preferencial ocorreria exclusivamente através fissuras ou fendas em solos bem estruturados ou em canais feitos por minhocas ou raízes (WANG et al., 2003). Essa ideia vem sendo rechaçada nos últimos anos por meio de vários estudos de campo sobre os chamados solos mal estruturados, que demonstraram um forte potencial para manifestar fluxo preferencial em locais sem vazios estruturais aparentes (KUNG, 1990; GHODRATI; JÚRI, 1992). O fluxo preferencial de água e solutos pode ocorrer tanto em solos argilosos bem estruturados, devido à presença de rachaduras de contração e/ou bioporos (BEVEN; GERMANN, 1982), como também em solos arenosos mal estruturados (KUNG, 1990; GHODRATI; JÚRI, 1992). Segundo Morales et al. (2010), os fluxos preferenciais em estudos de campo são a regra e não a exceção em uma ampla variedade de solos.

A zona não saturada de um solo, principalmente a camada superficial química e biologicamente ativa, pode agir de forma a diminuir a lixiviação de vários compostos químicos para corpos d'água subterrâneos. Quando o fluxo da água ultrapassa grande parte da zona não saturada sem interação, o risco de poluição de quaisquer corpos d'água, como as águas subterrâneas ou superficiais, pode aumentar consideravelmente (RITSEMA; DEKKER, 2000).

O conhecimento do movimento de água e solutos na zona não saturada do solo em condições de campo é essencial para se fazer previsões confiáveis sobre os riscos de poluição nas águas subterrâneas e/ou perdas de nutrientes dos solos agrícolas (RITSEMA; DEKKER, 1995). A crescente preocupação com o fluxo preferencial da água no solo é devida ao seu impacto à agricultura, como a retenção da água no solo e a implicação direta com risco de contaminação das águas subterrâneas (BAUTERS et al., 2000; WANG et al., 2000; DOERR et al., 2007) pela lixiviação de agrotóxicos em geral no subsolo.

Há vários estudos de fluxo preferencial em solos durante os últimos 30 anos (CLOTHIER et al., 2008; FLURY; FLUHLER, 1994). Como resultado, ele agora é rotineiramente incluído nos modelos que preveem movimento de água, solutos e transporte de partículas do solo (SIMUNEK et al., 2003). Este mecanismo de transporte pode explicar o grande número de imprecisões nas previsões de movimentação de água e solutos, desvendar e compreender o fluxo de água e os

processos de transporte nos solos em condições de campo sendo, portanto, essencial para chegar a uma ferramenta segura de simulação. Só com base em modelos confiáveis podem-se conhecer os riscos reais de lixiviação de agrotóxicos ou outros contaminantes aplicados na superfície (RITSEMA; DEKKER, 2000).

Devido à variabilidade espacial do solo e da instabilidade do fluxo, é um desafio caracterizar os padrões de fluxo em solos não saturados (SENG, 2009). Essa heterogeneidade é responsável pela dificuldade em prever o fluxo de massa em situações de campo. A caracterização da eficácia, interação, tamanho, continuidade, tortuosidade, ramificação, número e área de poros com importância para o fluxo preferencial e transporte de massa associado é difícil. Por conseguinte, há uma grande variedade de métodos para avaliar o fluxo preferencial, dependendo das questões a serem respondidas, equipamentos e instrumentos disponíveis, escala de interesse e precisão desejada (ALLAIRE et al., 2009).

Alguns métodos interrompem ou alteram o fluxo de água *in situ* na matriz do solo devido à perturbação local pela presença de grandes paredes dos instrumentos. Esta interrupção pode provocar alterações na carga hidráulica na matriz do solo que circunda os macroporos próximos aos dispositivos de amostragem, o que pode afetar significativamente a natureza quantitativa e qualitativa do fluxo preferencial de água (EGUCHI; HASEGAWA, 2008). Em particular, em solos nos quais o fluxo mátrico da água descrito pela equação de Darcy-Buckingham é o processo dominante de drenagem, qualquer interrupção pode alterar o fluxo.

Recentemente, Eguchi e Hasegawa (2008) utilizaram um método com o qual determinaram com o fluxo preferencial à profundidade de 1 m de um Andisol (Hydric Hapludand), aplicando a equação de Darcy-Buckingham e o método do balanço de água no solo sem interromper significativamente o fluxo mátrico durante e um pouco após eventos de chuva, utilizando sondas de TDR para medida do conteúdo de água e tensiômetros para a medida da tensão da água no solo. No trabalho desses autores, o volume de água passando através de uma secção transversal horizontal por unidade de tempo foi significativamente maior do que o previsto pela equação de Darcy-Buckingham, utilizando a condutividade hidráulica média da área e o gradiente de potencial total. Não foram encontrados trabalhos utilizando esta metodologia Brasil.

No presente trabalho, o fluxo preferencial da água foi avaliado no campo por esse método em duas profundidades, uma no horizonte B textural (B_t) e outra no horizonte B latossólico (B_w) de um Nitossolo Vermelho eutrófico latossólico. O

horizonte B_t possui teor de argila elevado e os agregados do solo nesse horizonte são do tipo blocos bem arranjados no perfil. O horizonte B_w apresenta estrutura granular com aspecto de maciça porosa (esponjosa). Em função das características estruturais destes dois horizontes e das características das chuvas, acredita-se ser possível inferir em nossos solos quando deverá, ou não, ocorrer o fluxo preferencial da água no campo.

2.4 Material e Métodos

2.4.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido em uma área experimental cultivada com café, próxima ao posto meteorológico, nas dependências do campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ-USP, em Piracicaba, São Paulo. As coordenadas geográficas da área são 22°42’14,6”S e 47°37’21,2”W e 546 m de altitude. A média regional de precipitação anual entre 1978 e 2008 foi de 1327,0 mm, com as maiores médias observadas nos meses de dezembro e janeiro (Posto Meteorológico, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ-USP). O solo foi descrito (Figura 1) e classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico conforme descrição morfológica:

Ap 0-26 cm; bruno - avermelhado (2,5 YR 4/4, úmido) e vermelho - acinzentado (10 R 4/2, úmido); muito argiloso; estrutura granular média e forte modificada pelo uso agrícola; dura, friável, muito plástica e pegajosa; transição gradual/difusa, plana; raízes pequenas e médias abundantes, grossas comuns.

B_t1 26-52 cm; vermelho - acinzentado (10 R 4/3, úmido); muito argiloso; forte, média a grande, blocos subangulares; cerosidade forte e abundante; dura, muito friável, muito plástica e pegajosa; transição gradual/difusa, plana; raízes pequenas comuns.

B_t2 52-85 cm; vermelho - acinzentado (10 R 4/4, úmido); muito argiloso; forte, blocos subangulares e prismático grande; cerosidade forte e abundante; dura, friável, plástica e pegajosa; transição gradual/difusa, plana; raízes pequenas raras.

B_t3 85-114 cm; vermelho - escuro - acinzentado (10 R 3/4, úmido); muito argiloso; moderado, médio, blocos subangulares; cerosidade fraca e pouca;

ligeiramente dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana; raízes pequenas raras.

Bw 114-160 cm+; vermelho - escuro (10 R 3/6, úmido); muito argiloso; blocos grandes que se desfazem em granular muito pequeno; ligeiramente dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana.

Figura 1 - (a), (b), (c) e (d) descrição do perfil do solo. Nota-se a presença de bioporos e rachaduras ao longo do perfil (c)

2.4.2 Caracterização físico-hídrica

Após a descrição do perfil foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e indeformada representativas de cada horizonte para a caracterização físico-hídrica (Figura 2).

Determinações de granulometria, densidade de partícula, densidade do solo, além da construção da curva de retenção foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ-USP.

Figura 2 – Coletas de amostras com estrutura deformada e indeformada para caracterização do solo

As amostras de solo com estrutura deformada foram colocadas para secar ao ar em local coberto (Terra Fina Seca ao Ar, TFSA), em seguida destorroadas e passadas em peneira com malha de 0,002m. após isso uma subamostra de cada ponto foi colhida e levada a estufa para determinação da umidade residual, a partir da qual se calcula o fator de correção TFSA. A determinação da granulometria foi feita pelo método da pipeta conforme descrito em Brito (2010).

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 (BLAKE; HARTGE, 1986b). A densidade das partículas foi determinada utilizando o picnômetro a gás modelo ACCUPIC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation ®). A porosidade (α) foi obtida pela equação:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \quad (1)$$

sendo ρ_p a densidade de partículas e ρ_s a densidade do solo.

Para confecção da curva de retenção foram utilizadas amostras de solo com estrutura indeformada coletadas dos horizontes Ap, B_t e B_w, em anéis com 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura até a tensão de 10 kPa. As amostras foram devidamente preparadas, retirado o excesso de solo até que o volume da amostra fosse o mesmo do anel, à base inferior do anel foi colado um papel de filtro com o mesmo diâmetro para evitar perda de material. A saturação das amostras foi realizada diretamente nos funis de Haines elevando-se gradativamente o nível da água na mangueira até atingir

a altura do anel, cada amostra permaneceu saturada por 24h antes de ser aplicada a tensão (Figura 3). Para as tensões de 33, 50, 100, 300, 600, 900, 1200 e 1500 kPa foram utilizadas amostras de solo com estrutura deformada, o processo de saturação seguiu o mesmo procedimento aplicado às amostras nas tensões menores, porém, agora direto na placa porosa e com o nível da água controlado com frasco de Mariotte. As amostras foram submetidas às tensões, até o equilíbrio, em câmara de Richards (KLUTE, 1986).

O ajuste das curvas de retenção foi feito utilizando-se o modelo proposto por van Genuchten (1980) e o programa computacional TableCurve 2D (Jandel Scientific, Copyright 1989-1994).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m} \quad (2)$$

em que θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (m de água), α , m e n parâmetros da equação.

Figura 3 - Amostras de solo em processo de saturação nos funis de Haines e (b) amostras com estrutura deformada

A função condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ foi determinada pelo método do perfil instantâneo, descrito por Watson (1966) e desenvolvido em condições de campo por Hillel (1972) e Libardi et al. (1980). Para isso foi instalada no campo uma estrutura cilíndrica de aço galvanizado, com diâmetro de 3 m, até a profundidade de 1,3 m (figura 4). Foram instalados, em três repetições, tensiômetros

nas profundidades 10, 30, 50, 70, 90, 110 e 130 cm. Para efeito de cálculo foi utilizada a média da tensão obtida nas três repetições.

Figura 4 - Instalação da estrutura de aço galvanizado para determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo

A saturação do perfil do solo foi iniciada colocando água na área por meio de uma mangueira com registro a partir de um tanque até que se umedecesse a camada de 0 - 1,30 m do solo; esta condição foi verificada pela constância da leitura dos tensiômetros (Figuras 5a e 5b). A partir desse momento, o fornecimento de água foi interrompido e a área foi coberta com uma lona plástica lisa que, para ficar em contato com o solo, foi cortada em volta dos tensiômetros (Figura 5c). Acima dessa lona e encobrindo os tensiômetros foi colocada outra lona, de plástico bolha para isolamento térmico (Figura 5d) e, por fim, cobriu-se a parcela toda com uma terceira lona plástica, para evitar a entrada de água da chuva e perdas por evaporação, através da superfície do solo.

As leituras dos tensiômetros foram iniciadas e foi considerado o tempo zero de redistribuição aquele em que todos os tensiômetros indicavam apenas potencial mátrico e não mais de pressão. No início da redistribuição da água no solo foram feitas

leituras a cada meia hora, em seguida foram adotados intervalos de 1, 6 e 24 horas e a partir do segundo dia apenas uma por dia até a estabilização das leituras.

A umidade foi obtida com base nas curvas de retenção e então a equação da condutividade hidráulica, conforme Libardi et al. (1980), foi escrita como

$$K(\Theta) = K_0 \times e^{\gamma(\Theta - \Theta_0)} \quad (3)$$

Em que K_0 e Θ_0 são condutividade hidráulica e o conteúdo de água volumétrico do solo no tempo zero de redistribuição, respectivamente. O γ é o coeficiente angular da reta determinado pela regressão linear de $\ln K$ em função do conteúdo de água.

Figura 5 - Saturação do solo para determinação da condutividade hidráulica pelo método do perfil instantâneo

2.4.3 Experimento

Durante a descrição do perfil e coletas de amostra na trincheira, verificou-se que o B_t inicia-se na profundidade de 26 e segue até 114 cm, dividido em B_{t1} , B_{t2} e B_{t3} . O ponto representativo do horizonte foi escolhido na profundidade de 0,5 m. O horizonte B_w inicia-se em 1,14 m e segue até mais que 1,60 m, limite inferior da trincheira. O ponto representativo deste horizonte foi escolhido na profundidade de 1,40 m.

O conteúdo de água e o potencial mátrico da água no solo, em condições de campo, foram monitorados com o uso de sensores de umidade no solo e tensiômetros. Os conteúdos de água foram monitorados com dois diferentes sensores de umidade. As profundidades 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,6 e 1,0 m foram monitoradas com o sensor *Profile Probe tipo PR2/6* e as profundidades de 1,30 e 1,50 m com o sensor *Theta Probe tipo ML2x* ambos fabricado pela Delta-T Devices. Os potenciais mátricos no entorno das profundidades mencionadas anteriormente foram obtidos com o uso de tensiômetros automatizados, modelo *EQ2x/w-05* da Delta-T Devices. (Figura 6).

Figura 6 - (a) e (b) Profile Probe tipo PR2/6, (c) Theta Probe tipo ML2x, e (d) EQ2x/w-05, fotografias retiradas do catálogo da empresa fabricante com o único fim de ilustrar os equipamentos

Os sensores de umidade foram instalados de maneira fixa em cada ponto, com três repetições dispostas linearmente distando 0,7 m entre elas (Figura 7). As leituras foram realizadas simultaneamente em oito pontos no perfil do solo (cada repetição) para determinação da armazenagem de água e do conteúdo de água em cada ponto de leitura, desde a superfície do solo (0,1 m) até a profundidade de 1,5 m. Os sensores foram conectados a um *data-logger*.

Para medida do gradiente de potencial total da água, um par de tensiômetros posicionados a 0,25 m do ponto de instalação dos sensores de umidade foi instalado horizontalmente no solo na parede de uma trincheira, sendo um a 0,4 m e outro a 0,6

m, referentes ao ponto representativo no B_t (0,5 m) e outro par de tensiômetros a 1,3 cm e outro a 1,5 m, referentes ao ponto representativo no B_w (1,4 m). Os tensiômetros mediram simultaneamente a tensão da água no solo ao longo do tempo, foram também ligados ao *datalogger*. As precipitações também foram medidas automaticamente por um pluviôgrafo, o modelo utilizado possui duas básculas dispostas em sistema de gangorra. Conforme a chuva vai ocorrendo o sistema é acionado e um contador disposto no sistema de aquisição de dados registra o total de chuva e o horário de ocorrência.

Figura 7 - Desenho esquemático (corte vertical) da disposição dos sensores em relação a superfície. Os valores são em centímetros

Diante da impossibilidade de prever exatamente o momento em que ocorreria um evento chuvoso que resultasse em fluxo preferencial da água no solo, como também, em que tempo iniciaria esse fluxo, caso viesse ocorrer, após o início da precipitação, todas as medidas foram realizadas a cada 10 min, justificando assim a automação dos equipamentos de leitura.

O fluxo mátrico da água q_m no solo foi descrito pela equação de Darcy-Buckingham:

$$q_m = -K(\theta) \left(\frac{\Delta\psi}{L} + 1 \right) \quad (4)$$

sendo $K(\theta)$ a condutividade hidráulica K em função do conteúdo de água θ , medido pelos sensores de umidade; $\Delta\psi$ é a diferença de potencial mátrico medido pelos tensiômetros, acima e abaixo da profundidade definida, e L é a distância entre as profundidades dos tensiômetros, sendo que o fluxo é ascendente quando $q_m > 0$ e descendente quando $q_m < 0$.

A drenagem rápida da água, que não foi descrita pela equação de Darcy ou que não foi percebida pelo equipamento usado para monitorar as condições da água no solo a cada 10 min, foi considerada como o fluxo preferencial de água. O fluxo preferencial acumulado q_p a uma dada profundidade foi determinado durante e um pouco após cada evento de chuva pela equação do balanço de água no solo (HASEGAWA; SAKAYORI, 2000), assumindo que a evaporação da superfície do solo, a possível captação de água por raízes e o escoamento superficial são desprezíveis:

$$q_p = P - (q_m + \Delta h_z) \quad (5)$$

em que P corresponde à precipitação acumulada; q_m é o fluxo mátrico acumulado, e Δh_z é a variação da armazenagem de água na respectiva camada de solo no intervalo correspondente ao evento de chuva.

O balanço de água foi feito com o objetivo de estimar os fluxos de água (drenagem ou ascensão capilar). Assumindo que o relevo da área experimental é plano, o balanço de água no solo, definido como a diferença entre a quantidade de água que entra no volume de controle de solo e a quantidade de água que sai dele em um determinado intervalo de tempo (LIBARDI, 2005), foi considerado conforme a equação

$$P - q_m = \Delta h_z, \quad (6)$$

sendo P a precipitação pluvial (mm), q_m é o fluxo mátrico acumulado em mm (drenagem interna) e Δh_z o balanço ou a variação da armazenagem de água no solo (mm) na camada de solo z . O volume de controle de solo considerado terá como limite superior a superfície do solo e como limite inferior a profundidade observada,

2.4.3.1 Instalação dos equipamentos

Em função da necessidade de instalação no sentido horizontal por parte de alguns dos equipamentos, foi necessário abrir uma nova trincheira para se ter acesso às profundidades exatas de instalação. A trincheira (Figura 8a e b) foi aberta com o auxílio de uma retroescavadeira com as seguintes dimensões: 2,5 m de comprimento, 2,0 m de profundidade e 1,8 m de largura, o aplainamento da “parede de instalação” foi feito utilizando ferramentas manuais (Figura 8c). Na parede de instalação foi deixado um espaço de 0,2 m de cada lado e a parte central restante foi dividida em três partes iguais, uma para cada repetição (Figura 8d).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 8 - Escavação da trincheira e preparo da “parede de instalação” dos sensores

Antes da instalação no campo, todos os sensores foram etiquetados e previamente ligados ao *datalogger* em seus devidos canais. Essa instalação foi realizada em um ambiente seco, limpo e bem iluminado evitando assim ligações erradas ou de má qualidade. Só após os sensores estarem ligados e verificado seu funcionamento é que foram levados ao campo (Figuras 9a e b).

Figura 9 - Conexão dos sensores ao Datalogger

Um tubo de alumínio de 3 m foi utilizado como suporte tanto para o quadro de metal que abriga o *datalogger* como para o painel fotovoltaico (Figuras 10a e b).

Figura 10 - Instalação do quadro do *Datalogger* e célula fotovoltaica

A instalação foi iniciada pelos sensores de umidade *thetaprobe ML2X* mais profundos, 1,3 e 1,5 m. Com o auxílio de um trado de rosca com largura ligeiramente inferior ao corpo do sensor (Figura 11a), foi aberto o orifício que deu acesso ao ponto de instalação deste, que foi de 0,5 m a partir da parede da trincheira. Após aberto, foi colocada no orifício de acesso uma mistura aquosa feita com o mesmo solo retirado

no momento da tradagem para melhorar a adesão deste ao solo (Figura 11b). Em seguida com o auxílio de um cano de PVC o sensor foi inserido. Para fechar foi usado solo retirado do local (Figuras 11c e d).

Em seguida, os tensiômetros foram instalados distando exatamente 0,25 m de cada sensor de umidade nas profundidades 1,3 e 1,5m e, posteriormente, 0,4 e 0,6 m. A instalação seguiu o mesmo procedimento dos sensores de umidade, uma vez que eles têm dimensões semelhantes.

Figura 11 - Instalação dos sensores de umidade *thetaprobe ML2X*

Diferindo dos outros sensores, que exigiam instalação no sentido horizontal para maior confiabilidade nas leituras, o *Profile Probe type PR2* foi instalado no sentido vertical através de um tudo de acesso. Utilizando trados de fabricação exclusiva para tal fim (Figura 12a), foi feito o buraco até a profundidade de 1 m e inserido o tubo de acesso (Figura 12b). É importante ressaltar que é de fundamental importância o contato completo entre o tubo e o solo, por esse motivo a largura do trado é ligeiramente menor que a do tubo de acesso, fazendo com que haja resistência do solo à entrada do tubo, sendo necessário o uso de uma marreta para auxiliar no processo (Figura 12c). Neste caso também foi necessário o uso da solução aquosa

para proporcionar melhor adesão. Após o processo de instalação dos tubos, a sonda foi inserida e o processo de instalação concluído (Figura 12d).

Figura 12 - Instalação dos sensores de umidade (*Type PR2,*) (a) *foto do catálogo*

O pluviógrafo foi instalado a uma distância de 2 m do sensor mais periférico do conjunto.

Após a instalação de todos os equipamentos, a trincheira aberta para acesso aos pontos de instalação foi fechada para que fosse iniciada o mais rápido possível a acomodação natural do solo. Os fios dos sensores foram organizados em espiral plástica designado a tal fim (Figura 13).

Figura 13 - Visão geral do experimento após a instalação de todos os sensores e fechamento da trincheira de instalação

Todos os sensores, incluindo o pluviômetro, foram programados para realizarem leituras a cada 10 minutos de forma ininterrupta, os dados foram armazenados em um *datalogger* e coletados periodicamente.

Devido às condições de campo, com acesso limitado de energia elétrica, todo o sistema foi alimentado por uma bateria que, por sua vez, foi carregada por um sistema de captação de energia solar instalado acima do quadro que abriga o *datalogger*.

2.4.3.2 Calibração dos sensores

Todos os sensores vieram de fábrica com calibrações próprias, tendo a opção de exibir os resultados já com base em volume, ou porcentagem, no caso dos sensores de umidade, ou kPa, no caso dos tensiômetros. Porém, essa calibração pode não expressar a realidade quando as condições são diferentes daquelas na ocasião da calibração. Somado a isto, todos os sensores exibem seus resultados com

base em determinações indiretas, deixando clara a necessidade de se fazer uma calibração exclusiva para as condições próprias desse trabalho.

Para isso a programação do *datalogger* foi realizada de modo a armazenar seus dados na unidade básica de resposta dos equipamentos, que é em mV, e só com base na calibração feita para esse estudo os dados foram transformados em umidade ou tensão.

2.4.3.2.1 Sensores de umidade

As sondas de umidade utilizadas neste trabalho, *Profile Probe* type PR2 e *Theta Probe* type ML2x, são sondas de capacitância, ou FDR (“Frequency Domain Reflectometry”).

Em locais próximos aos sensores foram realizadas coletas de solo com intervalos variados desde a época seca até o período mais chuvoso. Os dados de umidade foram plotados em função da resposta dos sensores, e então, foi gerada a curva de calibração para cada ponto de leitura.

2.4.3.2.2 Tensiômetros

Com o objetivo de medir diretamente a tensão da água no solo, foram instaladas três baterias de tensiômetros com manômetro de mercúrio nas mesmas profundidades dos tensiômetros de leitura automática (Figura 14a e b). As leituras foram realizadas diariamente, em horários pré-definidos que coincidiam com os horários de leitura dos tensiômetros automáticos. O acompanhamento foi feito durante vários meses, incluindo épocas de grande umidade no solo até períodos de seca.

Figura 14 - Tensiômetros com manômetros de mercúrio utilizados na calibração dos tensiômetros automáticos

Os equipamentos foram programados para armazenar os dados em sua unidade básica de leitura, que é em mV, sem que houvesse a transformação para tensão utilizando a curva do fabricante, isso seria feito com a curva obtida após a calibração.

Observando os gráficos montados para a calibração com suas respectivas curvas foi observado que os coeficientes de regressão estavam todos acima de 0,90 e em alguns casos chegando a 0,99. Esse valor indica, teoricamente, que há uma excelente relação entre as duas variáveis e que a chance de obter a tensão real no solo com base no valor dado em mV é maior que 90%.

No entanto, numa análise minuciosa foi possível perceber, principalmente nas profundidades de 0,4 e 0,6 m, que havia uma grande quantidade de pontos nos valores que indicam umidade elevada e/ou baixas tensões, em contrapartida, poucos pontos em intervalos medianos de umidade. Isso quer dizer que a equação gerada com base nos dados perde a sensibilidade em situações em condições de alta umidade.

O objetivo deste trabalho envolve o monitoramento da tensão da água no solo durante eventos de chuva, ou seja, em situações em que o solo tem sua umidade bastante elevada como consequência da precipitação, assim um equipamento com essa falha não pode ser usado para este fim. Então, os dados de tensão que foram utilizados para determinar o gradiente nas profundidades observadas foram obtidos com base na curva de retenção da água no solo.

2.5 Resultados e Discussão

2.5.1.1 Granulometria do solo

Na tabela 01 abaixo são apresentados os dados da determinação de granulometria para os três horizontes do solo.

Tabela 1 - Granulometria e classe textural para os horizontes Ap, B_t e B_w do Nitossolo

Horizonte	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	(g Kg ⁻¹)			
A _p	336,36	210,47	453,17	Argiloso
B _t	247,27	137,70	615,03	Muito argiloso
B _w	265,88	157,75	576,37	Argiloso

Observa-se que a distribuição das frações do solo varia pouco ao longo do perfil, no caso do horizonte B textural há maior acúmulo de argila, o que lhe conferiu a classificação de “muito argiloso” enquanto os demais foram classificados como “argilosos”. Os dados estão coerentes com as características próprias da classe de solo, apresenta classe textural entre argilosa e muito argilosa, com teores de argila maiores que 350 g Kg⁻¹ de solo a partir do horizonte A (EMBRAPA, 2006).

2.5.1.2 Densidades do solo e partículas

Na tabela 02 abaixo são apresentados os valores de densidade do solo, densidade dos sólidos ou das partículas e porosidade total.

Tabela 2 - Densidade dos sólidos (ρ_s), densidade do solo (ρ) e porosidade (α) para os horizontes Ap, B_t e B_w do Nitossolo

Horizonte	ρ_s (g cm ⁻³)	ρ (g cm ⁻³)	α (%)
A _p	2,84	1,57	44,72
B _t	2,86	1,47	48,60
B _w	2,87	1,20	58,19

Em se tratando de densidade do solo, Cooper e Vidal-torrado (2005) encontraram valores idênticos para os horizontes B_t e B_w, a exceção na comparação ficou por conta do horizonte Ap que aqui apresenta densidade maior quando confrontado com o trabalho dos autores citado acima. A área encontrava-se em estado de “quase pousio” quando as coletas de solo foram realizadas, o único trato

cultural a que se destinava a área era a roçagem mecanizada da vegetação daninha, essa prática realizada repetidas vezes pode ter contribuído para a compactação da camada superficial do solo.

A densidade dos sólidos do solo pouco variou no perfil. Densidades elevadas são próprias de solos oriundos de rocha que apresenta, em sua composição original, minerais ferromagnesianos.

2.5.1.3 Curvas de retenção da água no solo

Na tabela 3 abaixo encontram-se os parâmetros de ajuste das curvas de retenção da água no solo para os três horizontes, segundo van Genuchten

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção da água no solo para os três horizontes, segundo van Genuchten (1980)

Horizonte	Θ_r	Θ_s	α	m	n	r^2
A _p	0,235	0,494	0,057	0,872	0,795	0,997
B _t	0,200	0,457	1,023	0,086	2,537	0,993
B _w	0,151	0,540	1,274	0,084	2,582	0,990

2.5.1.4 Condutividade hidráulica do solo

A figura 15 mostra a condutividade hidráulica do solo em função do conteúdo de água na profundidade 0,5 m, localizado no ponto escolhido como representativo do horizonte B textural.

Figura 15 - Condutividade hidráulica do solo (Ln de K) em função do conteúdo de água pelo método do perfil instantâneo para a profundidade 0,5m.

Tendo como base a equação de ajuste gerada no gráfico acima, foi possível escrever a equação da condutividade hidráulica conforme Libardi et al. (1980):

$$K(\Theta) = 56,26 \times e^{77,188(\Theta - 0,407)} \quad (1)$$

em que 0,407 é o valor de Θ no momento da saturação, valor máximo de umidade tomado no tempo inicial em que se começou a considerar as leituras dos tensiômetros por ocasião do perfil instantâneo. O valor 56,26 é o K_0 , condutividade hidráulica do solo saturado a campo (tempo zero de redistribuição) em mm dia⁻¹, obtido quando o Θ tem o valor de $\Theta_0 = 0,407$. Finalmente o valor 77,188 é o γ que é o coeficiente angular determinado pela regressão linear do gráfico acima.

Segundo a classificação de Kutílek e Nielsen (1994), o valor de $K_0 = 56,26$ mm dia⁻¹ é tido como baixo. Essa característica se deve a própria natureza do solo, o ponto observado (0,5 m) está localizado no horizonte B textural, que segundo Embrapa (2006) é um horizonte subsuperficial onde houve incremento de argila. Essa argila obstrui os poros maiores aumentando a resistência à passagem de água.

Cooper e Vidal-Torrado (2005), com objetivo de fornecer dados que ajudassem na discussão de problemas existentes na classificação dos Nitossolos no Brasil, estudaram, entre outros atributos, a condutividade hidráulica e retenção de água de solos com horizonte B textural; relataram que esse horizonte apresenta estrutura em blocos subangulares mais desenvolvida e compacta com domínio da porosidade textural sobre a porosidade estrutural, conferindo aos solos que o possui um comportamento caracterizado por maior retenção e diminuição na condução de água.

2.5.2 Período chuvoso

Os equipamentos foram instalados no início de janeiro de 2013 e logo em seguida foram iniciadas as coletas de dados, no entanto, devido a problemas de funcionamento não foi possível obter dados de forma confiável. Apenas dados obtidos a partir de novembro do mesmo ano foram utilizados neste trabalho.

Os dados para os meses de novembro e dezembro de 2013 são apresentados no gráfico abaixo:

Figura 16 - Volume de chuvas (mm) para os meses de novembro e dezembro de 2013

A média de chuva histórica (1917 a 2012) na cidade de Piracicaba – SP, segundo dados da Estação Meteorológica do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Esalq / USP, é de 1278,9 mm, sendo o mês de janeiro o que apresenta maior volume seguido pelo mês de dezembro, com médias de 231,6 e 199,7 mm, respectivamente (tabela 4).

Tabela 4 - Média de chuva (mm) histórica mensal para os 12 meses do ano

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
231,6	181,0	143,0	66,0	53,0	44,0	29,0	29,3	61,3	110,4	130,6	199,7

O total chovido nos meses de novembro e dezembro de 2013, 109,9 e 121 mm respectivamente ficou abaixo da média. O mesmo se repetiu nos três meses seguintes que também fazem parte do período observado no estudo, janeiro, fevereiro e março de 2014. A distribuição das chuvas nestes meses pode ser observada no gráfico abaixo:

Figura 17 - Volume de chuvas (mm) para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2014

O total de chuvas para janeiro, fevereiro e março foi, respectivamente, 83,3, 62,4 e 108,8 mm contra 231,6, 181,0 e 143,0 mm da média histórica. Com esses valores fica claro que a quadra chuvosa do período 2013/2014 foi atípica. A título de ilustração, valores inferiores aos de fevereiro de 2014 só foi observado em 1964, quando choveu 69,4mm, fazendo dele o mês de fevereiro menos chuvoso em 50 anos (Posto Meteorológico, Esalq).

2.5.3 Variação de umidade durante as chuvas

A idealização da montagem do experimento a campo foi baseada na premissa de que a região apresenta volumes consideráveis de precipitação e, em alguns casos,

com alta intensidade. Diante disto, foram instalados sensores de umidade e medidores de tensão da água no solo até a profundidade de 1,5 m.

Como o interesse foi observar o movimento da água no solo durante as chuvas e instantes depois, os gráficos a seguir foram confeccionados com dados de leitura de umidade coletados 10 minutos antes do início da precipitação e 120 minutos após a primeira leitura, quando foi observado que não havia alteração de umidade.

Observando o perfil de umidade na figura 18, que trata dos dados do evento chuvoso do dia 29/11/2013 em que choveu 27,6 mm, nota-se que a umidade variou até a profundidade 0,4 m, sendo que depois desta profundidade a alteração foi mínima e apenas mais visível na repetição 02 na qual a água chegou a profundidade de 0,6 m.

Figura 18 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 29/11/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

Durante o evento chuvoso do dia 05/12/2013 em que a precipitação foi 44,2 mm, a maior chuva observada no período, pode-se observar que maior volume de água chegou além da profundidade de 0,5m nas três repetições (Figura 19).

Figura 19 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 05/12/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

As figuras 20 e 21, que se referem aos dias 26 e 30/12/2013, representam as chuvas de menor volume dentre os eventos mostrados neste trabalho. Não houve alteração de umidade na profundidade de 0,5m que é o ponto mais superficial que o trabalho se propôs a observar a presença de fluxo preferencial.

O evento de chuva do dia 13/01/2014, mostrado na figura 22, apresentou o mesmo comportamento dos demais que tiveram volumes inferiores a 30 mm, ou seja, não foi suficiente para umedecer camadas mais profundas. Neste caso específico, na repetição 03, foi observada diminuição da umidade na profundidade 1,0 m.

O último evento significativo dentre os demais foi o do dia 12/03/2014, dia em que choveu 31,2 mm, volume suficiente para alterar a umidade do solo além de 1,0 m de profundidade, porém não influenciou as camadas abaixo do B_t (Figura 23).

Diante do fato de que em apenas dois casos a chuva foi suficiente para que a quantidade de água fosse alterada em pelo menos uma das profundidades propostas no estudo, a de 0,5 m, utilizou-se essas duas datas como objeto de discussão.

Figura 20 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 26/12/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

Figura 21 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 30/12/2013. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

Figura 22 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 13/01/2014. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

Figura 23 - Perfil de umidade desde a superfície até a profundidade de 1,5m para o evento chuvoso de 12/03/2014. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

Evento chuvoso do dia 05/12/2013

A chuva do dia 05 de dezembro teve início às 19h e em apenas 30 minutos choveu 35,2 mm, a intensidade diminuiu até cessar completamente antes de 21:30. Devido à ausência de chuvas nos dias anteriores a umidade do solo estava baixa nas primeiras camadas, conforme mostra a figura 24. A variação de umidade foi menor à medida que a profundidade se torna maior.

Os dados de chuva, armazenagem, variação de armazenagem na camada de 0-0,5 m, potencial mátrico nas profundidades 0,4 e 0,6 m, fluxo mátrico e fluxo preferencial na profundidade de 0,5 m são apresentados na tabela 05. Em forma de gráfico, na figura 25, estão a precipitação, a variação de armazenagem, fluxo mátrico e preferencial.

A armazenagem (mm) até a profundidade 0,5 m é mostrada desde 01 hora antes do início das chuvas até o momento em que não havia mais alteração de valores (27 horas após o início da coleta de dados). A variação de armazenagem foi calculada a partir da subtração do conteúdo de água na camada entre dois instantes consecutivos, ou seja, a umidade de um instante menos a umidade do instante imediatamente anterior. Os valores positivos indicam a entrada de água na camada e os valores negativos indicam que aquele volume foi drenado.

Os dados da repetição 01 apontaram um acréscimo de 49,07 mm na camada (0-0,5m) durante a chuva. A repetição 02, 32,55 mm e a repetição 03, 47,44 mm. Com exceção da repetição 02, todos os valores foram maiores que a chuva. Isso pode ser explicado, por um lado, pela alta intensidade da precipitação e por outro pela dificuldade da água infiltrar no solo na mesma velocidade em que acontecia a chuva, provocando acúmulo em pontos específicos que com o passar do tempo umedeceu o solo de forma não uniforme. Com o cessar da chuva, mesmo que lentamente, a água começou a drenar para camadas mais profundas.

Os valores dos potenciais mátricos nos pontos 0,4 e 0,6 m foram obtidos com base na curva de retenção da água no solo e utilizados para calcular o gradiente no ponto 0,5 m e o fluxo mátrico (q_m) pela equação de Darcy-Buckingham. É possível perceber a heterogeneidade entre as repetições. A explicação pode estar no modelo utilizado para determinar o fluxo da água no solo: a condutividade hidráulica $K(\theta)$ é bastante sensível à variação de umidade, por menor que seja. O gradiente de

potencial mátrico obtido através da curva de retenção da água no solo também é sensível a menor variação de umidade.

Figura 24 - Volume de chuva em mm (primeira ilustração acima), umidade volumétrica em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (demais ilustrações) desde a profundidade de 0,1 m até a profundidade de 0,6m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. Evento chuvoso de 05/12/2013

A água que não foi armazenada na camada avaliada e que não foi medida pela equação de Darcy-Buckingham, durante o período de chuva e instantes depois, foi considerada como fluxo preferencial. O fluxo preferencial acumulado foi de 5,53 mm para a primeira, de 13,93 mm para a segunda e 6,76 mm para a terceira repetição.

Tabela 5 - Dados do evento chuvoso do dia 05/12/2013

(continua)

Período	Chuva (mm)	Armazenagem (mm)			Variação de armazenagem (mm)			Potencial mátrico (mca)						q _m (mm 30min ⁻¹)			q _p (mm 30min ⁻¹)		
								0,4m			0,6m								
		Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
1,00	0,00	114,21	125,82	109,62	0,00	0,00	0,00	-20,95	-3,20	-12,29	-38,84	-35,32	-24,98	-0,003	-0,030	-0,005	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	114,21	125,82	109,62	0,00	0,00	0,00	-20,95	-3,20	-12,29	-38,84	-35,32	-24,98	-0,003	-0,030	-0,005	0,00	0,00	0,00
3,00	35,20	154,19	156,59	153,57	39,98	30,78	43,94	-12,32	-1,15	-7,80	-38,84	-35,32	-44,48	-0,007	-0,106	-0,013	0,00	4,53	0,00
4,00	8,40	163,28	158,36	157,07	9,09	1,77	3,50	-0,85	-0,86	-3,61	-22,57	-4,31	-3,65	-0,133	-0,085	-0,001	0,00	6,71	4,90
5,00	0,00	159,74	157,86	147,18	-3,54	-0,50	-9,88	-0,85	-0,86	-5,20	-14,05	-4,31	-5,60	-0,114	-0,085	-0,001	0,00	0,00	0,00
6,00	0,30	158,74	156,13	146,18	-1,00	-1,73	-1,00	-0,85	-1,15	-5,20	-14,05	-4,31	-5,60	-0,114	-0,053	-0,001	1,41	2,08	1,30
7,00	0,30	154,94	155,88	145,93	-3,81	-0,25	-0,26	-2,24	-1,15	-5,20	-14,05	-6,64	-8,88	-0,031	-0,060	-0,006	4,14	0,61	0,56
8,00	0,00	154,19	155,88	144,43	-0,75	0,00	-1,50	-2,24	-1,15	-5,20	-14,05	-6,64	-8,88	-0,031	-0,060	-0,006	0,00	0,00	0,00
9,00	0,00	154,19	155,88	144,43	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-5,20	-14,05	-6,64	-8,88	-0,031	-0,060	-0,006	0,00	0,00	0,00
10,00	0,00	152,91	154,37	144,43	-1,28	-1,51	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-8,88	-0,019	-0,045	-0,006	0,00	0,00	0,00
11,00	0,00	152,91	154,37	144,43	0,00	0,00	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-8,88	-0,019	-0,045	-0,006	0,00	0,00	0,00
12,00	0,00	152,91	154,37	144,18	0,00	0,00	-0,25	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,019	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
13,00	0,00	152,16	152,87	144,18	-0,75	-1,50	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,019	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
14,00	0,00	152,16	151,87	144,18	0,00	-1,00	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,019	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
15,00	0,00	152,16	151,87	144,18	0,00	0,00	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,019	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
16,00	0,00	152,16	151,87	144,18	0,00	0,00	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,019	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
17,00	0,00	152,16	151,87	144,18	0,00	0,00	0,00	-3,25	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,019	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
18,00	0,00	150,89	151,87	144,18	-1,27	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
19,00	0,00	150,89	151,37	143,18	0,00	-0,50	-1,00	-4,88	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
20,00	0,00	150,89	151,37	143,18	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-5,20	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,010	0,00	0,00	0,00
21,00	0,00	150,89	151,37	142,03	0,00	0,00	-1,15	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
22,00	0,00	150,89	151,37	142,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
23,00	0,00	150,89	151,37	142,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
24,00	0,00	150,14	151,37	140,53	-0,75	0,00	-1,50	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	150,14	151,37	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
26,00	0,00	150,14	151,37	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
27,00	0,00	150,14	151,37	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00

Tabela 5 - Dados do evento chuvoso do dia 05/12/2013

(conclusão)																			
Período	Chuva (mm)	Armazenagem (mm)			Variação de armazenagem (mm)			Potencial mátrico (mca)						q (mm 30min ⁻¹)			q _p (mm 30min ⁻¹)		
								0,4m			0,6m								
		Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
28,00	0,00	150,14	151,37	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
29,00	0,00	150,14	151,37	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
30,00	0,00	150,14	151,37	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
31,00	0,00	150,89	151,37	142,03	0,75	0,00	1,50	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-14,61	-0,011	-0,045	-0,005	0,00	0,00	0,00
32,00	0,00	149,14	151,37	140,29	-1,75	0,00	-1,74	-4,88	-1,57	-7,80	-14,05	-10,80	-24,98	-0,011	-0,045	-0,009	0,00	0,00	0,00
33,00	0,00	150,35	152,88	141,68	1,21	1,51	1,39	-4,88	-1,15	-5,20	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,010	0,00	0,00	0,00
34,00	0,00	150,35	152,88	141,68	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-5,20	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,010	0,00	0,00	0,00
35,00	0,00	150,35	152,88	141,68	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-5,20	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,010	0,00	0,00	0,00
36,00	0,00	150,35	152,88	141,68	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-5,20	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,010	0,00	0,00	0,00
37,00	0,00	150,35	152,88	141,68	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-5,20	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,010	0,00	0,00	0,00
38,00	0,00	149,60	151,38	140,53	-0,75	-1,50	-1,15	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
39,00	0,00	149,60	151,38	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
40,00	0,00	148,60	151,38	140,53	-1,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
41,00	0,00	148,60	151,38	140,53	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
42,00	0,00	147,85	151,38	139,03	-0,75	0,00	-1,50	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
43,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
44,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
45,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
46,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
47,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
48,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
49,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
50,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
51,00	0,00	147,85	151,12	139,03	0,00	-0,26	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-10,80	-14,61	-0,007	-0,069	-0,005	0,00	0,00	0,00
52,00	0,00	147,85	151,38	139,03	0,00	0,26	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
53,00	0,00	147,10	149,88	139,03	-0,75	-1,50	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00
54,00	0,00	147,10	149,88	139,03	0,00	0,00	0,00	-4,88	-1,15	-7,80	-9,23	-6,64	-14,61	-0,007	-0,060	-0,005	0,00	0,00	0,00

Figura 25 - Volume de chuva (primeira ilustração acima), variação de armazenagem, fluxo mátrico e preferencial em mm, na profundidade de 0,5 m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. Evento chuvoso de 05/12/2013

Evento Chuvoso do dia 12/03/2014

Figura 26 - Volume de chuva em mm (primeira ilustração acima), umidade volumétrica em m^3m^{-3} (demais ilustrações) desde a profundidade de 0,1 m até a profundidade de 0,6m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. Evento chuvoso de 12/03/2014

A chuva que iniciou às 14h 30min teve um volume total de 31, 2 mm, além de ser menos volumosa quando comparada ao evento de dezembro, também foi menos intensa.

Segundo os dados de cada repetição (tabela 6), a armazenagem de água no solo na camada de 0 a 0,5 m no momento do início da chuva era maior que a armazenagem no evento de dezembro, principalmente na camada até 0,2 m. A variação de armazenagem no momento da chuva foi de 17,37 mm para a repetição 01, de 12,69 mm para a repetição 02 e de 12,79 mm para a repetição 03. Diferente do ocorrido no evento anterior, Nos três casos o aporte hídrico medido pelos sensores foi menor que o volume de chuva ocorrido (Tabela 6).

O potencial mátrico nos pontos 0,4 e 0,6 m apontam que havia, antes da chuva, valores altos de gradiente devido a diferença de potencial entre as duas profundidades. Uma vez que o potencial da água no solo foi obtido com base na curva de retenção, a umidade ligeiramente maior na camada de 0,4m implicou na grande diferença entre os valores de tensão nos dois pontos.

O fluxo mátrico (q_m) calculado pela equação de Darcy-Buckingham é também mostrado na tabela 6 e figura 27. Observando os valores do fluxo mátrico frente aos de fluxo preferencial é possível ver a diferença de magnitude entre eles. Eguchi e Hasegawa (2008), em um evento chuvoso de 119,8 mm, ao compararem o volume do fluxo preferencial com o volume do fluxo mátrico, verificaram que o fluxo preferencial observado durante a chuva foi maior que o dobro do fluxo mátrico, evidenciando assim, a importância do fluxo preferencial na drenagem rápida em situações de chuvas mais volumosas. A heterogeneidade nos valores de fluxo mátrico entre as repetições se repete. A explicação pode estar no modelo utilizado para determinar a condutividade hidráulica do solo, a variável $K(\Theta)$ é bastante sensível a variação de umidade, por menor que seja.

Silva et al. (2007) citam como uma das prováveis causas relacionadas à condutividade hidráulica como responsáveis por dificultar as medidas representativas de fluxo de água no solo, a relação exponencial entre a condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo que faz com que pequenas variações de conteúdo de água (inclusive dentro do erro admissível para a medida de Θ) promovam variação elevada na condutividade hidráulica.

Tabela 6 - Dados do evento chuvoso do dia 12/03/2014

(continua)

Período	Chuva (mm)	Armazenagem (mm)			Variação de armazenagem (mm)			Potencial mátrico (mca)						q _m (mm 30min ⁻¹)			q _p (mm 30min ⁻¹)		
								0,4m			0,6m								
		Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
1,00	0,00	156,28	155,82	149,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-73,05	-77,00	-82,57	-0,065	-0,151	-0,007	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	155,53	154,32	149,99	-0,75	-1,50	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-73,05	-77,00	-82,57	-0,065	-0,151	-0,007	0,00	0,00	0,00
3,00	16,80	166,08	162,05	157,49	10,55	7,73	7,50	-1,15	-0,86	-20,57	-73,05	-77,00	-82,57	-0,147	-0,223	-0,007	6,40	9,29	9,31
4,00	14,10	172,90	167,01	162,78	6,82	4,96	5,29	-0,39	-0,51	-7,80	-9,23	-1,49	-8,88	-0,341	-0,185	-0,001	7,62	9,33	8,81
5,00	0,30	169,18	165,27	161,28	-3,71	-1,74	-1,50	-0,50	-0,51	-7,80	-9,23	-2,06	-8,88	-0,230	-0,187	-0,001	4,24	2,23	1,80
6,00	0,00	166,93	160,36	155,86	-2,25	-4,91	-5,42	-0,50	-0,86	-12,29	-9,23	-2,06	-14,61	-0,230	-0,070	-0,001	0,00	0,00	0,00
7,00	0,00	165,70	159,61	154,62	-1,23	-0,75	-1,24	-0,65	-0,86	-12,29	-9,23	-2,92	-24,98	-0,154	-0,078	-0,005	0,00	0,00	0,00
8,00	0,00	163,19	159,61	154,62	-2,51	0,00	0,00	-1,15	-0,86	-12,29	-9,23	-2,92	-24,98	-0,066	-0,078	-0,005	0,00	0,00	0,00
9,00	0,00	162,98	159,61	154,62	-0,21	0,00	0,00	-1,15	-0,86	-12,29	-14,05	-2,92	-24,98	-0,075	-0,078	-0,005	0,00	0,00	0,00
10,00	0,00	161,98	159,61	154,62	-1,00	0,00	0,00	-1,15	-0,86	-12,29	-14,05	-2,92	-24,98	-0,075	-0,078	-0,005	0,00	0,00	0,00
11,00	0,00	159,96	159,61	152,89	-2,02	0,00	-1,73	-1,58	-0,86	-12,29	-14,05	-2,92	-44,48	-0,049	-0,078	-0,008	0,00	0,00	0,00
12,00	0,30	159,96	158,38	152,89	0,00	-1,23	0,00	-1,58	-1,15	-12,29	-14,05	-2,92	-44,48	-0,049	-0,046	-0,008	0,35	1,58	0,31
13,00	0,00	159,96	158,38	152,89	0,00	0,00	0,00	-1,58	-1,15	-12,29	-14,05	-2,92	-44,48	-0,049	-0,046	-0,008	0,00	0,00	0,00
14,00	0,00	158,96	158,38	152,89	-1,00	0,00	0,00	-1,58	-1,15	-12,29	-14,05	-2,92	-44,48	-0,049	-0,046	-0,008	0,00	0,00	0,00
15,00	0,00	158,96	158,13	152,89	0,00	-0,25	0,00	-1,58	-1,15	-12,29	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,008	0,00	0,00	0,00
16,00	0,00	158,96	158,13	151,70	0,00	0,00	-1,19	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
17,00	0,00	158,96	158,13	151,70	0,00	0,00	0,00	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
18,00	0,00	158,96	158,13	151,70	0,00	0,00	0,00	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
19,00	0,00	158,96	157,13	151,70	0,00	-1,00	0,00	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
20,00	0,00	157,21	154,63	150,70	-1,75	-2,50	-1,00	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
21,00	0,00	157,21	154,63	150,70	0,00	0,00	0,00	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
22,00	0,00	157,21	154,63	150,70	0,00	0,00	0,00	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
23,00	0,00	156,46	154,63	149,20	-0,75	0,00	-1,50	-1,58	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-44,48	-0,049	-0,053	-0,004	0,00	0,00	0,00
24,00	0,00	155,19	154,63	148,99	-1,28	0,00	-0,21	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
26,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
27,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00

Tabela 6 - Dados do evento chuvoso do dia 12/03/2014

(conclusão)

Período	Chuva (mm)	Armazenagem (mm)			Variação de armazenagem (mm)			Potencial mátrico (mca)						q _m (mm 30min ⁻¹)			q _p (mm 30min ⁻¹)		
								0,4m			0,6m								
		Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
28,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
29,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
30,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
31,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
32,00	0,00	154,19	154,63	148,99	-1,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
33,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
34,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
35,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
36,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
37,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
38,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
39,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
40,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
41,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
42,00	0,00	154,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
43,00	0,00	155,19	154,63	148,99	1,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
44,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
45,00	0,00	155,19	154,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
46,00	0,00	155,94	156,13	148,99	0,75	1,50	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
47,00	0,00	155,94	156,13	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
48,00	0,00	155,94	156,13	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
49,00	0,00	156,94	156,63	148,99	1,00	0,50	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
50,00	0,00	156,94	156,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
51,00	0,00	156,94	156,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
52,00	0,00	156,94	156,63	148,99	0,00	0,00	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
53,00	0,00	155,94	156,13	148,99	-1,00	-0,50	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00
54,00	0,00	155,19	154,63	148,99	-0,75	-1,50	0,00	-2,24	-1,15	-20,57	-14,05	-4,31	-82,57	-0,031	-0,053	-0,007	0,00	0,00	0,00

Figura 27 - Volume de chuva (primeira ilustração acima), variação de armazenagem, fluxo mátrico e preferencial em mm, na profundidade de 0,5 m. A evolução do tempo é mostrada em forma de períodos, cada período representa 30 minutos. Evento chuvoso de 12/03/2014

O gradiente de potencial mátrico, obtido através da curva de retenção da água no solo também é sensível a menor variação de umidade.

A água que não foi armazenada na camada avaliada e que não foi medida pela equação de Darcy-Buckingham foi considerada como fluxo preferencial. O fluxo preferencial acumulado foi de 18,61 mm para a primeira, de 22,42 mm para a segunda e 20,26 mm para a terceira repetição. O trabalho de Eguchi e Hasegawa (2008) aponta que o fluxo preferencial, em alguns casos, foi responsável pela drenagem de mais da metade do volume chovido. Kung (1990), observando fluxo preferencial no campo, também concluiu que o escoamento preferencial constitui o padrão de fluxo dominante no local estudado.

Comparando os dois eventos chuvosos, podem-se observar resultados diferentes como, por exemplo, o volume do fluxo preferencial observado. No dia 05 de dezembro em que choveram 44,2 mm o fluxo preferencial observado foi respectivamente para as três repetições: 5,55; 13,93 e 6,76 mm. No dia 12 de março a chuva acumulada no período não passou 31,2 mm e, no entanto, o fluxo preferencial foi consideravelmente maior para as três repetições: 18,61, 22,42 e 20,26 mm. Como já relatado, as umidades das primeiras camadas estavam diferentes no momento do início das chuvas, menos úmido em dezembro e mais úmido em março. Diferindo dos resultados apontados neste trabalho, Lin e Zhou (2008), ao estudarem a ocorrência de fluxo preferencial no campo, concluíram que este tipo de fluxo é mais comum em época mais secas. Outra variável que foi diferente entre os dois exemplos é que a chuva no segundo evento ocorreu de forma menos torrencial que a primeira. O estudo de van Ommen (1988) indicou que a umidade antecedente ao evento chuvoso e a intensidade da chuva têm efeito importante sobre a formação de fluxos preferenciais. Assim pode-se afirmar que a ocorrência e intensidade do fluxo preferencial não é regido separadamente pela intensidade da chuva, ou pelo tipo de solo, ou ainda pela umidade do solo naquele instante e sim, cada combinação possível entre os fatores pode gerar um resultado diferente quando se trata de fluxo preferencial.

3 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve duração efetiva de uma estação chuvosa que, embora atípica, foi suficiente para mostrar o potencial da metodologia na determinação do fluxo preferencial da água no solo. Além de mostrar a eficiência da metodologia, com base no que foi observado é possível afirmar que: há fluxo preferencial durante o evento chuvoso; sua ocorrência e volume é definido pela combinação de diversos fatores, tais como volume de chuva, intensidade do evento chuvoso e umidade inicial do solo antes da chuva.

O volume de chuvas permitiu que fosse observado o comportamento do movimento da água no solo apenas na profundidade de 0,5 m, no entanto, o histórico de chuvas em anos anteriores sugere que certamente pode haver fluxo preferencial em profundidades maiores e assim sendo, em estudos sobre potencial de contaminação de água subterrânea há que se considerar o fluxo preferencial.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o trabalho apresentado e discutido há de se fazer saber as dificuldades observadas durante sua execução. Dificuldades inerentes a experimentos conduzidos no campo não serão aqui levadas em consideração, pois, de certa forma, são esperadas e muitas vezes seu contorno é antecipado antes mesmo do trabalho ser iniciado.

Com o crescimento tecnológico a oferta de equipamentos automatizados que se propõem facilitar medições é cada vez maior. Não há argumentos que sirvam de base para contestar esse avanço, afinal de contas, é com acesso à tecnologia que hoje se obtêm informações que antes eram impossíveis. No entanto, a fabricação de alguns equipamentos ainda é tímida no mercado nacional, seja por baixa demanda do produto não despertando interesse nos fabricantes ou mesmo por dificuldade de acesso a tecnologia. O fato é que diante da necessidade observada e da indisponibilidade do equipamento, invariavelmente há de se buscar produtos no mercado internacional. O processo de importação pode ser um obstáculo principalmente pelo tempo que essa operação poderá demandar, a importação de equipamentos em trabalhos com prazos diminutos pode se tornar inviável.

O conhecimento prévio do produto a ser adquirido é importante no processo de escolha do material, mesmo assim, deve-se questionar com frequência a veracidade dos valores obtidos e, se possível, confrontar com aqueles medidos pelo método padrão. Nesse trabalho foi verificado o mal funcionamento dos tensiômetros que, ao contrário da informação disponibilizada pelo fabricante, não tem a mesma faixa de leitura. A calibração deve ser considerada como indispensável. Há de encarar também a escassez de pessoal técnico para a instalação e manutenção quando necessário.

Quanto ao trabalho aqui discutido, os dados apresentados referem-se basicamente a dois eventos chuvosos em um ano atípico para a região em termos de volume e intensidade de chuva. Há exemplos de outros estudos sobre o assunto em que os autores conduziram o trabalho durante anos. A continuação do trabalho por mais tempo certamente traria outros dados que corroborariam os mostrados aqui.

REFERÊNCIAS

- ALLAIRE, S.E.; ROULIER, S.; CESSNA, .A.J. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 378, p. 179-204, 2009.
- BAUTERS, T.W.J.; STEENHUIS, T.S.; DICARLO, D.A.; NIEBER, J.L.; DEKKER, L.W.; RITSEMA, C.J.; PARLANGE, J.Y.; HAVERKAMP, R. Physics of water repellent soils. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 231/232 p. 233–243, 2000.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986b. pt. 1, p. 377-382. (Agronomy Monograph, 9).
- BOUMA, J.; DEKKER L.W. A case study on infiltration into dry clay soil I. morphological observations. **Geoderma**, Amsterdam, v. 20, p. 27-40, 1978.
- BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.
- BRITO, A. S. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo**. 2010. 143 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- BRONSWIJK, J.J.B. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 97 p. 199-212, 1988.
- BRUNO, I.P.; SILVA, A.L.; REICHARDT, K.; DOURADO NETO, D.; BACCHI, O.O.S.; VOLPE, C.A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 3, p. 215-220, May/June 2007.
- CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R.; DEURER, M. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 59, p. 2-13, Feb. 2008.
- COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 130 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.
- DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461. (Agronomy Monograph, 9).

DE ROOIJ, G.H. Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: a review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 231/232, p. 277–294, 2000.

DOERR, S.H.; RITSEMA, C.J.; DEKKER, L.W.; SCOTT, D.F.; CARTER, D. Water repellence of soils: new insights and emerging research needs. **Hydrological Processes**, London, v. 21, p. 2223–2228, 2007.

EGUCHI, S.; HASEGAWA, S. Determination and characterization of preferential water flow in unsaturated subsoil of andisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 2, p. 320–330, Mar./Abr. 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FAO. **Lecture notes on the major soils of the world**: mineral soils conditioned by a wet (sub)tropical climate. Rome, 2003. 32 p.

_____. **World reference base for soil resources**. Rome, 2006. 145 p. (World Soil Resource Report, 103).

FLURY, M.; FLÜHLER, H. Brilliant blue FCF as a dye tracer for solute transport studies: a toxicological overview. **Environmental Quality**, Madison, v. 23, n. 5, p. 1108–1112, Sept./Oct. 1994.

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).

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultissol in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n.10, p. 1443–1448, Oct. 2009.

GHODRATI, M.; JURY, W.A. A field study of the effects of soil structure and irrigation method on preferential flow of pesticides in unsaturated soil. **Journal of Contaminant Hydrology**, Philadelphia, v. 11, p. 101–125, 1992.

GOUVÊA, J.R.F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 2008. 100 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

HASEGAWA, S.; SAKAYORI, T. Monitoring of matrix flow and bypass flow through the subsoil in a volcanic ash soil. **Soil Science & Plant Nutrition**, London, v. 46, p. 661–671, 2000.

HENDRICKX, J.M.H.; FLURY, M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. In: UNITED STATES NATIONAL COMMITTEE FOR ROCK MECHANICS. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. Washington: National Research Council, 2001. p. 149–187.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 2004. 494 p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.K.; STILIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, p. 395-400, 1972.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2007. 320 p.

JACOMINI, P.K.T. A nova classificação brasileira de solos. **Anais da Academia Pernambucana de Ciências Agrônômicas**, Recife, v. 5, p. 161-179, 2009.

JAMIESON, R.; GORDON, R.; SHARPLES, K.; STRATTON, G.; MADANI, A.; Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 44, p. 6.1–6.10, 2002.

KUNG, K.J.S. Preferential flow in a sandy vadose zone: 1. Field observation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 46, p. 51-58, 1990.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monograph, 9).

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. **Soil hydrology**. Cremlingen-Destedt: Catena- Verl, 1994. 370 p.

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

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 3-7, 1980.

LIN, H.; ZHOU, X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 59, p. 34-49, Feb. 2008.

MCDONNELL, J.J. The influence of macrospores on debris flow initiation, **Quarterly Journal of Engineering Geology**, London, v. 23, p. 325-331, 1990.

MOTA, J.C.A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície**. 2010. 124 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MORALES, V.L.; PARLANGE, J.Y.; STEENHUIS, T.S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 393, p. 29–36, 2010.

REZANEZHAD, F.; VOGEL, H.J.; ROTH, K. Experimental study of fingered flow through initially dry sand. **Hydrology and Earth System sciences** Munich, v. 3, p. 2595-2620, 2006.

RICHARDS, L.A.; MOORE, D.C. Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil. **American Geophysical Union**, Washington, v. 33, p. 531–539, 1952.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

RITSEMA, C.J.; DEKKER, L.W. Influence of sampling strategy on detecting preferential flow paths in water-repellent sand. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 177, p. 33-45, 1996.

_____. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 231/232, p. 308–319, 2000.

SHENG, F.; WANG, K.; ZHANG, R.; LIU, H. Characterizing soil preferential flow using iodine–starch staining experiments and the active region model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 367, p. 115–124, 2009.

SILVA, A.L. da; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 162-170, Mar. 2007.

SIMUNEK, J.; JARVIS, N.J., VAN GENUCHTEN, GARDENAS, A. Review and comparison of models for describing non equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 272, p. 14-35, 2003.

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

TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Water balance of a sugarcane crop: quantitative and qualitative aspects of its measurement. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 57-62, jan./abr. 2002.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**. London, v. 16, p. 574–582, 1980.

VALNIR JÚNIOR, M.; COSTA, R.N.T.; AGUIAR, J.V. de. Análise de componentes do balanço hídrico em cultura de caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp), sob condições de recarga hídrica natural. **Irriga**, Botucatu, v. 6, n. 3, p. 135-153, set. 2001.

VAN OMMEN, H.C.; DIJI SMA, R.; HENDRICKX, J.M.H.; DEKKER, L.W.; HULSHOF, J.; VAN DEN HEUVEL, M. Experimental assessment of preferential flow paths in a field soil. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v. 105, p. 253-262, 1988

WANG, Z.; WU, L.; HARTER, T.; LU, J.; JURY, W.A. A field study of unstable preferential flow during soil water redistribution. **Water Resources Research**, London, v. 39, n. 4, p. 1-15, 2003.

WANG, Z.; WU, Q.J.; WU, L.; RITSEMA, C.J.; DEKKER, L.W.; FEYEN, J. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 231/232, p. 265–276, 2000.

WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, Washington, v. 2, p. 709-715, 1966.

WEILER, M.; MCDONNELL, J.J. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hill slopes. **Water Resources Research**, Washington, v. 43, p. 1-13, 2007.

ZEHE, E.; FLUHLER, H. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 247, p. 100-115, 2001.

ANEXOS

Anexo A - Calibração dos tensiômetros automáticos na profundidade 0,4 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo B - Calibração dos tensiômetros automáticos na profundidade 0,6 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo C - Calibração dos tensiômetros automáticos na profundidade 1,3 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo D - Calibração dos tensiômetros automáticos na profundidade 1,5 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo E - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 0,1 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo F - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 0,2 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo G - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 0,3 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo H - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 0,4 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo I - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 0,6 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo J - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 1,0 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo K - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 1,3 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo L - Calibração dos sensores de umidade da profundidade 1,5 m. (a) repetição 01, (b) repetição 02 e (c) repetição 03

(a)

(b)

(c)

Anexo N - Dados de chuva e umidade coletados durante o evento chuvoso do dia 05/12/2013 até a profundidade de 0,6m

(continua)

Data	Período	Chuva mm	Umidade (m^3m^{-3})																	
			0,10 m			0,2m			0,3m			0,4m			0,5m			0,6m		
			Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
05/12/2013 18:30	1	0	0,13	0,17	0,09	0,21	0,23	0,24	0,32	0,31	0,29	0,28	0,32	0,29	0,27	0,30	0,28	0,27	0,27	0,28
05/12/2013 19:00	2	0	0,13	0,17	0,09	0,21	0,23	0,24	0,32	0,31	0,29	0,28	0,32	0,29	0,27	0,30	0,28	0,27	0,27	0,28
05/12/2013 19:30	3	35,2	0,30	0,28	0,31	0,32	0,30	0,30	0,35	0,34	0,33	0,29	0,35	0,30	0,28	0,31	0,28	0,27	0,27	0,27
05/12/2013 20:00	4	8,4	0,30	0,28	0,31	0,32	0,29	0,29	0,35	0,35	0,34	0,36	0,36	0,32	0,32	0,34	0,32	0,28	0,31	0,32
05/12/2013 20:30	5	0	0,27	0,28	0,26	0,32	0,29	0,29	0,35	0,34	0,33	0,36	0,36	0,31	0,32	0,34	0,31	0,29	0,31	0,31
05/12/2013 21:00	6	0,3	0,27	0,28	0,26	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,36	0,35	0,31	0,32	0,33	0,31	0,29	0,31	0,31
05/12/2013 21:30	7	0,3	0,27	0,28	0,26	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,33	0,35	0,31	0,31	0,33	0,30	0,29	0,30	0,30
05/12/2013 22:00	8	0	0,27	0,28	0,25	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,33	0,35	0,31	0,31	0,33	0,30	0,29	0,30	0,30
05/12/2013 22:30	9	0	0,27	0,28	0,25	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,33	0,35	0,31	0,31	0,33	0,30	0,29	0,30	0,30
05/12/2013 23:00	10	0	0,27	0,28	0,25	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,30
05/12/2013 23:30	11	0	0,27	0,28	0,25	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,30
06/12/2013 00:00	12	0	0,27	0,28	0,25	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 00:30	13	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,29	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 01:00	14	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 01:30	15	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 02:00	16	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 02:30	17	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,34	0,32	0,32	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 03:00	18	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,34	0,32	0,31	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 03:30	19	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 04:00	20	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,31	0,30	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 04:30	21	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 05:00	22	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 05:30	23	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 06:00	24	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 06:30	25	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 07:00	26	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 07:30	27	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29

Anexo N - Dados de chuva e umidade coletados durante o evento chuvoso do dia 05/12/2013 até a profundidade de 0,6m

(conclusão)

Data	Período	Chuva mm	Umidade (m^3m^{-3})																	
			0,10 m			0,2m			0,3m			0,4m			0,5m			0,6m		
			Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
06/12/2013 08:00	28	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 08:30	29	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 09:00	30	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 09:30	31	0	0,26	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,29
06/12/2013 10:00	32	0	0,26	0,27	0,24	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,29	0,29	0,28
06/12/2013 10:30	33	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,31	0,30	0,33	0,30	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 11:00	34	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,31	0,30	0,33	0,30	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 11:30	35	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,31	0,30	0,33	0,30	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 12:00	36	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,31	0,30	0,33	0,30	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 12:30	37	0	0,26	0,27	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,31	0,30	0,33	0,30	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 13:00	38	0	0,25	0,26	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 13:30	39	0	0,25	0,26	0,24	0,31	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 14:00	40	0	0,25	0,26	0,24	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 14:30	41	0	0,25	0,26	0,24	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 15:00	42	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 15:30	43	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 16:00	44	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 16:30	45	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 17:00	46	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 17:30	47	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 18:00	48	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 18:30	49	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 19:00	50	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 19:30	51	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,32	0,29	0,30	0,29	0,29
06/12/2013 20:00	52	0	0,25	0,26	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 20:30	53	0	0,24	0,25	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29
06/12/2013 21:00	54	0	0,24	0,25	0,23	0,30	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,31	0,35	0,30	0,30	0,33	0,29	0,30	0,30	0,29

Anexo S - Dados de chuva e umidade coletados durante o evento chuvoso do dia 12/03/2014 até a profundidade de 0,6m

(continua)

Data	Período	Chuva mm	Umidade (m^3m^{-3})																	
			0,10 m			0,2m			0,3m			0,4m			0,5m			0,6m		
			Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
12/03/2014 14:00	1	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,35	0,33	0,35	0,28	0,30	0,31	0,27	0,26	0,26	0,26
12/03/2014 14:30	2	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,35	0,33	0,35	0,28	0,30	0,31	0,27	0,26	0,26	0,26
12/03/2014 15:00	3	16,80	0,31	0,29	0,32	0,33	0,31	0,33	0,37	0,36	0,35	0,35	0,36	0,28	0,31	0,31	0,27	0,26	0,26	0,26
12/03/2014 15:30	4	14,10	0,31	0,29	0,32	0,34	0,31	0,34	0,37	0,37	0,36	0,39	0,38	0,30	0,34	0,36	0,30	0,30	0,34	0,30
12/03/2014 16:00	5	0,30	0,30	0,28	0,31	0,33	0,31	0,34	0,37	0,37	0,36	0,38	0,38	0,30	0,34	0,36	0,30	0,30	0,33	0,30
12/03/2014 16:30	6	0,00	0,28	0,27	0,29	0,33	0,30	0,33	0,37	0,37	0,36	0,38	0,36	0,29	0,34	0,35	0,29	0,30	0,33	0,29
12/03/2014 17:00	7	0,00	0,28	0,27	0,29	0,33	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,37	0,36	0,29	0,33	0,34	0,28	0,30	0,32	0,28
12/03/2014 17:30	8	0,00	0,28	0,27	0,29	0,33	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,35	0,36	0,29	0,32	0,34	0,28	0,30	0,32	0,28
12/03/2014 18:00	9	0,00	0,28	0,27	0,29	0,33	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,35	0,36	0,29	0,32	0,34	0,28	0,29	0,32	0,28
12/03/2014 18:30	10	0,00	0,28	0,27	0,29	0,32	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,35	0,36	0,29	0,32	0,34	0,28	0,29	0,32	0,28
12/03/2014 19:00	11	0,00	0,28	0,27	0,28	0,32	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,36	0,29	0,31	0,34	0,28	0,29	0,32	0,27
12/03/2014 19:30	12	0,30	0,28	0,27	0,28	0,32	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,29	0,31	0,34	0,28	0,29	0,32	0,27
12/03/2014 20:00	13	0,00	0,28	0,27	0,28	0,32	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,29	0,31	0,34	0,28	0,29	0,32	0,27
12/03/2014 20:30	14	0,00	0,28	0,27	0,28	0,31	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,29	0,31	0,34	0,28	0,29	0,32	0,27
12/03/2014 21:00	15	0,00	0,28	0,27	0,28	0,31	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,29	0,31	0,33	0,28	0,29	0,31	0,27
12/03/2014 21:30	16	0,00	0,28	0,27	0,28	0,31	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
12/03/2014 22:00	17	0,00	0,28	0,27	0,28	0,31	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
12/03/2014 22:30	18	0,00	0,28	0,27	0,28	0,31	0,30	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
12/03/2014 23:00	19	0,00	0,28	0,27	0,28	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,35	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
12/03/2014 23:30	20	0,00	0,27	0,26	0,28	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
13/03/2014 00:00	21	0,00	0,27	0,26	0,28	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
13/03/2014 00:30	22	0,00	0,27	0,26	0,28	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
13/03/2014 01:00	23	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,34	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,27
13/03/2014 01:30	24	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 02:00	25	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 02:30	26	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 03:00	27	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26

Anexo S - Dados de chuva e umidade coletados durante o evento chuvoso do dia 12/03/2014 até a profundidade de 0,6m

(conclusão)

Data	Período	Umidade (m ³ m ⁻³)																		
		Chuva mm	0,10 m			0,2m			0,3m			0,4m			0,5m			0,6m		
			Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03	Rep 01	Rep 02	Rep 03
13/03/2014 03:30	28	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 04:00	29	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 04:30	30	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 05:00	31	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 05:30	32	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 06:00	33	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 06:30	34	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 07:00	35	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 07:30	36	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 08:00	37	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 08:30	38	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 09:00	39	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 09:30	40	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 10:00	41	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 10:30	42	0,00	0,27	0,26	0,27	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 11:00	43	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 11:30	44	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 12:00	45	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 12:30	46	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 13:00	47	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 13:30	48	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 14:00	49	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 14:30	50	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 15:00	51	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 15:30	52	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,37	0,36	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 16:00	53	0,00	0,27	0,27	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26
13/03/2014 16:30	54	0,00	0,27	0,26	0,27	0,31	0,29	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,28	0,31	0,33	0,27	0,29	0,31	0,26